

CLIMATE CHANGE

14/2023

Abschlussbericht

Kühle Gebäude im Sommer

Anforderungen und Methoden des sommerlichen Wärmeschutzes

von:

Christina Hutter, Andrea Eberle, Heiko Wöhrle, Lisa Neubert,
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen, Prof. Elisabeth Endres
Ingenieurbüro Hausladen GmbH, Kirchheim

Mit einem Beitrag von Prof. Dr. Stefan Klinski (Hochschule für Wirtschaft und Recht, Berlin)

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 14/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3720 41 507 0

FB000973

Abschlussbericht

Kühle Gebäude im Sommer

Anforderungen und Methoden des sommerlichen
Wärmeschutzes

von

Christina Hutter, Andrea Eberle, Heiko Wöhrle, Lisa Neubert,
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen, Prof. Elisabeth Endres
Ingenieurbüro Hausladen GmbH, Kirchheim


Mit einem Beitrag von Prof. Dr. Stefan Klinski (Hochschule
für Wirtschaft und Recht, Berlin)


Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Ingenieurbüro Hausladen GmbH
Feldkirchener Straße 7a
85551 Kirchheim

Abschlussdatum:

Oktober 2022

Redaktion:

Fachgebiet V 1.4 Energieeffizienz
Jens Schuberth

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, März 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Kühle Gebäude im Sommer

Dem sommerlichen Wärmeschutz wird zukünftig aufgrund des Klimawandels mit zunehmenden Hitzeperioden eine immer wichtigere Bedeutung zukommen. Die negativen Auswirkungen sind vielfältig und reichen von Komforteinbußen über ernste gesundheitliche Folgen bis hin zu steigendem Stromverbrauch von Klimaanlage. Die Entwicklung von Strategien zur Vermeidung von Überhitzung von Innenräumen mit passiven Maßnahmen ist deshalb von immenser Bedeutung. In einer groß angelegten Parameterstudie wird der Einfluss von passiven Maßnahmenpaketen, Klimadaten sowie Nutzungs- und Fassadentypen untersucht. Hierfür werden Muster-räume für die Nutzungstypen Wohnen, Büro und Schule modelliert. Um klimatische Unterschiede in Deutschland abzubilden, werden die Städte Rostock (kühles Klima), Potsdam (durchschnittliches Klima) und Mannheim (warmes Klima) für die Untersuchung ausgewählt, die in unterschiedlichen Sommerklimaregionen liegen. Der Klimawandel wird über die ortsgenauen Zukunfts-Testreferenzjahre Normaljahr 2045 und extrem warmer Sommer 2045x abgebildet sowie durch Wetterdaten des extrem warmen Sommers 2018 ergänzt. Ausgewertet werden Über-temperaturgradstunden nach dem Komfortband des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1. Ergänzt wird die Parameterstudie durch eine Energiebedarfsanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Beim anschließenden Methodenvergleich, der u.a. die beiden Verfahren nach DIN 4108-2, Komfortbewertungen nach DIN EN 16798-1 und deren Nationalem Anhang einschließt, werden ebenfalls Berechnungen und thermische Simulationen durchgeführt und die Ergebnisse – insbesondere hinsichtlich Einhaltung der Anforderungswerte – verglichen. Eine qualitative Einschätzung der Aussagekraft, der Komplexität und des Arbeitsaufwands rundet den Methodenvergleich ab. Im Rahmen der Studie wurde ferner eine rechtsgutachtliche Stellungnahme erstellt mit dem Thema erstellt, welche Bedeutung das im Gebäudeenergiegesetz verankerte Wirtschaftlichkeitsgebot für die Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz hat. Aus den Ergebnissen der Studie werden Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Abstract: Cool Buildings in Summer

The summer thermal insulation will become increasingly important in the future due to the climate change and increasing the periods of heat. The negative effects are diverse and range from loss of the comfort and serious health consequences to the increasing power consumption of the air-conditioning systems. The development of the strategies to prevent indoor overheating with the passive measures is therefore extremely important. In a large-scale parametric study, the influence of the passive measure packages, climate data, and use and façade types are investigated. For this purpose, sample rooms are modeled for the residential, office and school usage types. In order to represent climatic differences in Germany, the cities of Rostock (cool climate), Potsdam (average climate) and Mannheim (warm climate) are selected with reference to the summer climate regions for this investigation. The climate change is modeled using the location-accurate future test reference years normal year 2045 and extremely warm summer 2045x, as well as supplemented by weather data of the extremely warm summer 2018. Over-temperature degree hours are evaluated according to the comfort range of the National Annex of DIN EN 16798-1. The parametric study is supplemented by an energy demand analysis and economic efficiency analysis. In the subsequent comparison of methods, which includes the two procedures according to DIN 4108-2, comfort evaluations according to DIN EN 16798-1 and its National Annex, calculations and thermal simulations are also carried out and the results are compared, particularly with regard to compliance with the requirement values. A qualitative assessment of the significance, complexity and workload completes the comparison of methods. As part of the study, an expert legal opinion was also prepared on the significance of the economic efficiency requirement anchored in the Building Energy Act for the requirements for summer thermal insulation. The results of the study are used to derive recommendations for action.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	11
Tabellenverzeichnis	16
Abkürzungsverzeichnis	18
Zusammenfassung.....	20
Summary	36
1 Einleitung.....	48
2 Hintergrund - Klimawandel	50
2.1 Außenlufttemperatur.....	50
2.1.1 Veränderungen seit Beginn der Industrialisierung bis heute	50
2.1.3 Prognosen	52
2.1.4 Urbaner Wärmeinsel-Effekt.....	55
2.2 Solarstrahlung	55
2.3 Fazit und Literaturhinweise	56
3 Grundlagen.....	58
3.1 Raumtemperatur	58
3.1.1 Begriffsbestimmung.....	58
3.1.2 Einflussgrößen.....	58
3.1.3 Messungen.....	59
3.2 Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz in Gebäuden	60
3.2.1 Passive Maßnahmen im Überblick.....	60
3.2.2 Passive Kühlung	63
3.2.3 Aktive Kühlung	64
3.3 Gesetze, Normen und sonstige Vorgaben	65
3.3.1 Gebäudeenergiegesetz	65
3.3.2 Sommerlicher Wärmeschutz nach DIN 4108-2.....	66
3.3.3 Arbeitsstättenrichtlinie - Raumtemperatur	67
3.3.4 Komfortbewertung	67
3.3.5 Sonstige Vorgaben	71
3.3.6 Zusammenfassende Übersicht.....	72
3.4 Bewertungsmethoden	72
3.4.1 Methoden nach DIN 4108-2	72
3.4.1.1 Kennwerteverfahren.....	73
3.4.1.2 Thermische Simulation	74

3.4.2	Komfortbewertung einer thermischen Simulation.....	76
3.4.3	Kühllast-Berechnung.....	76
3.4.4	Passivhaus-Projektierungspaket - Sommerfall	78
3.4.5	Kühlenergiebedarfsberechnung	80
3.5	Auswertegrößen von thermischen Simulationen im Vergleich	80
3.5.1	Größen zur Bewertung sommerlichen Komforts.....	80
3.5.1.1	Durchschnittliche und maximale Raumtemperatur	81
3.5.1.2	Übertemperaturhäufigkeit	81
3.5.1.3	Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2	82
3.5.1.4	Adaptives Komfortmodell nach DIN EN 16798-1.....	83
3.5.1.5	Übertemperaturgradstunden nach dem Nationalen Anhang der DIN EN 16798-1	85
3.5.1.6	Predicted Mean Vote (PMV) und Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD).....	85
3.5.2	Vergleich der Auswertegrößen	86
3.5.2.1	Verlauf in einer exemplarischen Woche.....	86
3.5.2.2	Auswertung über ein Jahr.....	89
3.5.3	Anforderungswerte.....	96
3.5.3.1	Überblick.....	96
3.5.3.2	Schlussfolgerung	98
3.6	Klimadaten – Testreferenzjahre TRY.....	99
3.6.1	Übersicht.....	99
3.6.2	Modellierung.....	100
3.6.3	Analyse exemplarischer TRY	101
3.7	Fachliteratúrauswertung.....	110
4	Vorgehensweise Parameterstudie	113
4.1	Ziele.....	113
4.2	Methodik.....	113
4.2.1	Aufbau.....	113
4.2.2	Auswertungsgrößen.....	113
4.3	Modellierung Musterräume.....	114
4.4	Variantenbildung.....	117
4.4.1	Kurzbezeichnungen.....	117
4.4.2	Variantenauswahl	119
4.4.2.1	Klimadaten	119
4.4.2.2	Maßnahmenpakete	123

4.4.2.3	Energiestandard.....	124
4.4.2.4	Bauweise.....	124
4.4.2.5	Matrix.....	125
4.5	Randbedingungen Simulation.....	126
5	Ergebnisse Parameterstudie	129
5.1	Basisuntersuchung.....	129
5.1.1	Variantenübersicht	129
5.1.2	Statistische Auswertung	134
5.1.3	Auswertung der operativen Raumtemperatur.....	139
5.1.4	Aufstellung und Prüfung von Hypothesen.....	141
5.1.4.1	Klimadaten	141
5.1.4.2	Maßnahmenpakete	144
5.1.4.3	Raumbeschaffenheit.....	149
5.2	Exkurs – Nutzungseinfluss.....	152
5.2.1	Randbedingungen	152
5.2.2	Variantenbildung	152
5.2.2.1	Taglüftung.....	152
5.2.2.2	Nachtlüftung.....	153
5.2.2.3	Sonnenschutz.....	153
5.2.2.4	Interne Lasten	154
5.2.3	Ergebnisse	154
5.2.3.1	Taglüftung.....	154
5.2.3.2	Nachtlüftung.....	159
5.2.3.3	Sonnenschutz.....	161
5.2.3.4	Interne Lasten	162
5.2.4	Fazit.....	162
5.3	Detailuntersuchung.....	164
5.3.1	Klimadaten	164
5.3.1.1	Klimawandel extrem	164
5.3.1.2	Urbaner Wärmeinsel-Effekt.....	167
5.3.2	Energiestandard.....	168
5.3.3	Bauweise.....	177
5.3.4	Lage innerhalb des Gebäudes.....	181
5.3.5	Wechselwirkung.....	184

5.3.6	Randbedingungen Schule	185
5.3.7	Nutzungsverhalten.....	187
5.4	Diskussion Basis- und Detailuntersuchung	189
5.4.1	Klimadaten	189
5.4.2	Auswertung der Raumtemperatur (Übertemperaturgradstunden).....	190
5.4.2.1	Einfluss der Luftgeschwindigkeit	190
5.4.2.2	Einfluss der Raumluftfeuchte	194
5.4.3	Auswertung auf Basis des NA-Komfortbands	196
5.4.4	Untersuchung von Fallbeispielen.....	199
5.4.5	Raumweise Betrachtung.....	199
5.5	Energiebedarfsanalyse.....	199
5.5.1	Vorgehensweise.....	200
5.5.2	Ergebnisse	202
5.5.3	Diskussion	214
5.5.3.1	Strombedarf für mechanische Nachtlüftung	214
5.5.3.2	Was ist passive Kühlung?.....	217
5.5.3.3	Kombination aus aktiver Kühlung und PV-Anlage	218
5.5.4	Weiterführende Überlegungen zur Energieeffizienz	219
5.6	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	219
5.6.1	Vorgehensweise.....	219
5.6.1.1	Berechnungsmethode	220
5.6.1.2	Untersuchungsumfang	220
5.6.1.3	Randbedingungen.....	221
5.6.1.4	Kostengruppen	221
5.6.2	Ergebnisse	226
5.6.3	Diskussion	230
5.7	Exkurs – Ökobilanz (Eberle 2021).....	232
5.8	Fazit	236
6	Zur Bedeutung des Wirtschaftlichkeitsgebots für die Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz	241
6.1	Das Wirtschaftlichkeitsgebot des Gebäudeenergierechts.....	241
6.1.1	Die einschlägigen Bestimmungen im Überblick.....	241
6.1.2	Zum Inhalt des Wirtschaftlichkeitsgebots	243
6.1.2.1	Zum Regelungsgehalt von § 5 GEG	244

6.1.2.2	Zum Regelungsgehalt von § 102 Abs. 1 GEG	248
6.1.3	Verfassungs- und EU-rechtliche Einordnung	253
6.1.3.1	Verfassungsrecht	253
6.1.3.2	EU-Recht	255
6.2	Wirtschaftlichkeitsgebot und sommerlicher Wärmeschutz	256
6.2.1	Allgemeines zu den Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz	256
6.2.2	Das spezielle Wirtschaftlichkeitsgebot des § 14 Abs. 4 GEG	257
6.2.2.1	Zum Regelungsgehalt.....	257
6.2.2.2	Besonderheiten im Verhältnis zu § 102 GEG	259
6.2.3	Zum Umgang mit von § 14 Abs. 4 GEG nicht erfassten Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz	259
6.3	Ergänzende Einzelfragen.....	261
6.4	Zentrale Ergebnisse.....	262
7	Methodenvergleich	264
7.1	Vorgehensweise	264
7.2	Ergebnisse	269
7.3	Fazit.....	275
7.4	Erkenntnisse und Empfehlungen	275
8	Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen.....	283
8.1	Klimawandel, Raumtemperaturen und Folgen für das Bauwesen	283
8.2	Methoden für die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes	284
8.3	Wirksamkeit und Grenzen passiver Maßnahmen(-pakete).....	287
8.4	Technischer und finanzieller Aufwand passiver Maßnahmen.....	288
8.5	Planungshinweise Sommerlicher Wärmeschutz.....	291
8.6	Bestandsgebäude und Sanierungen	291
8.7	Weiterer Forschungsbedarf und Wissenstransfer	293
9	Quellenverzeichnis	295

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Einfluss verschiedener Parameter auf die Überhitzung - Wohnzimmer.....	27
Abbildung 2:	Einfluss verschiedener Parameter auf die Überhitzung - Büroraum.....	28
Abbildung 3:	Einfluss verschiedener Parameter auf die Überhitzung - Klassenzimmer.....	29
Abbildung 4:	Infografiken	34
Abbildung 5:	Influence of different parameters on overheating - living room	42
Abbildung 6:	Influence of various parameters on overheating - office space	43
Abbildung 7:	Influence of different parameters on overheating - classroom	44
Abbildung 8:	Temperaturanomalie 1881 bis 2019	50
Abbildung 9:	Sommertage und Heiße Tage (1951 bis 2019)	51
Abbildung 10:	Jahresmitteltemperatur 2019 und Abweichung vom vieljährigen Mittelwert.....	52
Abbildung 11:	Beobachtete und projizierte Temperaturentwicklung für Deutschland 1881 - 2100.....	53
Abbildung 12:	Anomalie der Sonnenscheindauer Deutschland mit Referenzzeitraum 1961 - 1990	55
Abbildung 13:	Jahressummen der Globalstrahlung in Deutschland 1990 - 2020	56
Abbildung 14:	Einflussgrößen auf die Raumtemperatur	59
Abbildung 15:	Grenztemperaturen für den sommerlichen Komfort gemäß DIN EN DIN EN 16798-1 (für Büro- und Wohnräume).....	69
Abbildung 16:	Empfohlene operative Raumtemperaturen des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1:2022-03.....	70
Abbildung 17:	Sonneneintragskennwerteverfahren nach DIN 4108-2.....	74
Abbildung 18:	Kühllastzonen nach (VDI 2078).....	77
Abbildung 19:	PHPP-Beispielberechnung Übertemperaturhäufigkeit	79
Abbildung 20:	Darstellung der Maximaltemperatur und Durchschnittstemperatur für eine exemplarische Sommer-Woche.....	81
Abbildung 21:	Darstellung Übertemperaturstunden bzw. -häufigkeit für eine exemplarische Sommer-Woche (Büro)	82
Abbildung 22:	Darstellung von Übertemperaturgradstunden für eine exemplarische Sommer-Woche (Büro)	83
Abbildung 23:	Darstellung der Übertemperaturhäufigkeit über Kategorie II für eine exemplarische Sommer-Woche (Büro)	84
Abbildung 24:	Darstellung der Übertemperaturgradstunden über Kategorie II für eine exemplarische Sommer-Woche (Büro).....	84

Abbildung 25:	Darstellung der Übertemperaturgradstunden über der Komforttemperatur des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 für eine exemplarische Sommer-Woche (Büro).....	85
Abbildung 26:	Darstellung des PMV und des daraus resultierenden PPD für eine exemplarische Sommer-Woche (Büro)	86
Abbildung 27:	Verlauf der Kenngrößen in exemplarischen Sommer-Woche (Beispiel Rostock, TRY2045x, MIN).....	87
Abbildung 28:	Darstellung der Verteilung der operativen Raumtemperaturen	90
Abbildung 29:	Ergebniswerte der Auswertegrößen im relativen Vergleich für die Maßnahmenpakete MIN, STD und MAX an den Standorten Rostock, Potsdam und Mannheim	92
Abbildung 30:	Exemplarisch ausgewählte Standorte für die Untersuchung der TRY	101
Abbildung 31:	Monatliche Auswertung der TRY 2017 vom DWD am Beispiel Potsdam Innenstadt	103
Abbildung 32:	Auswertung der TRY-Datensätze 2015 und 2045.....	105
Abbildung 33:	Auswertung der TRY-Datensätze für normale und extrem warme Sommerjahre	106
Abbildung 34:	Standorte mit DWD-Wetterstationen für den Vergleich TRY - Wetterdaten	107
Abbildung 35:	TRY-Vergleich mit gemittelten DWD-Messwerten der Jahre 2011-2020.....	108
Abbildung 36:	TRY, Klima- und Wetterdaten im Vergleich.....	121
Abbildung 37:	Übertemperaturgradstunden Wohnzimmer (westorientiert)	130
Abbildung 38:	Übertemperaturgradstunden 2-Personen Büro (westorientiert)	132
Abbildung 39:	Übertemperaturgradstunden Klassenzimmer (westorientiert)	133
Abbildung 40:	Prozentuale Einhaltung und Überschreitung des Anforderungswerts.....	134
Abbildung 41:	Einhaltung des Anforderungswertes in Abhängigkeit der Klimadaten (Büro).....	136
Abbildung 42:	Einhaltung des Anforderungswertes in Abhängigkeit des grundflächenbezogenen und fassadenbezogenen Fensterflächenanteils	137
Abbildung 43:	Einhaltung des Anforderungswertes in Abhängigkeit der Orientierung (Wohnen)	138
Abbildung 44:	Einhaltung des Anforderungswertes in Abhängigkeit der Orientierung (Büro)	138
Abbildung 45:	Bereiche operativer Raumtemperaturen Wohnzimmer-TRY2045 (westorientiert)	140

Abbildung 46:	Bereiche operativer Raumtemperaturen Büro - TRY2045 (westorientiert)	140
Abbildung 47:	Bereiche operativer Raumtemperaturen Klassenzimmer - TRY2045 (westorientiert)	141
Abbildung 48:	Temperaturverlauf Klassenzimmer mit MAX-Maßnahmenpaket in Potsdam (westorientiert) - ohne Fenster	143
Abbildung 49:	Temperaturverlauf Wohnzimmer mit MIN-Maßnahmenpaket in Potsdam (westorientiert) - ohne Fenster	144
Abbildung 50:	Raumtemperaturen der wärmsten Woche - früher (links) und zukünftig (rechts) - Wohnzimmer mit MIN-Maßnahmenpaket (westorientiert)	146
Abbildung 51:	Raumtemperaturen der wärmsten Woche - früher (links) und zukünftig (rechts) - Büro Lochfassade mit MIN-Maßnahmenpaket (westorientiert).....	147
Abbildung 52:	Überschreitungshäufigkeit der Kategorie II nach DIN EN 16798-1 für das MAX-Maßnahmenpaket und TRY2045x (westorientiert)	148
Abbildung 53:	Übertemperaturgradstunden Wohn- und Kinderzimmer für Potsdam, STD-Maßnahmenpaket und TRY2045	150
Abbildung 54:	Übertemperaturgradstunden 3-Personen-Eckbüro mit Vollverglasung (südwestorientiert)	151
Abbildung 55:	Durchschnittlicher Tag-Luftwechsel	155
Abbildung 56:	Häufigkeitsverteilung Tag-Luftwechsel	156
Abbildung 57:	Luftwechsel und Außentemperatur beim Tag-Luftwechsel...	157
Abbildung 58:	Übertemperaturgradstunden der Taglüftungsvarianten	158
Abbildung 59:	Durchschnittlicher Nacht-Luftwechsel	159
Abbildung 60:	Häufigkeitsverteilung Nacht-Luftwechsel	160
Abbildung 61:	Übertemperaturgradstunden der Nachtlüftungsvarianten ...	161
Abbildung 62:	Übertemperaturgradstunden der Sonnenschutzvarianten....	161
Abbildung 63:	Übertemperaturgradstunden der Internen-Last-Varianten...	162
Abbildung 64:	Einfluss des Nutzungsverhaltens auf die Übertemperaturgradstunden (Potsdam, TRY2045)	163
Abbildung 65:	Klimawandel extrem - Übertemperaturgradstunden Wohnen	165
Abbildung 66:	Klimawandel extrem – Übertemperaturgradstunden Büro ...	166
Abbildung 67:	Klimawandel extrem – Übertemperaturgradstunden Schule	167
Abbildung 68:	Urbaner Wärmeinsel-Effekt -Übertemperaturgradstunden Wohnen	168
Abbildung 69:	Energiestandards im Vergleich - Übertemperaturgradstunden Wohnen	170
Abbildung 70:	Energiestandards im Vergleich - Übertemperaturgradstunden Büro	171

Abbildung 71:	Energiestandard im Vergleich - Übertemperaturgradstunden Klassenzimmer.....	172
Abbildung 72:	Energiestandards unter Berücksichtigung Infiltration - Übertemperaturgradstunden Wohnen.....	174
Abbildung 73:	Energiestandards unter Berücksichtigung Infiltration - Übertemperaturgradstunden Büro	175
Abbildung 74:	Energiestandards unter Berücksichtigung Infiltration- Übertemperaturgradstunden Klassenzimmer.....	176
Abbildung 75:	Bauweisen im Vergleich - Übertemperaturgradstunden Wohnen	178
Abbildung 76:	Bauweisen im Vergleich - Übertemperaturgradstunden Büro	179
Abbildung 77:	Bauweisen im Vergleich - Übertemperaturgradstunden Klassenzimmer.....	180
Abbildung 78:	Lage innerhalb des Gebäudes - Übertemperaturgradstunden Wohnen	182
Abbildung 79:	Materialität des Dachs - Übertemperaturgradstunden Wohnen	183
Abbildung 80:	Nutzung während der Schulferien - Übertemperaturgradstunden Klassenzimmer.....	186
Abbildung 81:	Öffenbare Fenster - Übertemperaturgradstunden Klassenzimmer.....	187
Abbildung 82:	Einfluss des Nutzungsverhaltens – Übertemperaturgradstunden Wohnzimmer.....	188
Abbildung 83:	Erforderliche Luftgeschwindigkeit zum Ausgleich einer Temperaturerhöhung nach DIN EN ISO 7730.....	191
Abbildung 84:	Auswirkung der Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von 0,1 auf 1,0 m/s auf den PMV für eine exemplarische Sommer-Woche (am Beispiel Wohnzimmer West – Potsdam TRY2045 mit MIN-Maßnahmenpaket).....	192
Abbildung 85:	Beispielhafte Temperatur-Feuchte-Auswertung eines Simulationsergebnisses mit eingezeichneten Grenzen für Kategorie II und III der DIN EN 16798-1 (Kühlperiode)	195
Abbildung 86:	Vergleich Übertemperaturgradstunden nach NA und DIN 4108-2 (Wohnzimmer mit Westorientierung).....	197
Abbildung 87:	Vergleich Übertemperaturgradstunden nach NA und DIN 4108-2 (Büro mit Westorientierung)	198
Abbildung 88:	Energiebedarfsanalyse – westorientiertes Büro (TRY2045)...	203
Abbildung 89:	Endenergiebedarf bei STD-Maßnahmenpaket - westorientiertes Büro (TRY2045)	204
Abbildung 90:	Endenergiebedarf für die Varianten Fensterband mit Standort Potsdam – westorientiertes Büro (TRY2045)	205

Abbildung 91:	Endenergiebedarf von Einzelmaßnahmen bei Fensterband und Standort Potsdam – westorientiertes Büro (TRY2045)	206
Abbildung 92:	Endenergiebedarf mit PV für die MIN- und KKM-Variante – westorientiertes Büro (TRY2045)	208
Abbildung 93:	Stromlastgang und PV-Erzeugung – Büro in Winterwoche	209
Abbildung 94:	Stromlastgang und PV-Erzeugung - Büro in Sommerwoche ..	209
Abbildung 95:	Energiebedarfsanalyse – westorientiertes Klassenzimmer (TRY2045)	210
Abbildung 96:	Endenergiebedarf bei STD-Maßnahmenpaket - westorientiertes Klassenzimmer (TRY2045).....	211
Abbildung 97:	Endenergiebedarf für die Fensterband-Varianten mit Standort Potsdam – westorientiertes Klassenzimmer (TRY2045).....	212
Abbildung 98:	Endenergiebedarf für die Fensterband-Varianten mit Standort Potsdam –westorientiertes Klassenzimmer (TRY2045).....	213
Abbildung 99:	Endenergiebedarf mit PV für die MIN- und KKM-Variante – westorientiertes Klassenzimmer (TRY2045).....	214
Abbildung 100:	Wirtschaftlichkeit - westorientiertes Büro (TRY2045).....	226
Abbildung 101:	Wirtschaftlichkeit - westorientiertes Klassenzimmer (TRY2045)	227
Abbildung 102:	Wirtschaftlichkeit für die Fensterband-Varianten mit Standort Potsdam – westorientiertes Büro (TRY2045)	228
Abbildung 103:	Wirtschaftlichkeit – Klassenzimmer mit Fensterband TRY2045 (Potsdam)	229
Abbildung 104:	Verhältnis von Wirksamkeit zu Treibhauspotential – Sonnenschutzmaßnahmen im 2-Personen-Büroraum	234
Abbildung 105:	Verhältnis von Wirksamkeit zu Treibhauspotential – Nachtlüftungsmaßnahmen im 2-Personen-Büroraum.....	235
Abbildung 106:	Verhältnis von Wirksamkeit zu Treibhauspotential – Passive Kühlung im 2-Personen-Büroraum.....	236
Abbildung 107:	Einfluss verschiedener Parameter auf die Überhitzung - Wohnzimmer	236
Abbildung 108:	Einfluss verschiedener Parameter auf die Überhitzung - Büroraum.....	238
Abbildung 109:	Einfluss verschiedener Parameter auf die Überhitzung - Klassenzimmer.....	239
Abbildung 110:	Methodenvergleich - Bewertungsmethoden und zugehörige Kenngrößen	264
Abbildung 111:	Methodenvergleich - Variantenauswahl	265

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht Parameterstudie	23
Tabelle 2:	Raummodelle für Wohn- und Bürogebäude sowie Schule	24
Tabelle 3:	Maßnahmenpakete	25
Tabelle 4:	Overview parametric study	38
Tabelle 5:	Room models for the residential and office buildings and school.....	39
Tabelle 6:	Packages of measurements.....	40
Tabelle 7:	Anzahl der Sommertage	54
Tabelle 8:	Sonnenschutz – Beispiele für Abminderungsfaktoren	61
Tabelle 9:	Kategorien für die Innenraumqualität nach DIN EN 16798-1 ..	68
Tabelle 10:	Sommerlicher Wärmeschutz - Wichtige Normen und Richtlinien	72
Tabelle 11:	Bewertung der mit PHPP berechneten Übertemperaturhäufigkeit	80
Tabelle 12:	Randbedingungen der Varianten MIN, STD und MAX	89
Tabelle 13:	Ergebniswerte der untersuchten Varianten für ausgewählte Auswertegrößen	91
Tabelle 14:	Stärken und Schwächen der untersuchten Auswertegrößen ..	93
Tabelle 15:	Anforderungswerte für die Auswertung dynamisch- thermischer Simulationen	97
Tabelle 16:	Anforderungswerte für die Auswertung der dynamisch- thermischer Simulationen der vorliegenden Studie	98
Tabelle 17:	Fachliteraturauswertung	111
Tabelle 18:	Raummodelle Wohnen.....	115
Tabelle 19:	Raummodelle Büro.....	116
Tabelle 20:	Raummodelle Klassenzimmer	116
Tabelle 21:	Standorte für Basis- und Detailuntersuchung	119
Tabelle 22:	Zur Verfügung stehende Klimadaten und Wetterdaten	120
Tabelle 23:	Ausgewählte Klimadaten.....	122
Tabelle 24:	Kennwerte der ausgewählten Klimadaten	122
Tabelle 25:	Maßnahmenpakete	123
Tabelle 26:	Energiestandard	124
Tabelle 27:	Bauweise.....	124
Tabelle 28:	Übersicht Parameterstudie	125
Tabelle 29:	Randbedingungen - Wohnräume	126
Tabelle 30:	Randbedingungen - Büroräume	127
Tabelle 31:	Randbedingungen - Klassenzimmer	128
Tabelle 32:	Randbedingungen - Energiestandards	169
Tabelle 33:	Randbedingungen - Bauweise	177
Tabelle 34:	Randbedingungen – Lage innerhalb des Gebäudes	181
Tabelle 35:	Wechselwirkung zwischen Nachtlüftung und aktiver Kühlung – Bürraum.....	185

Tabelle 36:	Variantenmatrix zur Energiebedarfsauswertung	200
Tabelle 37:	Randbedingungen Energiebedarfsanalyse	202
Tabelle 38:	Übersicht Randbedingungen und Strombedarf der Nachtlüftung (Büro Fensterband, Potsdam TRY2045)	215
Tabelle 39:	Spezifischer Strombedarf für die mechanische Nachtlüftung bei verschiedenen Energieeffizienzmaßnahmen (Büro Fensterband, Potsdam TRY2045)	216
Tabelle 40:	Übersicht über berücksichtigte Komponenten	220
Tabelle 41:	Angesetzte Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	221
Tabelle 42:	Angesetzte Kosten baulicher Komponenten	222
Tabelle 43:	Angesetzte Kosten der RLT-Komponenten.....	223
Tabelle 44:	Angesetzte Kosten der KKM-Komponenten.....	224
Tabelle 45:	Angesetzte Gebäuderandbedingungen für Anlagendimensionierung.....	224
Tabelle 46:	Rechnerische Nutzungsdauer und jährliche Aufwände	225
Tabelle 47:	Untersuchte Bewertungsmethoden.....	265
Tabelle 48:	Vergleich der spezifischen Kühllast nach VDI 2078 und angewandeter simulativer Methodik.....	268
Tabelle 49:	Methodenvergleich - Ergebnisse Wohngebäude (Wohnzimmer West)	269
Tabelle 50:	Methodenvergleich - Ergebnisse Wohngebäude (Eck- Wohnzimmer, Süd-West)	270
Tabelle 51:	Methodenvergleich - Ergebnisse Bürogebäude (2-Personen- Büroraum, West)	271
Tabelle 52:	Methodenvergleich - Ergebnisse Bürogebäude (Eck - 3- Personen-Büroraum, Süd-West)	272
Tabelle 53:	Methodenvergleich - Ergebnisse Schule (Klassenzimmer, West)	273
Tabelle 54:	Methodenvergleich - Orientierung und Verschattung.....	274
Tabelle 55:	Methodenvergleich - Passive Kühlung	275
Tabelle 56:	Methodenvergleich - Einschätzung	278
Tabelle 57:	Methodenvergleich – Stärken und Schwächen.....	279
Tabelle 58:	Einschätzung des technischen und finanziellen Aufwands von passiven Maßnahmen	289

Abkürzungsverzeichnis

AD	Adiabatik
ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten
BBR	Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BT-Drs.	Bundestagsdrucksache
CDD	Cooling Design Day
CDP	Cooling Design Period
clo	Bekleidungseinheit (z.B. 0,5 clo im Sommer, 1,0 clo im Winter)
C_{wirk}/A_G	auf Nettoraumfläche bezogene wirksame Wärmekapazität
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DWD	Deutscher Wetterdienst
EG40	Effizienzgebäude nach KfW 40-Standard (Nichtwohngebäude)
EH40	Effizienzhaus nach KfW 40-Standard (Wohngebäude)
EnEG	Energieeinsparungsgesetz
EnWZ	Zeitschrift für das gesamte Recht der Energiewirtschaft
FBH	Fußbodenheizung
F_c	Abminderungsfaktor der Sonnenschutzvorrichtung
FFA	Fassadenbezogener Fensterflächenanteil
f_{wG}	Grundflächenbezogener Fensterflächenanteil
GEG	Gebäudeenergiegesetz
g-Wert	Gesamtenergiedurchlass der Verglasung
GWP	Global Warming Potential
IBH	Ingenieurbüro Hausladen GmbH (Autor)
IEQcat	Kategorie des Innenraumklimas (von engl. indoor environmental quality category)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
IDA ICE	IDA Indoor Climate and Energy – Simulationssoftware zur thermischen Gebäudesimulation
KKM	Kompressionskältemaschine
met	Stoffwechselrate (von engl. metabolic rate)
NA	Nationaler Anhang zur DIN EN 16798-1
NRF	Nettoraumfläche
NWG	Nichtwohngebäude
PHPP	Passivhaus-Projektierungspaket
PMV	Vorausgesagtes mittleres Votum (von engl. predicted mean vote)

PPD	Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (von engl. predicted percentage of dissatisfied)
RCP	Repräsentative Treibhausgas-Konzentrationspfade
RLT	Raumlufthtechnische Anlage (Lüftungsanlage)
Rn.	Randnummer
SEER	Energieeffizienz-Verhältnis im Jahresdurchschnitt (von engl. seasonal energy efficiency ratio)
SSV	Sonnenschutzverglasung
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TRY	engl. für Test Reference Years: Testreferenzjahre (TRJ)
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
ÜTGS	Übertemperaturgradstunden
WP	Wärmepumpe
WSV	Wärmeschutzverglasung

Hinweise:

- Abkürzungen für Methoden und Varianten sind im Kürzel-Verzeichnis Kapitel 4.4.1.
- Auf das Aufführen aller in Kapitel 6 verwendeten juristisch gebräuchlichen Abkürzungen wird verzichtet.

Zusammenfassung

Einleitung

Der Klimawandel mit steigenden Außenlufttemperaturen wirkt sich auch auf Gebäude aus. Innenräume werden daher vermehrt von Überhitzung betroffen sein. Negative Folgen hat dies auf das Behaglichkeitsempfinden, aber auch auf gesundheitliche Aspekte. Als Gegenmaßnahme Klimaanlagen einzusetzen, führt aufgrund des Strombedarfs der Geräte zu steigenden Klimagasemissionen und hat somit einen noch verstärkenden Effekt auf den Klimawandel. Die Entwicklung von Strategien zur Vermeidung von Überhitzung in Innenräumen und von ansteigendem Kühlenergiebedarf ist deshalb von immenser Bedeutung.

Zielstellung

Im Rahmen der vorliegenden Studie sollen daher Erkenntnisse zu den Klima-Auswirkungen auf die Raumtemperaturen und zur Sensitivität einzelner Parameter auf die sich einstellenden Raumtemperaturen gewonnen werden. Mit Hilfe von unterschiedlichen Maßnahmenpaketen sollen die Wirksamkeit und die Grenzen passiver Maßnahmen bewertet und der technische und finanzielle Aufwand von passiven Maßnahmen eingeschätzt werden. Da die Auswirkungen des Klimawandels Neubauten wie Bestandsgebäude treffen, sollen neben Neubauten auch teil- und unsanierte Bestandsgebäude einbezogen werden. Hintergrund ist zum Beispiel eine Abwägung, ob Bestandsgebäude – gegebenenfalls auch nur im Sanierungsfall – zukünftig auch einer Nachweispflicht zum sommerlichen Wärmeschutz unterliegen sollten oder nicht.

In der planerischen Praxis ist die Erstellung eines Konzepts für den sommerlichen Wärmeschutz oft komplex. Dies hängt mit der Vielzahl von Einflussgrößen, aber auch mit Einschränkungen durch architektonische und gebäudetechnische Vorgaben zusammen. Gleichzeitig fehlen leicht anzuwendende Werkzeuge zur Analyse von geeigneten Maßnahmenkombinationen unter Berücksichtigung der ansteigenden Außenlufttemperaturen. Aus diesem Grund sollen Methoden für die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes verglichen und deren jeweilige Vor- und Nachteile herausgearbeitet werden.

Was das Wirtschaftlichkeitsgebot für den sommerlichen Wärmeschutz eigentlich bedeutet, soll in einer rechtsgutachterlichen Stellungnahme beleuchtet werden. Hintergrund ist, dass es ohne Kühlung keine Amortisation für passive Maßnahmen geben kann, weil es keine Kühlenergieeinsparung gibt.

Letztlich soll die vorhandene Wissensgrundlage zum sommerlichen Wärmeschutz verständlich beschrieben werden und das Wissen, wie Gebäude mit zukünftigen Klimadaten möglichst gut vor Überhitzung geschützt werden, erweitert werden.

Hintergrund Klimawandel und Grundlagen (Kapitel 3)

Der Klimawandel ist auch in Deutschland schon anhand zunehmender Jahresmitteltemperaturen und ansteigender Anzahl von Sommertagen zu erkennen. Bei der Betrachtung der komplexen Thematik der Klimaprognosen zeigt sich, dass in Abhängigkeit des Klimaszenarios (z.B. RCP 2.6 oder RCP 8.5) mit mehr oder weniger stark ansteigenden Temperaturen gerechnet werden muss. Neben den starken regionalen klimatischen Unterschieden in Deutschland sind auch die prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels regional verschieden stark ausgeprägt. Für die Bereitstellung von Klimadaten werden Wetterdaten über einen längeren Zeitraum (z.B. 30 Jahre) ausgewertet, wodurch kurzzeitige Witterungsschwankungen eliminiert werden können. Mit dieser Methodik wird aber die in den letzten Dekaden angestiegene Temperatur für die Beschreibung unseres jetzigen Klimas unterbewertet.

Um für thermische Simulationen zur Verfügung stehende Klimadaten für dieses Forschungsprojekt besser einschätzen zu können, werden Stundenmittelwerte von Testreferenzjahren für drei Beispielorte hinsichtlich Mitteltemperatur im Sommerhalbjahr, Anzahl von Sommer- und Hitzetagen und weiteren Kenngrößen analysiert und mit Wetterdaten der Jahre 2011 bis 2022 verglichen. Einbezogene Testreferenzjahre sind aus dem 2017-Klimadatensatz (DWD 2020b) die Testreferenzjahre 2015 (Normaljahr TRY2015 und sommer-fokussiertes extrem warmes Gegenwartsjahr TRY2015x), die auf Messdaten des Zeitraums 1995-2012 basieren, und die Testreferenzjahre 2045 (Zukunftsjahr TRY2045 und sommer-fokussiertes extrem warmes Zukunftsjahr TRY2045x), die auf Basis regionaler Klimamodelle nach RCP4.5 und RCP8.5 für den Zeitraum 2031 bis 2060 erstellt wurden. Die Kenngrößen, welche die Sommer-Außenlufttemperatur charakterisieren, zeigen bis auf wenige Ausnahmen einen ansteigenden Trend vom TRY2015 zum sommerfokussierten TRY2015x weiter zum TRY2045 bis hin zum sommerfokussierten TRY2045x sowie von unbewohnter Gegend über Vorortlage bis zu Innenstadtbereichen. Diese Trends sind plausibel. Im Vergleich zu den gemittelten DWD-Wetterdaten der letzten 10 Jahre deuten die ausgewerteten Kenngrößen darauf hin, dass die TRY2015 das aktuelle Klima nicht mehr repräsentiert. Auch die zukünftigen TRY2045 lassen die Vermutung zu, dass sie die weiter zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels (Temperaturanstieg, Zunahme an Hitzetagen und tropischen Nächten) möglicherweise unterschätzen, da diese in vielen Fällen schon von den Mittelwerten der letzten Dekade übertroffen werden. Messungen von sommerlichen Wohnraumtemperaturen zeigen schon heute einen starken Temperaturanstieg im Vergleich zu früheren Jahren. Einflussgrößen auf die Raumtemperaturen werden beschrieben. Zu möglichen Maßnahmen gegen Überhitzung zählen ein geringer Fensterflächenanteil, Sonnenschutz, Sonnenschutzverglasung, Nachtlüftung und passive Kühlung. Begrünung und städtebaulicher Kontext können helfen, die Außentemperatur abzusenken, was sich wiederum auf das Raumklima auswirkt.

Wichtige Normen im Zusammenhang mit dem sommerlichen Wärmeschutz sind § 14 „Sommerlicher Wärmeschutz“ des Gebäudeenergiegesetzes und Kapitel 8 der DIN 4108-2: 2013-02. Die Vorschriften bezüglich eines zu gewährleistenden sommerlichen Wärmeschutzes gelten nur für Neubauten und Erweiterungsbauten, sofern diese größer als 50 m² sind, jedoch nicht für Bestandsgebäude. Wichtig für die Bestimmung von thermischer Behaglichkeit sind ferner die DIN EN ISO 7730 (Berechnung des predicted mean vote „PMV“ und des predicted percentage of dissatisfied „PPD“) und die DIN EN 16798-1:2022-03 für die Komfortbewertung von Räumen. Die DIN EN 16798-1 hat – mit dem Hinweis auf die Erwartungshaltung – unterschiedliche Komfortbänder für gekühlte und ungekühlte Gebäude. Ferner enthält sie einen Nationalen Anhang, der den Bereich des behaglichen Innenraumklimas auf eigene Weise festlegt.

Um eine geeignete Auswertegröße für die thermischen Simulationen dieser Studie festzulegen, werden Vor- und Nachteile der in den Normen beschriebenen Verfahren analysiert: eine leicht verständliche Größe wie die Übertemperaturhäufigkeit bezogen auf eine Temperaturgrenze scheint in Zeiten des Klimawandels zu ungenau, da die menschliche Adaption an die Umgebungstemperatur nicht einfließt. Eine gängige Auswertegröße sind die Übertemperaturgradstunden wie sie für den Nachweis nach DIN 4108-2 bei thermischen Simulationen zu ermitteln sind. Allerdings sind die starren von der Sommerklimaregion abhängigen Bezugstemperaturen für eine Bewertung von „freien“ Simulationen, die den Klimawandel berücksichtigen sollen, zu unscharf. Eine Auswertung nach einem Komfortband, das Bezug nimmt auf die Außenlufttemperatur, weist diesen Nachteil nicht auf. Hier käme das adaptive Komfortmodell für ungekühlte Gebäude der DIN EN 16798-1 in Frage – allerdings wird nach dieser Norm die Übertemperaturhäufigkeit ausgewertet, die wiederum durch die fehlende Berücksichtigung der Höhe der Überschreitung weniger genau ist. Die Auswertung nach Nationalem Anhang (NA) der DIN EN 16798-1:2022-03 erfolgt über Übertemperaturgradstunden und auf Basis eines Komfortbands, das sich

auf den Stundenmittelwert der Außentemperatur bezieht und für gekühlte und ungekühlte Gebäude gilt. Das NA-Komfortband ist im mittleren Außentemperaturbereich (zwischen 16 und 32 °C) adaptiv, oberhalb dieses Bereichs wird die maximale Komfort-Raumtemperatur bei 28 °C konstant gehalten, unterhalb auf maximal 24 °C. Nachteilig an der Auswertung nach DIN EN 16798-1 NA ist, dass sie derzeit noch in keiner Methode (Nachweismethode, Bewertungsmethode) Anwendung findet. Die unterschiedlichen Komfortbänder, Bezugstemperaturen und Auswertegrößen haben demnach jeweils Vor- und Nachteile. Nach Abwägung wurde das Komfortband der DIN EN 16798-1 NA als Auswertegröße im Rahmen dieser Studie festgelegt.

Die nächste Frage bei der Auswertung betrifft den Anforderungswert. Gewisse Überschreitungen der Bezugs- bzw. Komfortraumtemperatur lassen alle Methoden zu. Dieser liegt beispielsweise nach DIN 4108-2 bei 1.200 Kh/a (Wohngebäude) bzw. bei 500 Kh/a (Nichtwohngebäuden) oder für eine Auswertung des thermischen Komforts im Rahmen einer DGNB-Gebäudezertifizierung bei 3 % Abweichungshäufigkeit für die höchste Punktzahl. Für die Methodik nach Nationalem Anhang (DIN EN 16798-1 NA) ist Kategorie II für das Innenraumklima hinsichtlich sommerlichen Wärmeschutzes erfüllt, wenn in weniger als 1 % der Nutzungszeit die obere Grenze des Komfortbands um maximal 2 K überschritten wird. Eine Auswertung zeigt, dass der zulässige Anforderungswert nach Nationalem Anhang im Vergleich zu den anderen sehr niedrig angesetzt ist (vermutlich, weil er primär für gekühlte Gebäude gedacht ist). Daher eignet sich dieser für die Zielstellung dieser Studie mit rein passiven Maßnahmen nicht. Der Anforderungswert für diese Studie wird zwar wie beim Nationalen Anhang als prozentuale, auf die Nutzungszeit bezogene zulässige Überschreitung angegeben, die zulässige Höhe orientiert sich aber am Anforderungswert der DIN 4108-2:2013-02. Auf diese Weise ergibt sich ein Anforderungswert für die Übertemperaturgradstunden als Abweichung um 2 K während 7 % der Nutzungszeit (Wohngebäude) bzw. 9 % der Nutzungszeit (Nichtwohngebäude).

Vorgehensweise Parameterstudie (Kapitel 4)




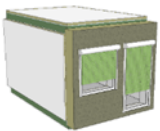



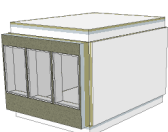
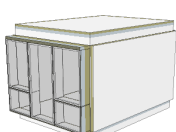
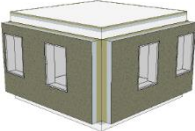
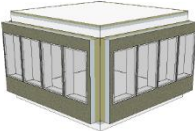
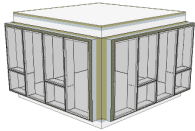
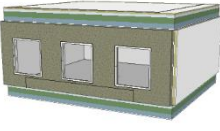
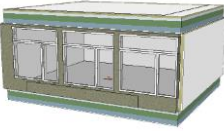
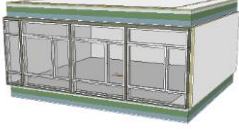
Kernstück dieser Forschungsarbeit ist eine Parameterstudie auf Basis von thermisch-dynamischen Simulationen von Musterräumen. Sie ist untergliedert in eine Basis- und eine Detailuntersuchung. Für die Basisuntersuchung wird eine Variantenmatrix aufgestellt und es werden alle Kombinationsmöglichkeiten simuliert. Bei der Detailuntersuchung werden einzelne Parameter basierend auf ausgewählten Vergleichsvarianten der Basisuntersuchung betrachtet. Die Variantenmatrix der Basisuntersuchung und der Untersuchungsgegenstand der Detailuntersuchung sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Übersicht Parameterstudie

Parameter						nutzungsspezifisch				
Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmen (-pakete)	Energie-standard		Raum	Bauweise	Fassade	
Basisuntersuchung	Mannheim (Vorort)	TRY2010	Nord	Minimum	Neubau (GEG)	Wohnen	Wohnzimmer	schwer	Lochfassade	
			Süd				Eck-Wohnz. Kinderzimmer Eck-Kinderz.			
	Potsdam (Vorort)	TRY2045	West	Standard		Büro	2-P-Büroraum	leicht	Lochfassade Fensterband Vollverglasung	
			Ost				3-P-Büroeckraum			
	Rostock (Vorort)	WD2018	Süd-West	Maximum		Schule	Klassenzimmer	mittel	Lochfassade Fensterband Vollverglasung	
			Nord-Ost							
	TRY2045x									
	Varierte Parameter									
Detailuntersuchung	Mannheim (unbewohnt / innerstädtisch)	Meteo2050 _8.5x			teil-saniierter Bestand	Wohnen		leicht		Nutzerverhalten
						mittel		Lage im Gebäude		
	Potsdam (unbewohnt / innerstädtisch)				KfW 40	Büro		mittel		Wechselwirkung mit aktiver Kühlung
						schwer				
	Rostock (unbewohnt / innerstädtisch)					Schule		leicht		Randbedingungen
							schwer			

Für die Durchführung der Simulationen werden typische Modellräume für die Nutzungstypen Wohnen, Büro und Schule entworfen: ein Wohnzimmer, ein Kinderzimmer (jeweils auch mit Ecksituation), ein 2-Personen-Büroraum, ein 3-Personen-Büro-Eckraum und ein Klassenzimmer. Die Büroräume und das Klassenzimmer werden jeweils für drei Fassadentypen (Lochfassade, Fensterband und Vollverglasung) variiert. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die Raummodelle und deren grundflächenbezogene Fensterflächenanteile f_{WG} .

Tabelle 2: Raummodelle für Wohn- und Bürogebäude sowie Schule

Wohnen	Wohnzimmer	Eck-Wohnzimmer	Eck-Wohnzimmer
			
f _{WG}	21 %	21 %	39 %
Wohnen	Kinderzimmer	Eck-Kinderzimmer	Eck-Kinderzimmer
			
f _{WG}	28 %	28 %	66 %
Büro (2 Personen)	Lochfassade	Fensterband	Vollverglasung
			
f _{WG}	20 %	34 %	54 %
Eck-Büro (3 Personen)	Lochfassade	Fensterband	Vollverglasung
			
f _{WG}	30 %	67 %	104 %
Schule	Lochfassade	Fensterband	Vollverglasung
			
f _{WG}	13 %	28 %	38 %

Variiert werden auch die passiven Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz in Form von Maßnahmenpaketen. Beim MIN-Maßnahmenpaket gibt es wenig Vorkehrung, beim STD-Paket ein normales Maß an Vorkehrung und beim MAX-Maßnahmenpaket viel Vorsorge gegen Überhitzung. Wie die Maßnahmenpakete umgesetzt werden, ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Maßnahmenpakete

Maßnahmenpaket	Bauliche Maßnahme	Passive Kühlung
MIN Wohnen	-	Erhöhte Nachtlüftung
STD Wohnen	Rollladen	Erhöhte Nachtlüftung
MAX Wohnen	Screen	Hohe Nachtlüftung
MIN Büro	Jalousie	-
STD Büro	Jalousie	Erhöhte Nachtlüftung
MAX Büro	Jalousie + Sonnenschutzglas	Adiabate Kühlung + erhöhte Nachtlüftung
MIN Schule	Jalousie	-
STD Schule	Jalousie	Erhöhte Nachtlüftung
MAX Schule	Jalousie+ Sonnenschutzglas	Adiabate Kühlung + erhöhte Nachtlüftung

Wichtiger Simulationsinput, um derzeitiges und zukünftiges Wetter im Klimawandel abbilden zu können, sind die Klimadaten. Verwendet werden von den aktuellen, ortsgenauen Testreferenzjahren (DWD 2020b) die Zukunftstestreferenzjahre Normaljahr TRY2045 und das sommerfokussierte Jahr (mit extrem warmem Sommer) TRY2045x und als Vergleichsbasis das Normaljahr des Testreferenzjahres 2011, auf das die DIN 4108-2:2013-02 Bezugnimmt. Um klimatische Unterschiede in Deutschland abzubilden, werden beziehungsweise auf die Klimaregionen A, B und C der DIN 4108-2:2013-02 die Städte Rostock (kühles Klima), Potsdam (durchschnittliches Klima) und Mannheim (warmes Klima) als Standorte ausgewählt. Die Testreferenzjahre werden zusätzlich durch für die Simulation aufbereitete Wetterdaten des extrem warmen Sommers 2018 von Wetterstationen in Rostock-Warnemünde, Potsdam und Mannheim (DWD 2021b) ergänzt.

Auswertungsgrößen für die Parameterstudie sind auf Basis des Komfortbands des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 ausgewertete Übertemperaturgradstunden. Für die Anforderungswerte der Studie ergeben sich, auf die angesetzte Nutzungszeit bezogen, zulässige Übertemperaturgradstunden kleiner gleich 1.226 Kh/a für Wohnräume, kleiner gleich 517 Kh/a für Büroräume und kleiner gleich 217 Kh/a für Klassenzimmer. Zusätzlich erfolgt eine Auswertung der sich einstellenden Raumtemperaturen. Im Rahmen dieser Studie wird verkürzt von Raumtemperaturen gesprochen, ermittelt werden die operativen Raumtemperaturen. Die operative Raumtemperatur entspricht dem menschlichen Temperaturempfinden und bezieht die Oberflächen-temperaturen der Umschließungsflächen des Raums ein.

Ergebnisse Basisuntersuchung (Kapitel 5.1)

Für die erste Analyse wird zunächst das Merkmal „Anforderungswert eingehalten“ ausgewertet und, aufgegliedert nach verschiedenen Parametern, die jeweilige prozentuale Einhaltung des Anforderungswertes für alle Simulationen ermittelt. Bei allen untersuchten Nutzungstypen hat das Maßnahmenpaket den größten Einfluss. Beim Wohn- und Büroraum ist der zweitwichtigste

Parameter der Fassadentyp, der den grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil bestimmt, beim Klassenzimmer der Standort. Auch die Klimadaten und die Orientierung zeigen sich als wichtige Einflussfaktoren, allerdings weniger ausgeprägt.

Die Basisuntersuchung wird ergänzt durch eine anschauliche Auswertung der sich einstellenden Raumtemperatur bei Westorientierung, gegliedert in die vier Bereiche „kleiner 25° C“; „25° C bis kleiner 27 °C“, „27° C bis kleiner 30 °C“ und „größer gleich 30 °C“. Der Unterschied zwischen den Maßnahmenpaketen ist auf diese Weise deutlich zu erkennen, aber auch die Standortabhängigkeit. Mit dem MIN-Maßnahmenpaket sind Raumtemperaturen über 30° nicht zu verhindern.

Schließlich werden Hypothesen aufgestellt und auf Basis der Simulationsergebnisse überprüft. Für den gewählten Untersuchungsrahmen lassen sich u. a. folgende Aussagen ableiten:

- ▶ Bei nur wenig Vorkehrung zum sommerlichen Wärmeschutz (analog dem MIN-Maßnahmenpaket) wird es zukünftig im Sommer unbehaglich hohe Raumtemperaturen geben.
- ▶ Auch in den nächsten Dekaden können passive Maßnahmen in Kombination (analog dem MAX-Maßnahmenpaket) ausreichen, um behagliche Raumtemperaturen zu ermöglichen. Dies gilt jedoch nicht bei hohen grundflächenbezogenen Fensterflächenanteilen.
- ▶ Steigende Außenlufttemperaturen führen zu steigenden Raumtemperaturen. Die Raumbedingungen Luftwechsel, interne Lasten und Speichermassen spielen eine entscheidende Rolle, wie stark sie sich auswirken.

Exkurs Nutzungsverhalten (Kapitel 5.2)

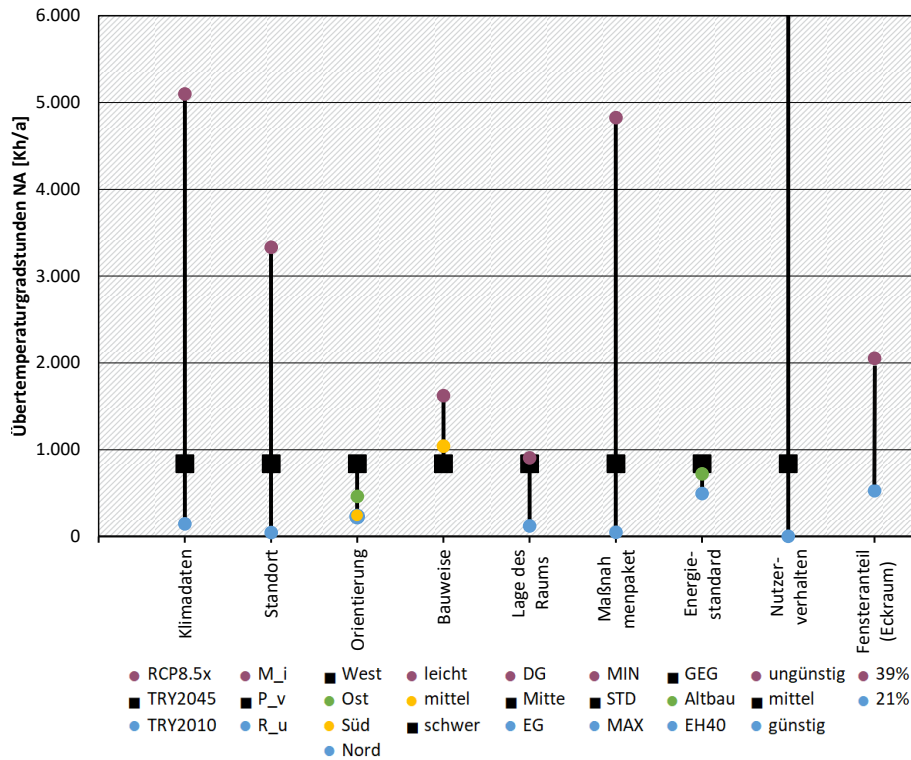
Ein Exkurs zum Nutzungsverhalten zeigt am Beispiel des Muster-Wohnzimmers den bedeutenden Einfluss der Bedienung des Sonnenschutzes, des Lüftungsverhaltens und auch der internen Wärmelasten. Während bei der Parameterstudie die Luftwechsel vorgegeben wurden, sind bei den Simulationen für diesen Exkurs die sich durch Öffnen der Fenster einstellenden Luftwechsel für die Tag- und Nachtlüftung analysiert worden.

Ergebnisse Detailuntersuchung (Kapitel 5.3)

In der Detailuntersuchung werden weitere Parameter wie die Auswirkungen von extremem Klimawandel, des Energiestandards, der Bauweise und der Lage des Raums im Gebäude untersucht. Abbildung 1 zeigt - ausgehend vom „Ausgangsfall“ (Muster-Wohnzimmer, TRY 2045, Standort Potsdam, STD-Maßnahmenpaket und Westorientierung) - die sich für die Übertemperaturgradstunden ergebende Spannweite bei Variation einzelner Parameter. Das schwarze Viereck stellt hierbei immer den Ausgangsfall dar.

Abbildung 1: Einfluss verschiedener Parameter auf die Überhitzung - Wohnzimmer

Ausgangsfall: Muster-Wohnzimmer, TRY 2045, Standort Potsdam, STD-Maßnahmenpaket, Westorientierung



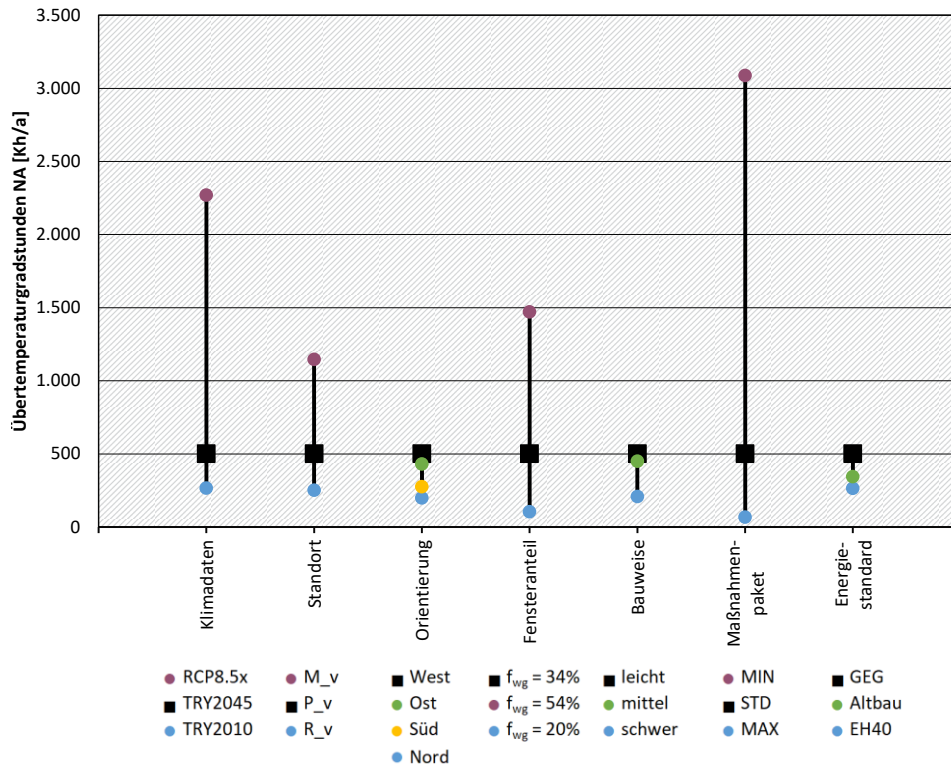
Quelle: eigene Darstellung, IBH

Extrem günstiges (sinnvolles temperaturabhängiges Lüften, weitgehend geschlossener Sonnenschutz bei Überhitzungsgefahr) oder extrem ungünstiges (offener Sonnenschutz, seltene Fensterlüftung) Nutzerverhalten haben den größten Einfluss auf die Übertemperaturgradstunden. Bezieht man einen sich extrem auswirkenden Klimawandel (RCP8.5 2050) mit ein, haben die Klimadaten den zweitgrößten Einfluss, gefolgt von den Maßnahmenpaketen und dem Standort. Der Energiestandard hat den geringsten Einfluss der untersuchten Parameter.

In Abbildung 2 ist dementsprechend die Auswertung für den Büroraum zu sehen. Ausgangsfall ist der 2-Personen-Büroraum mit Fensterband simuliert mit den TRY 2045, Standort Potsdam, STD-Maßnahmenpaket und Westorientierung.

Abbildung 2: Einfluss verschiedener Parameter auf die Überhitzung - Büroraum

Ausgangsfall: Muster- Büroraum mit Fensterband, TRY 2045, Standort Potsdam, STD-Maßnahmenpaket, Westorientierung



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Beim Büroraum zeigt das Maßnahmenpaket den größten Einfluss zur Vermeidung einer Überhitzung, gefolgt von den Klimadaten (mit extremem Klimawandel), dem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil und dem Standort.

Abbildung 3 zeigt das Diagramm für den Klassenraum. Den Ausgangsfall bildet das Muster-Klassenzimmer mit Fensterband, TRY 2045, Standort Potsdam, STD-Maßnahmenpaket und Westorientierung.

- ▶ Mit außenliegendem Sonnenschutz, der Teil des STD-Maßnahmenpakets ist, hat die Orientierung der Fensterflächen nur geringen Einfluss.
- ▶ Der grundflächenbezogene Fensterflächenanteil hat wesentlichen Einfluss auf die Überhitzung. Dieser würde ohne Sonnenschutz noch stärker ins Gewicht fallen.
- ▶ Ob sich eine schwere oder mittlere Bauweise günstig auswirkt, hängt vom Potential Wärme abzuführen (z.B. durch Nachtlüftung) ab. Bei den Maßnahmenpaketen ohne Nachtlüftung (MIN-Maßnahmenpaket Büro und Schule) ist der Einfluss der Bauweise daher gering oder nicht vorhanden.
- ▶ Der Einfluss des Energiestandards ist bei allen Nutzungen gering, obwohl die Variationsbreite von unsaniertem Altbau bis hin zum Effizienzhaus-40-Standard eine sehr große Bandbreite abdeckt. Lediglich bei besonders sonnenexponierten Räumen mit Bauteilen wie Steildächern mit dunklen Außenoberflächen wirkt sich mehr Dämmung merklich positiv aus.

Die Basis- und Detailuntersuchung wird mit einer Diskussion u.a. über die Bedeutung weiterer Einflussfaktoren wie Luftgeschwindigkeit und Raumfeuchte abgeschlossen (Kapitel 5.4): Eine Anhebung der Luftgeschwindigkeit durch Querlüftung oder Ventilatoren erhöht durch die einhergehende stärkere Konvektion und Wärmeabgabe über die Haut das Behaglichkeitsempfinden in zu warmen Räumen. Durch einsetzende Schweißbildung bei sehr hohen Raumtemperaturen nimmt auch die Bedeutung von Verdunstungskühlung auf der Haut zu. Auch die Raumluftfeuchte spielt eine Rolle für das Behaglichkeitsempfinden und ließe sich beispielweise durch eine Auswertung der Stundenanzahl mit mehr als 65 % relativer Feuchte in eine Bewertung von feuchten Standorten einbeziehen.

Energiebedarfsanalyse (Kapitel 5.5)

Aufbauend auf der Basisuntersuchung wird der mit passiven Maßnahmen verbundene Energiebedarf - auch im Vergleich zu einer aktiven Kühlung - für den Büro- und den Klassenraum untersucht. Eine Sonnenschutzverglasung führt zum Anstieg des Heizwärme- und Kunstlichtbedarfs, ähnliche Folgen hat ein kälterer, sonnenscheinärmerer Standort. Ein geringer Fensterflächenanteil führt ebenfalls zu höherem Kunstlichtbedarf, aber zu geringerem Heizwärmebedarf. Diese Verschiebungen beim Energiebedarf sind zwar relevant, aber gering im Vergleich zum Strombedarf für die mechanische Nachtlüftung. Zum Beispiel erhöht sich bei der Variante 2-Personenbüro mit Fensterband mit den Potsdam-Klimadaten TRY2045 der Strombedarf für Kunstlicht aufgrund der Sonnenschutzverglasung um $0,8 \text{ kWh/m}^2$, für eine mechanische Nachtlüftung um $6,2 \text{ kWh/m}^2$. Für denselben Fall liegt der Strombedarf für eine passive Kühlung über Grundwasser bei $1,3 \text{ kWh/m}^2$ und für eine aktive Kühlung bei $4,7 \text{ kWh/m}^2$. Eine anschließende Untersuchung zu möglicher Effizienzsteigerung der mechanischen Nachtlüftung zeigt eine Abhängigkeit von der Konfiguration und der Regelung. Gelingt es die Stromeffizienz beispielsweise durch Reduktion von Druckverlusten deutlich zu verbessern, könnte der Strombedarf für die Nachtlüftung um knapp 20 % gesenkt werden, bei einer energieeffizienteren Regelung um 14 % (bei einem Anstieg der Übertemperaturstunden um 6 %). Nur eine Kombination von derartigen Effizienzmaßnahmen könnte gegebenenfalls zu einem niedrigeren Strombedarf als eine aktive Kühlung führen. Letztere wiese dann jedoch immer noch niedrigere Übertemperaturstunden auf. Anders sieht es bei einer mechanischen Nachtlüftung bei dezentraler Lüftungsanlage aus. Beim untersuchten Fall ergibt sich hier ein Nachtlüftungsstrombedarf von weniger als der Hälfte der aktiven Kühlung. Im Hinblick auf einen energieeffizienten Energie- und Ressourceneinsatz wird klar, dass die Definition von passiver Kühlung auch einen Grenzwert für die Stromeffizienz enthalten muss, der unter dem einer aktiven Kühlung liegt.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Kapitel 5.6)

In einer Lebenszykluskostenberechnung für die MIN-, STD- und MAX-Maßnahmenpakete am Beispiel des Büro- und des Klassenraums schneidet das MIN-Maßnahmenpaket erwartungsgemäß am kostengünstigsten ab. Beim Klassenzimmer liegen danach die Varianten mit STD- und MAX-Maßnahmenpaket und die Vergleichsvariante mit aktiver Kühlung ungefähr gleich auf. Deutlich am teuersten ist die Variante mit automatisch betriebenen Nachtlüftungselementen. Ähnlich sind die Ergebnisse beim Büro, nur liegt hier die Variante mit aktiver Kühlung kostengünstig zwischen dem MIN- und dem STD-Maßnahmenpaket. Da es sich um rein passive Maßnahmenpakete handelt und nicht aktiv gekühlt wird, kommt es zwar zu einer Reduktion von Über-temperaturgradstunden, aber zu keiner (Kühl-)Energieeinsparung. Indirekte Kosten bzw. Einnahmeausfälle, wie beispielsweise aufgrund geringerer Arbeitsproduktivität oder Mietminderung bei unbehaglich hohen Temperaturen werden diskutiert, aber nicht in die Lebenszykluskostenberechnung einbezogen.

Exkurs Ökobilanz (Kapitel 5.7)

Ergänzend wird das Treibhauspotential, das durch passive Maßnahmen bei Herstellung und Entsorgung sowie während der Nutzung (inkl. Hilfsstrombedarf und Einfluss auf Heiz- oder Beleuchtungsenergiebedarf) entsteht, in einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren für einen Büroraum abgeschätzt. Fast alle passiven Maßnahmen haben ein besseres Verhältnis von Wirksamkeit zu Treibhauspotential als die aktive Kühlung im Vergleichsfall und sind damit aus ökologischer Sicht empfehlenswert. Ausnahmen sind die zentralen Nachtlüftungen aufgrund ihres hohen Energiebedarfs.

Zur Bedeutung des Wirtschaftlichkeitsgebots für die Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz (Kapitel 6)

Das Wirtschaftlichkeitsgebot im Gebäudeenergiegesetz (GEG) dient zum einen als Orientierungsleitlinie, die sich der Gesetzgeber für die Festsetzung von Mindestanforderungen selbst auferlegt hat. Zum anderen kann das Wirtschaftlichkeitsgebot im Einzelfall ein Beurteilungsmaßstab sein, wenn nach § 102 GEG eine Befreiung von Anforderungen des Gesetzes beantragt wird. Soweit das Gebäudeenergiegesetz Anforderungen festgelegt hat, kann wegen § 5 GEG davon ausgegangen werden, dass diese grundsätzlich mit dem Wirtschaftlichkeitsgebot vereinbar sind, also eingehalten werden müssen. Auch im Kontext der Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz spiegelt sich diese Doppelrolle wider. Hier greift zum einen im Hintergrund wiederum § 5 GEG. Auf der Ebene der Einzelfallanwendung treten jedoch die Bestimmungen des § 14 GEG an die Stelle von § 102 GEG. Aus § 14 GEG ergibt sich unter Berücksichtigung von § 5 GEG, dass die in § 14 Abs. 2 GEG geforderten baulichen Anforderungen zur Minderung des Sonneneintrags grundsätzlich als wirtschaftlich vertretbar anzusehen sind, also an sich strikt eingehalten werden müssen. Jedoch macht § 14 Abs. 4 GEG hiervon eine unmittelbar im Gesetz geregelte Ausnahme, aus der sich ergibt, dass die Anforderungen des § 14 Abs. 2 GEG im Falle des Einsatzes von Kühlungsanlagen nur eingehalten werden müssen, soweit sich die (zusätzlichen) baulichen Maßnahmen ihrerseits trotz des Einsatzes von Kühlungsanlagen als wirtschaftlich darstellen. Dafür bedarf es anders als bei § 102 GEG keines Befreiungsantrags. Aus § 14 Abs. 4 folgt, dass ein baulicher sommerlicher Wärmeschutz nur noch dann erforderlich ist, wenn er sich trotz Anlagen zur Kühlung als wirtschaftlich erweist. Dies führt praktisch dazu, dass der Vorrang baulicher Maßnahmen vor dem Einsatz von Klimaanlage in sein Gegenteil verkehrt worden ist.

Inhaltlich wirft das Wirtschaftlichkeitsgebot zahlreiche Interpretationsfragen (z.B. "üblichen Nutzungsdauer", bezieht sich die Nutzungsdauer auf das Gebäude oder nur auf einzelne Bauteile). Dem Wirtschaftlichkeitsgebot fehlt zudem die Beschreibung einer Methodik, in der -

spätestens seit Inkrafttreten des Brennstoffemissionshandelsgesetz - ein CO₂-Preis prognostisch zu berücksichtigen wäre.

Verfassungsrechtlich ist das Wirtschaftlichkeitsgebot nicht erforderlich. Im Gegenteil lässt sich aus Art. 20a des Grundgesetzes, der das Klimaschutzgebot beinhaltet, und auch aus dem vom Bundesverfassungsgericht beschriebenen Verfassungsauftrag zu einem wirksamen Klimaschutz die Verfassungswidrigkeit des Wirtschaftlichkeitsgebots ableiten.

Methodenvergleich (Kapitel 7)

Einbezogen in den Vergleich werden das Sonneneintragskennwerteverfahren nach DIN 4108-2, Thermische Simulation nach DIN 4108-2, Komfortbewertungen nach DIN EN 16798-1 und nach Nationalem Anhang der DIN EN 16798-1, das Passivhaus-Projektierungspaket (Sommerfall) und die Bestimmung der Kühllast nach VDI 2078 und Auswertung thermischer Simulationen. Basierend auf ausgewählten Varianten der Basisuntersuchung mit unterschiedlichen Bewertungsmethoden wird überprüft, bei welcher Methode der Anforderungswert eingehalten ist. Insgesamt zeigt sich eine erstaunlich gute Übereinstimmung zwischen DIN 4108-Simulation und Komfortbewertung nach DIN EN 16798-1, insbesondere beim Wohnen und beim Büro. Berechtigterweise ist das Kennwerteverfahren häufiger nicht eingehalten als bei der DIN 4108-Simulation, was vor allem das MIN-Maßnahmenpaket betrifft. Einen umgekehrten Fall gibt es nicht. Nach Nationalem Anhang sind am wenigsten Fälle eingehalten. Wie schon im Grundlagenkapitel zu den Auswertegrößen kritisiert, ist der NA-Anforderungswert für ungekühlte Gebäude zu niedrig angesetzt. Die Höhe der Kühllast zeigt die gleichen Trends in Abhängigkeit des Maßnahmenpakets, des Standorts und des Fensterflächenanteils wie die Komfortbewertungen. Schließlich erfolgt für die Bewertungsmethoden eine qualitative Einschätzung über die Aussagekraft der Ergebnisgröße, die Komplexität des Berechnungsmodus und den Arbeitsaufwand. Die wichtigsten aus dem Methodenvergleich abgeleiteten Vorschläge sind in den Handlungsempfehlungen enthalten.

Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen (Kapitel 8)

Der Klimawandel wird sich zukünftig auch durch steigende Raumtemperaturen im Sommer bemerkbar machen. Wichtige Stellschrauben für angenehme Raumtemperaturen werden auch zukünftig ein moderater grundflächenbezogener Fensterflächenanteil, ein wirksamer, außenliegender Sonnenschutz, Lüften in Abhängigkeit des Kühlpotentials (Kühlpotential besteht, wenn es draußen kühler ist als drinnen) und nicht zuletzt passive Kühlung mit „Umweltkälte“ (z.B. Grundwasser, Erdreich) sein. Die Herausforderungen an das Bauwesen, die steigende Außentemperaturen und Hitzewellen mit sich bringen, sind hoch. Die Auswahl der Maßnahmenkombinationen – denn eine Kombination wird zukünftig erforderlich sein – muss auf Basis einer Abwägung der Ziele Gesundheitsschutz, hohe Energieeffizienz, geringer Ressourceneinsatz, hohe Robustheit und nicht zuletzt der Kosteneffizienz erfolgen. Passive Maßnahmen sind der wichtigste Baustein für Gebäude, die ohne aktive Kühlung funktionieren sollen bzw. für einen geringen Kühlenergiebedarf. Allerdings ist auch bei passiven Maßnahmen auf deren Energiebedarf zu achten (z.B. bei mechanischer Nachtlüftung), welcher deutlich unter einer aktiven Kühlung liegen muss.

Die Nachweispflicht des sommerlichen Wärmeschutzes auf Sanierungen auszuweiten und die Bundesförderung für effiziente Gebäude bezüglich entsprechender Maßnahmen weiter auszubauen, wird als nächster dringend erforderlicher Schritt gesehen. Nötig ist auch eine Vereinheitlichung von Normen, so dass beispielsweise der simulative Nachweis und eine Komfortbewertung mit derselben Auswertegröße erfolgen kann. Komfortbänder und Anforderungswerte sind hierfür auf Basis neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse zu Gesundheitsschutz und Komfortbewertung zu überarbeiten. Zudem wird die Notwendigkeit von regelmäßigen Aktualisierungen

von Klimadaten und den diesbezüglichen Normenbezügen in Zeiten des Klimawandels gesehen. Die Begriffsdefinition von „passiver Kühlung“ in der DIN 4108-2 sollte überarbeitet und um einen Grenzwert für die Stromeffizienz ergänzt werden.

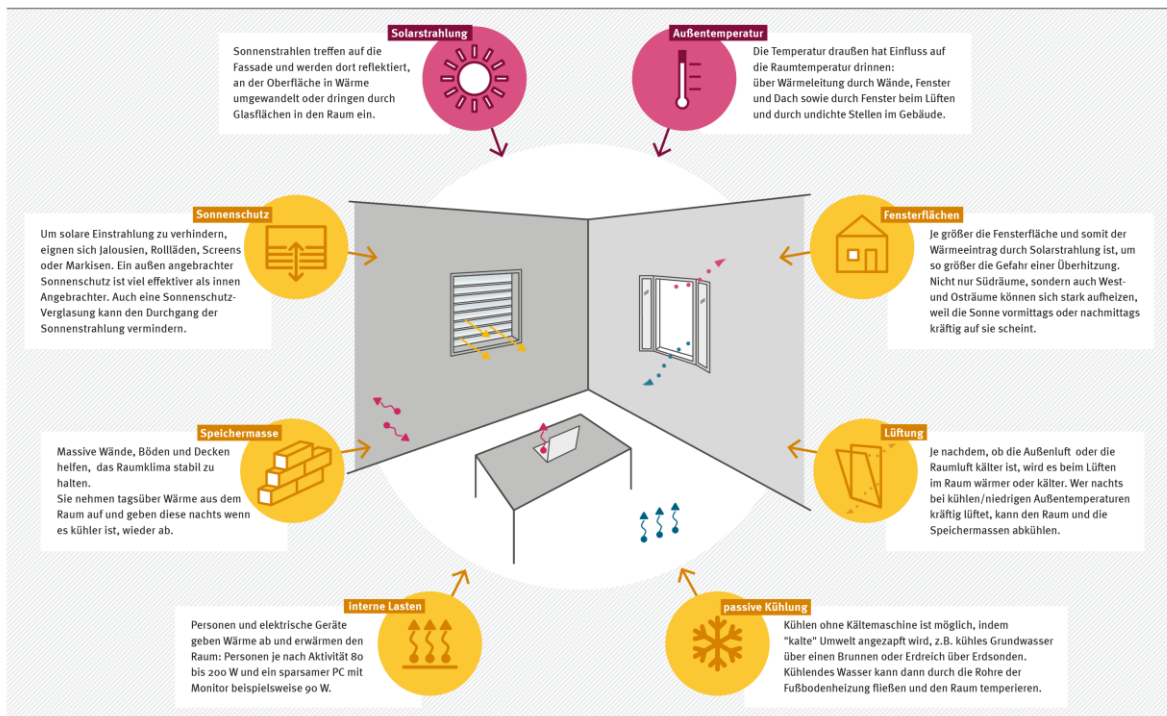
Gebäude sollen vor Umweltauswirkungen schützen. Wie viel Komfort sie bieten müssen und wie viel Energieeinsatz hierfür zugestanden wird, das sind die Dinge, die wir auch zukünftig diskutieren müssen. Weiterer Forschungsbedarf wird auf den Gebieten Komfortbänder, Monitoring von Gebäuden und einer vertiefenden Analyse von Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz gesehen.

Wesentliche Inhalte werden in Form von vier Infografiken veranschaulicht und sind nachfolgend dargestellt.

Abbildung 4: Infografiken

Einflussfaktoren auf die Raumtemperatur im Sommer

Wie ein Gebäude und seine Räume gestaltet sind, hat großen Einfluss darauf, wie stark Solarstrahlung und hohe Außentemperaturen die Raumtemperatur im Sommer ansteigen lassen

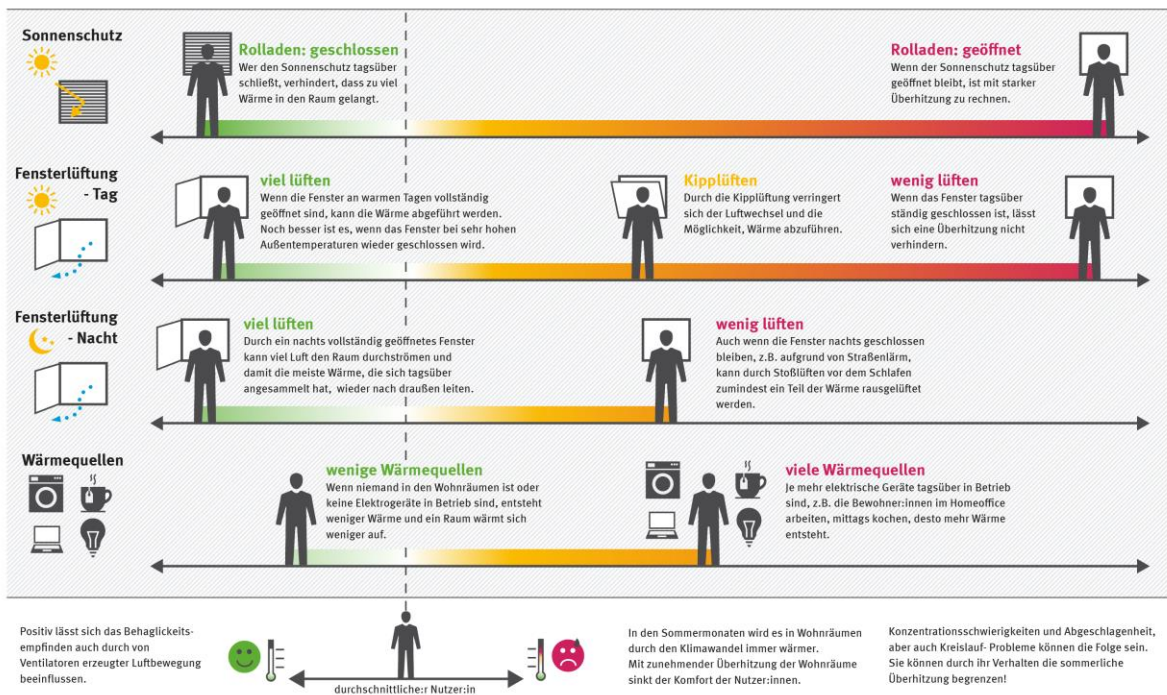


Weitere Informationen unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kuehle-gebäude-im-sommer>

Quelle: Ingenieurbüro Hausladen, Umweltbundesamt

Heiße Räume im Sommer

Das können Sie im Alltag dagegen tun

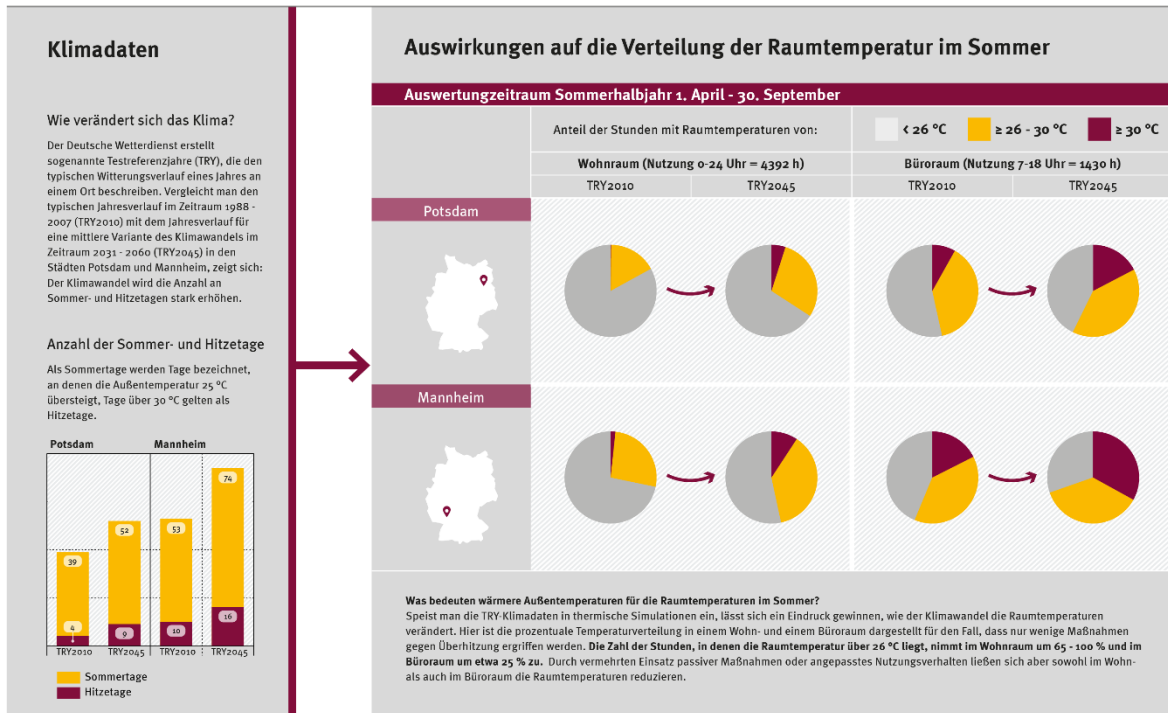


Weitere Informationen unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kuehle-gebäude-im-sommer>

Quelle: Ingenieurbüro Hausladen, Umweltbundesamt

Auswirkungen des Klimawandels auf die Temperatur in Innenräumen

Der Klimawandel lässt die Außentemperaturen ansteigen. Das wirkt sich auf Gebäude vor allem im Sommer aus: Werden keine Maßnahmen ergriffen, kann es auch drinnen heiß werden.



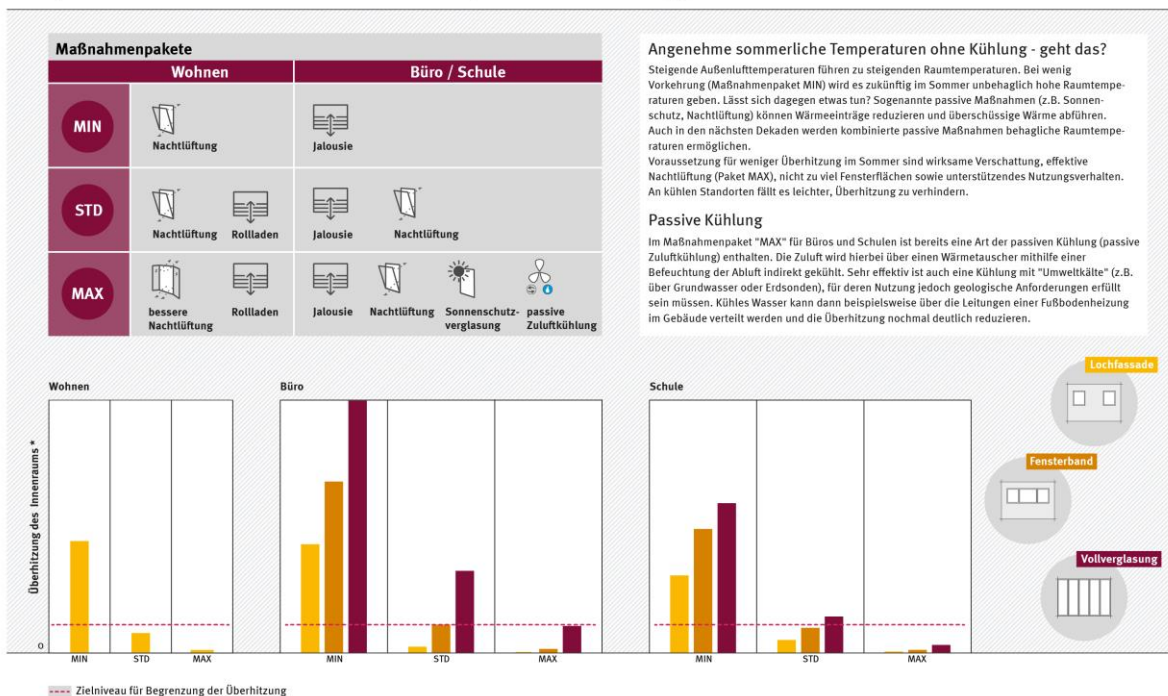
Weitere Informationen unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kuehle-gebäude-im-sommer>

Quelle: Ingenieurbüro Hausladen, Umweltbundesamt

Schutz vor Überhitzung des Innenraums durch passive Maßnahmen

Der Klimawandel führt zu Überhitzung in Gebäuden.

Mit passiven Maßnahmen können Sie der Überhitzung von Innenräumen entgegenwirken.



*Überhitzung orientiert sich an Übertemperaturgradstunden (ausgewertet für TRY2045 am Standort Potsdam)
Weitere Informationen unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kuehle-gebäude-im-sommer>

Quelle: Ingenieurbüro Hausladen, Umweltbundesamt

Quelle: eigene Darstellung, IBH

Summary

Introduction

Climate change with rising outdoor air temperatures also affects buildings. Indoor spaces will therefore be increasingly affected by overheating. This has negative consequences for the feeling of comfort, as well as for the health aspects. Using air conditioning as a countermeasure leads to increasing greenhouse gas emissions due to the electricity demand of the devices and thus has an even more intensifying effect on climate change. Thus, the development of strategies to avoid overheating indoors and increasing cooling energy demand is extremely important.

Objective

This study is therefore intended to gain insights into the climatic effects on room temperatures as well as into the sensitivity of individual parameters to the arising room temperatures. With the help of different scenarios, the effectiveness and the limits of passive measures are to be evaluated. Finally, the technical and financial costs of passive measures are to be estimated. Since the effects of climate change affect both the new and existing buildings, this study will include both the new buildings and the partially refurbished or unrefurbished existing buildings. The reason for this is to determine whether or not existing buildings should also be subject to a certification requirement for summer thermal insulation in the future - possibly only in the case of renovation.

In planning practice, the creation of a concept for summer thermal insulation is often complex. This is due to the large number of influencing variables, but also to the restrictions imposed by the specifications of architecture and building installations. At the same time, there is a lack of user-friendly tools for analyzing the appropriate combinations of measures, taking into account the rising outdoor air temperatures. For this reason, methods for the evaluation of summer thermal insulation are to be compared and their corresponding advantages and disadvantages are to be elaborated.

The significance of the economic efficiency requirement for summer thermal insulation is to be examined in a legal opinion. The reason for this is that there can be no amortization for passive measures without air conditioning, because there is no cooling energy saving.

Finally, the available knowledge on the summer thermal protection should be described in a comprehensible way and the knowledge of how buildings can be optimally protected from overheating should be expanded with the future climate data.

Background Climate Change and Basic Principles (chapter 3)

Climate change can already be seen in Germany in the form of increasing annual mean temperatures and a rising number of summer days. When looking at the complex topic of climate forecasts, it becomes apparent that depending on the scenario (e.g. RCP 2.6 or RCP 8.5), more or less strong increases in temperatures have to be expected. In addition to the strong regional climatic differences in Germany, the predicted impacts of climate change also strongly differ regionally. For the provision of climate data, weather data are evaluated over a longer period of time (e.g. 30 years), which results in the elimination of short-term weather fluctuations. Through this methodology, however, the temperature that has increased in the last decades is underestimated for the description of our current climate.

In order to better assess climate data available for thermal simulations for this research project, the hourly mean values of selected test reference years (TRY2015 and TRY2045 each normal year and summer-focused from the 2017 climate dataset (DWD 2020b)) for three example locations are analyzed with respect to mean temperature in the summer semester, number of

summer and heat days, and other parameters and compared with weather data from 2011 to 2022. With few exceptions, the parameters characterizing summer outdoor air temperature show an increasing trend from TRY2015 to summer-focused TRY2015x further to TRY2045 to summer-focused TRY2045x, and from unpopulated area to suburban location to inner city areas. These trends are reasonable. Compared to the averaged DWD weather data for the last 10 years, the evaluated characteristics suggest that TRY2015 no longer represents the current climate. Also the future TRY2045, based on ensembles for 2031 to 2060 according to RCP4.5 and RCP8.5, suggest that they may underestimate the further increasing impacts of climate change (temperature increase, increase in heat days and tropical nights), as in many cases these are already exceeded by the mean values of the last decade. Measurements of summertime indoor temperatures already show a strong temperature increase compared to the recent years. Influencing factors on the room temperatures are described. Possible measures against overheating can include a low proportion of window area, solar shading, solar control glazing, night ventilation and passive cooling. Greenery and urban context can help lower the outdoor temperature, which in turn affects the indoor climate.

Important standards related to the summer thermal insulation are § 14 "Summer thermal insulation" of the German Building Energy Act and Chapter 8 of DIN 4108-2: 2013-02. The regulations regarding a summer thermal insulation only apply to new buildings and extensions, provided they are larger than 50 m², but not to existing buildings. Also important for the determination of thermal comfort are DIN EN ISO 7730 (calculation of predicted mean vote "PMV" and predicted percentage of dissatisfied "PPD") and DIN EN 16798-1:2022-03 for the comfort rating of rooms. DIN EN 16798-1 has - with reference to comfort expectations - different comfort ranges for cooled and non-cooled buildings. Furthermore, it contains a National Annex, which has its own comfort range.

In order to determine a suitable value for the evaluation of thermal simulations of this study, advantages and disadvantages of the methods described in the standards are analyzed: an easily understandable quantity such as the over-temperature frequency related to a temperature threshold seems too inaccurate in times of climate change, since the human adaptation to the ambient temperature is not included. A common evaluation quantity is overtemperature degree hours as they are to be determined for the verification according to DIN 4108-2 in thermal simulations. However, the rigid reference temperatures dependent on the summer climate region are too imprecise for an evaluation of "free" simulations that are supposed to take climate change into account. An evaluation according to a comfort range, which refers to the outdoor air temperature, does not show this disadvantage. Here, the adaptive comfort model for non-cooled buildings of DIN EN 16798-1 could be considered - however, according to this standard, the over-temperature frequency is evaluated, which in turn is less accurate due to the missing consideration of the height of the exceedance. The evaluation according to the National Annex (NA) of DIN EN 16798-1:2022-03 is carried out via over temperature hours and on the basis of a comfort range, which refers to the hourly mean outdoor temperature and applies to cooled and non-cooled buildings. The NA comfort range is adaptive in the average outdoor temperature range (between 16 and 32 °C); above this range, the maximum comfort room temperature is held constant at 28 °C, and below it at a maximum of 24 °C. A disadvantage of the evaluation according to the National Annex is that it is not yet applied in any method (verification method, evaluation method). The different comfort ranges, reference temperatures and evaluation sizes therefore each have advantages and disadvantages. After considering them, the comfort range of the National Annex DIN EN 16798-1 was defined as the evaluation size within the scope of this study.

The next question in the evaluation concerns the target value for comfort. All methods allow certain overruns of the reference or comfort room temperature. This is, for example, according to

DIN 4108-2 at 1,200 Kh/a (residential buildings) or at 500 Kh/a (non-residential buildings) or for an evaluation of thermal comfort in the context of a DGNB building certification at 3% deviation frequency for the highest score, whereby the method refers to the now withdrawn DIN EN 15251, which has been replaced by DIN EN 16798-1. For the methodology according to the National Annex (DIN EN 16798-1 NA), Category II is fulfilled for the indoor climate with regard to summer thermal insulation if the upper limit of the comfort band is exceeded by a maximum of 2 K in less than 1 % of the time of use. An evaluation shows that the permissible requirement value according to the National Annex is set very low compared to others (presumably because it also applies to the cooled buildings) and is therefore not suitable for the objective of this study with purely passive measures. Therefore, although the requirement value for this study is given as a percentage permissible overrun related to the time of use, as in the National Annex, the permissible level is based on the requirement value of DIN 4108-2:2013-02. In this way, the requirement value for the overtemperature degree hours results in a deviation of 7 % of the time of use by 2 K (residential buildings) or 9 % of the time of use deviation by 2 K (non-residential buildings).

Approach Parametric Study (chapter 4)

The core of this research work is a parametric study based on thermal-dynamic simulations of sample rooms. It is divided into a basic and a detailed investigation. For the basic investigation, a variant matrix is set up and all possible combinations are simulated. In the detailed investigation, certain parameters are considered based on selected comparative variants of the basic investigation. The variant matrix of the basic investigation and the object of investigation of the detailed investigation are shown in Tabelle 4.

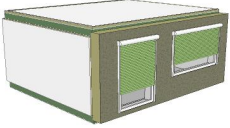
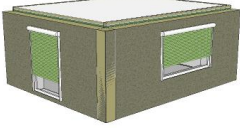




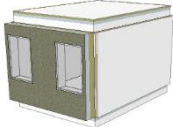
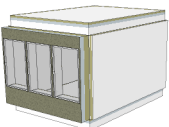
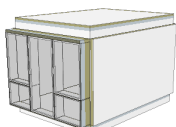
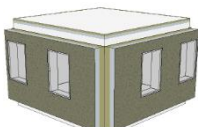
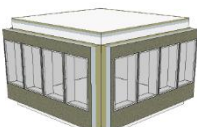
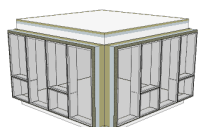
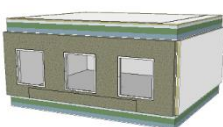
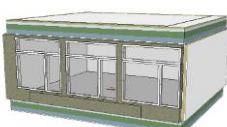
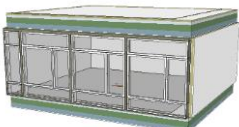
Tabelle 4: Overview parametric study

Parameters						Usage-specific			
Method	Location	Climate data (TRY)	Orientation	Measures (-packages)	Energy standard		Room	Construction method	Facade
basic investigation	Mannheim (Suburb)	TRY2010	north	minimum	new building (GEG)	residential	Living room Corner-Living room Children room Corner-Child room	heavy	Punched facade
			south						
	Potsdam (Suburb)	TRY2045	west	standard		office	2-P-Office	light	Punched facade Ribbon window Full glazing
			east				3-P-Office-Corner		
	Rostock (Suburb)	WD2018	south-west	maximum		school	Classroom	medium	Punched facade Ribbon window Full glazing
			north-east						
Modified parameters									
detailed investigation	Mannheim (uninhabited / inner city)	Meteo2050 _8.5x			partially renovated stock	residential		light medium	User behavior Location in the building
	Potsdam (uninhabited / inner city)				office		medium heavy	Interaction with the active cooling	
	Rostock (uninhabited / inner city)				KfW 40	school		light heavy	Boundary conditions

Typical model spaces for the residential, office, and school use types are designed to perform the simulations: a living room, a children's room (each also with a corner situation), a 2-person

office space, a 3-person corner office space, and a classroom. The office spaces and classroom are each varied for three façade types (punched façade, ribbon window, and full glazing). Tabelle 5 provides an overview of the room models and their basal window area fractions f_{WG} .

Tabelle 5: Room models for the residential and office buildings and school

Residential	Living room	Corner Living room	Corner Living room
			
f_{WG}	21 %	21 %	39 %
Residential	children room	Corner children room	Corner children room
			
f_{WG}	28 %	28 %	66 %
Office (2 Persons)	punched façade	ribbon window	full glazing
			
f_{WG}	20 %	34 %	54 %
Corner office (3 Persons)	punched façade	ribbon window	full glazing
			
f_{WG}	30 %	67 %	104 %
School	punched façade	ribbon window	full glazing
			
f_{WG}	13 %	28 %	38 %

The passive measures for the summer thermal protection are also varied in the form of measurement packages. In the MIN package of measures there is little precaution, in the STD package there is a normal amount of precaution, and in the MAX package of measures there is a lot of

precaution against overheating. Tabelle 6 shows how the packages of measures are implemented.

Tabelle 6: Packages of measurements

Package of measures	Construction measure	Passive Cooling
MIN Residential	-	Increased night ventilation
STD Residential	Roller shutter	Increased night ventilation
MAX Residential	Screen	Increased night ventilation
MIN Office	Window blind	-
STD Office	Window blind	Increased night ventilation
MAX Office	Window blind + sun protection glass	Adiabatic cooling + increased night ventilation
MIN School	Window blind	-
STD School	Window blind	Increased night ventilation
MAX School	Window blind+ Sun protection glass	Adiabatic cooling + increased night ventilation

Climate data are an important simulation input for mapping current and future weather in climate change. From the most recent, locally accurate future test reference years (DWD 2020b), the normal year TRY2045 and the summer-focused year (with extremely warm summer) TRY2045x are used and, as a basis for comparison, the normal year of the test reference year 2011, to which DIN 4108-2:2013-02 refers. In order to represent climatic differences in Germany, the cities of Rostock (cool climate), Potsdam (average climate) and Mannheim (warm climate) are selected with respect to the climatic regions A, B and C of DIN 4108-2:2013-02. The test reference years are additionally supplemented by weather data of the extremely warm summer 2018 from weather stations in Rostock-Warnemünde, Potsdam and Mannheim (DWD 2021b) prepared for the simulation.

The evaluation quantities for the parametric study are the over temperature degree hours evaluated on the basis of the comfort bands of the National Annex to DIN EN 16798-1. For the requirement values of the study, permissible overtemperature hours of less than or equal to 1,226 Kh/a for living spaces, less than or equal to 517 Kh/a for offices and less than or equal to 217 Kh/a for classrooms are obtained, based on the time of use. In addition, an evaluation of the room temperatures that occur is performed. In this study, the term "room temperatures" is used in a shortened form; in any case the operative room temperatures are determined.

Results of the basic investigation (chapter 5.1)

For the first analysis, the characteristic "requirement value fulfilled" is first evaluated and, broken down by various parameters, the respective share of compliance with the requirement value is determined for all simulations. For all types of use investigated, the package of measures has the greatest influence. In the case of residential and office space, the second most important parameter is the facade type, which determines window proportion related to the floor area-related, and in the case of the classroom, the location. The climate data and the orientation also show up as important influencing factors, but less pronounced.

The basic investigation is supplemented by a clear evaluation of the resulting room temperature with west orientation, divided into the four ranges "less than 25° C", "25° C to less than 27 °C", "27° C to less than 30 °C" and "greater than or equal to 30 °C". The difference between the packages of measures can be clearly seen in this way, but so can the dependence on location. Room temperatures above 30° cannot be prevented with the MIN package of measures.

Finally, hypotheses are made and tested on the basis of the simulation results. The following statements, among others, can be derived for the selected investigation framework:

- ▶ If only few precautions are taken for summer thermal insulation (the MIN package of measures applied), there will be uncomfortably high room temperatures in summer in the future.
- ▶ Even in the next decades, passive measures in combination (analogous to the MAX package of measures) may be sufficient to enable comfortable room temperatures. However, this does not apply in the case of high floor-area-related window area fractions
- ▶ Even in the next decades, passive measures in combination (analogous to the MAX package of measures) may be sufficient to enable comfortable room temperatures. However, this does not apply in the case of high floor-area-related window area fractions

Usage behavior study (chapter 5.2)

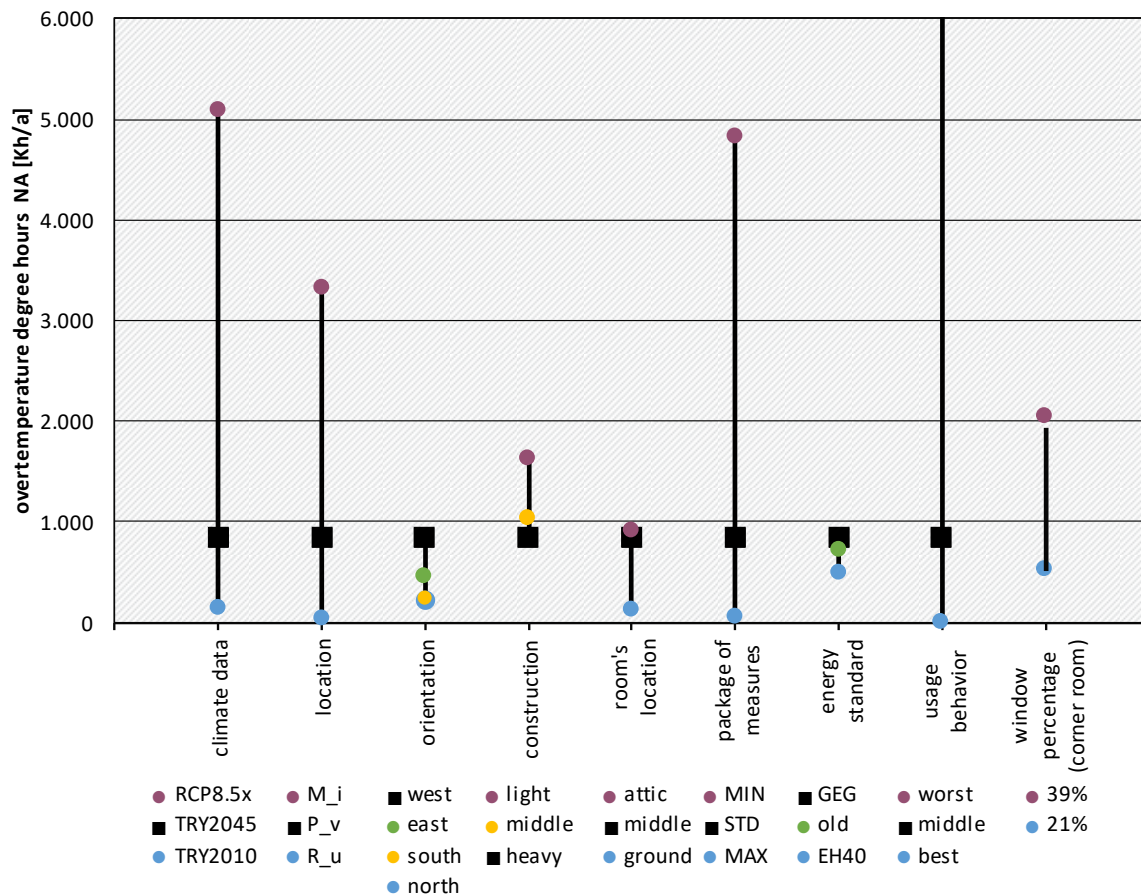
An excursus on the usage behavior shows the significant influence of the operation of the sun protection, the ventilation behavior and also the internal heat loads using the example of the model living room. While the air changes were set in the parametric study, the air changes for day and night ventilation resulting from opening the windows were analyzed in the simulations for this excursus.

Results of the detailed investigation (chapter 5.3)

In the detailed investigation, further parameters such as the effects of extreme climate change, the energy standard, the construction method, and the location of the room in the building are investigated. Abbildung 5 shows - starting from the "base case" (sample living room, TRY 2045, Potsdam location, STD package of measures and west orientation) - the resulting range for the overtemperature degree hours when varying individual parameters. The black square always represents the base case.

Abbildung 5: Influence of different parameters on overheating - living room

Base case: sample living room, TRY 2045, Potsdam location, STD package of measures, west orientation



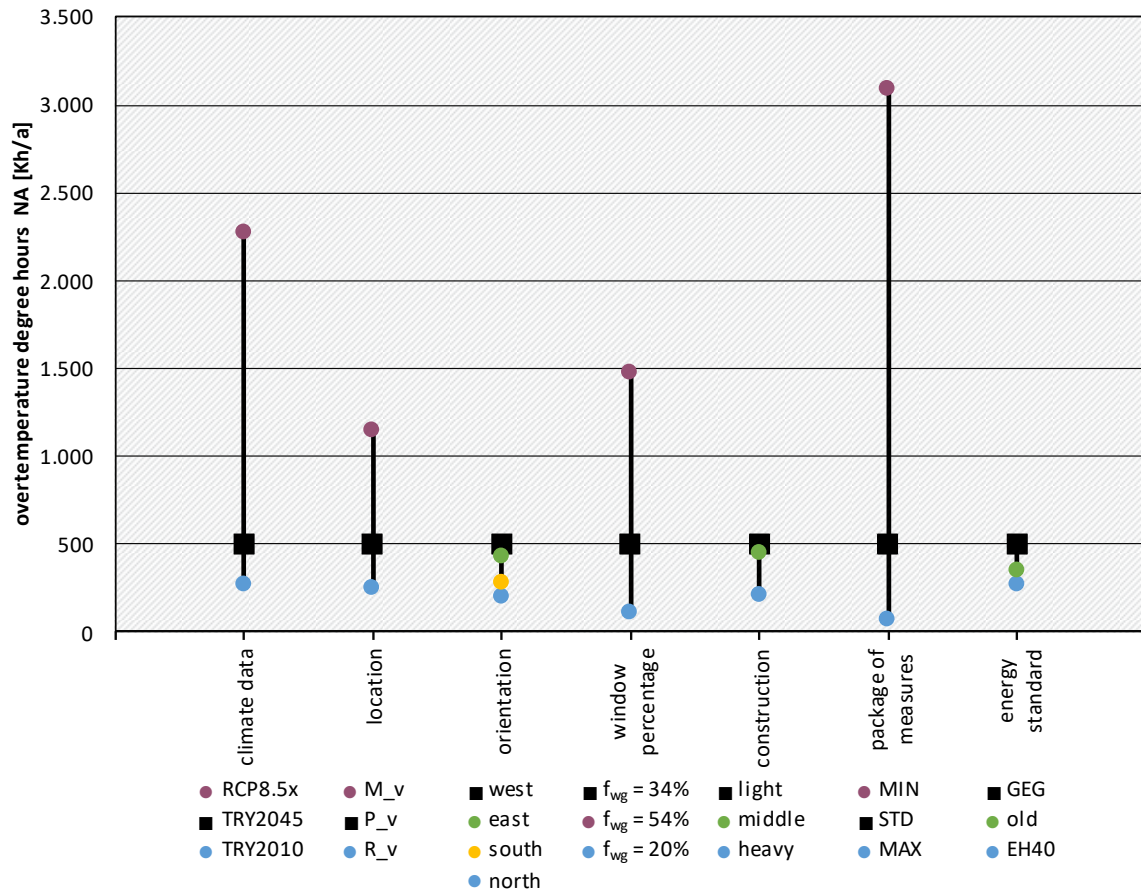
Source: own illustration, IBH

Extremely favorable (sensible temperature-dependent ventilation, largely closed solar shading when there is a risk of overheating) or extremely unfavorable (open solar shading, infrequent window ventilation) usage behavior has the greatest influence on overtemperature degree hours. If extreme climate change (RCP8.5 2050) is included, climate data has the second largest influence, followed by the package of measures and the location. The energy standard has the least influence of the parameters studied.

Accordingly, Abbildung 6 shows the evaluation for the office space. The initial case is the 2-person office room with window band simulated with the TRY 2045, Potsdam location, STD measure package and west orientation.

Abbildung 6: Influence of various parameters on overheating - office space

Base case: sample office room with window strip, TRY 2045, Potsdam site, STD package of measures, west orientation



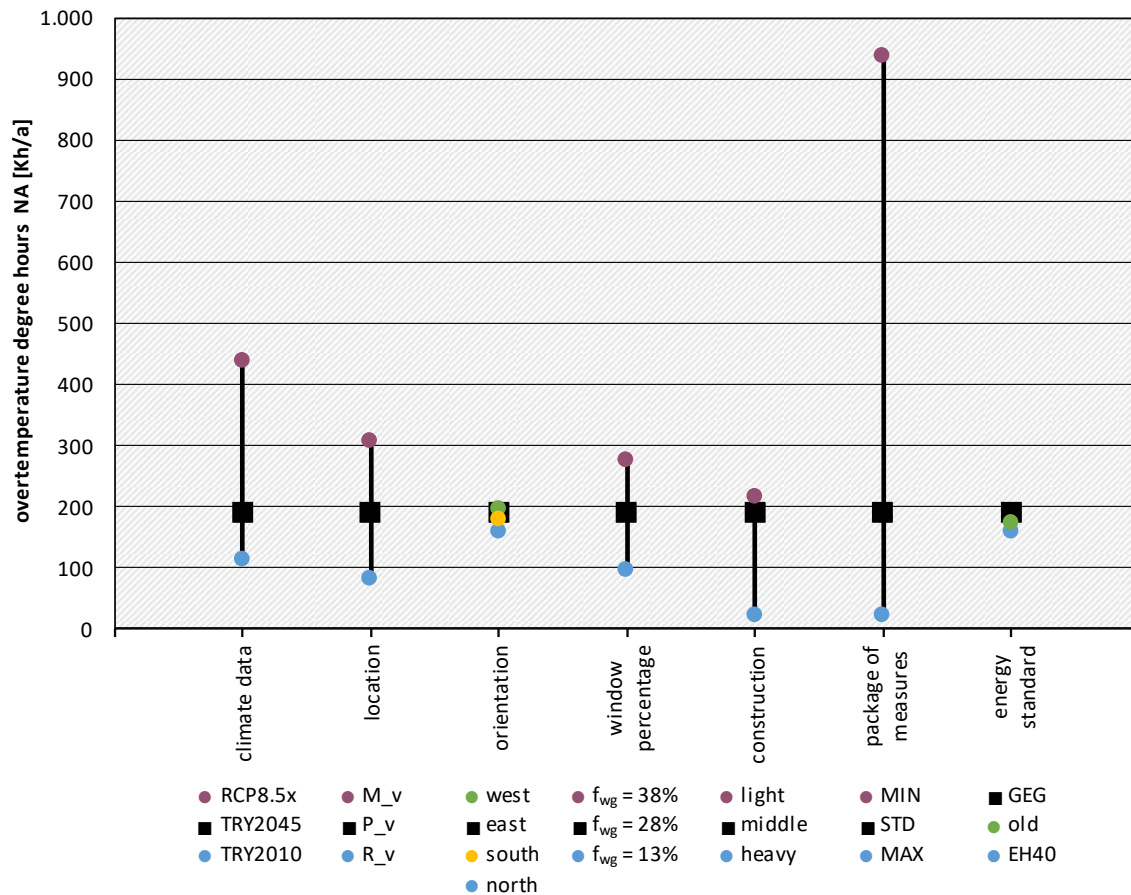
Source: own representation, IBH

For the office space, the package of measures shows the greatest influence in preventing overheating, followed by climate data (with extreme climate change), window area proportion in relation to the floor area, and location.

Abbildung 7 shows the diagram for the classroom. The base case is the sample classroom with window band, TRY 2045, Potsdam location, STD package of measures, and west orientation.

Abbildung 7: Influence of different parameters on overheating - classroom

Base case: Sample classroom with window band, TRY 2045, Potsdam site, STD package of measures, west orientation



Source: own representation, IBH

As already found in the basic investigation, for the classroom the package of measures has by far the largest influence on overheating, followed by climate data, location, construction method and window area fraction.

The complex interrelationships make it impossible to provide generalized conclusions. Nevertheless, referring to the above diagrams, the following recommendations can be drawn:

- The influence of climate data is very relevant and the difference between the TRY2010 and the TRY2045 (and even more evident for the TRY 2045x) is clearly visible. However, the climate data only become a dominant influence on overheating when the RCP 8.5 scenario is used. Even for this extreme case, the overtemperature degree hours can be lowered by the STD package of measures (and especially in the MAX package of measures). Thus, by combining passive measures, the warming of the interior can be significantly mitigated even at hot outdoor temperatures. However, the requirement value can no longer be met in most cases in the RCP8.5 scenario. This applies to all cases investigated for the Mannheim site.
- The package of measures is one of the dominant influencing variables. It can be deduced that the combination of passive measures is effective to protect against overheating in rooms. If the possibility of passive cooling (e.g. via groundwater) had been included, the potential would be even greater than presented.

- ▶ The only minor influence of orientation for all types of use is due to the STD package of measures, which provides external sun protection for all orientations.
- ▶ The proportion of window area related to floor area has a significant influence on overheating. This would be even more significant without solar shading.
- ▶ Whether a heavy or medium construction method has a favorable effect depends on the potential to dissipate heat (e.g. through night ventilation). Therefore, for the measure packages without night ventilation (MIN measure package office and school), the influence of the construction method is small or non-existent.
- ▶ The influence of the energy standard is low for all uses, although the range of variations from unrenovated old buildings to the Efficiency House 40 standard covers a very wide variety. Only in particularly sun-exposed rooms with components such as pitched roofs with dark outer surfaces more insulation has a noticeably positive effect.

The basic and detailed investigation is concluded with a discussion, among other things, the significance of further influencing factors such as air velocity and room humidity (chapter 5.4). Increasing air velocity by cross ventilation or fans increases the feeling of comfort due to the accompanying stronger convection and heat dissipation via the skin. The onset of perspiration at very high room temperatures also increases the importance of evaporative cooling on skin. Also, the indoor air humidity plays a role in the perception of comfort and could be included in an evaluation of humid locations, for example, by evaluating the number of hours with more than 65 % relative humidity.

Energy demand analysis (chapter 5.5)

Building on the basic investigation, the energy demand associated with passive measures - also compared to active cooling - is investigated for the office and the classroom. Solar control glazing leads to an increase in heating and lighting demand, and a colder location with less sunshine has similar consequences. A small window area also leads to higher lighting demand, but lower heating demand. These shifts in energy demand, while relevant, are small compared to the electricity demand for mechanical night ventilation. For example, for the 2-person office with window band variant with Potsdam climate data TRY2045, the electricity demand for artificial light increases by 0.8 kWh/m² due to solar control glazing, and by 6.2 kWh/m² for mechanical night ventilation. For the same case, the electricity demand for passive cooling via groundwater is 1.3 kWh/m² and for active cooling 4.7 kWh/m². A subsequent investigation into possible efficiency improvements for mechanical night ventilation shows a dependence on the configuration and the control system. If the power efficiency could be significantly improved, for example, by reducing the pressure losses, the power requirement for the night ventilation could be reduced by almost 20 %, and by 14 % with a more energy-efficient control system (with an increase in the overtemperature hours by 6 %). Only a combination of such efficiency measures could possibly lead to a lower electricity demand than active cooling. However, the latter would still have lower overtemperature hours. The situation is different for mechanical night ventilation with a decentralized ventilation system. In the case studied, the night ventilation power requirement is less than half of the active cooling.

In terms of energy-efficient use of energy and resources, it is clear that the definition of passive cooling also includes a limit value for electricity efficiency that must be lower than that of active cooling.

Economic efficiency analysis (chapter 5.6)

In a life cycle costing analysis of the MIN, STD and MAX packages of measures for the office and the classroom the MIN package of measures performs the most cost-effectively, as expected. For the classroom, the variants with STD and MAX packages of measures and the comparative variant with active cooling are roughly equivalent. The variant with automatically operated night ventilation elements is clearly the most expensive. The results are similar for the office, except that here the variant with active cooling is between the MIN and STD package of measures in terms of cost. Since these are purely passive packages of measures and there is no active cooling, there is a reduction in overtemperature degree hours, but no (cooling) energy savings. Indirect costs or lost revenue, such as due to lower labor productivity or rent reductions when temperatures are uncomfortably high, are discussed but not included in the analysis.

Life cycle assessment study (chapter 5.7)

In addition, the greenhouse potential resulting from passive measures during production and disposal as well as during use (including auxiliary power requirements and influence on heating or lighting energy requirements) is estimated for an office space over an observation period of 50 years. Almost all passive measures have a better ratio of effectiveness to greenhouse potential than air conditioning in the comparison case and are thus recommendable from an ecological point of view. Exceptions are the central night ventilation systems due to their high energy demand during use.

On the significance of the economic efficiency requirement for the demands on summer thermal insulation (chapter 6)

On the one hand, the economic efficiency requirement in the German Building Energy Act (GEG) serves as an orientation guideline that the legislator has imposed on itself for setting minimum requirements. On the other hand, the economic efficiency requirement can be a standard of assessment in individual cases when an application is made for exemption from requirements of the Act pursuant to Section 102 GEG. Insofar as the Building Energy Act has laid down requirements, it can be assumed on the basis of Section 5 GEG that these are in principle compatible with the principle of economic efficiency, i.e. that they must be complied with. This dual role is also reflected in the context of the requirements for summer thermal insulation. On the one hand, § 5 GEG applies in the background. On the level of individual case application, however, the provisions of § 14 GEG take the place of § 102 GEG. It follows from § 14 GEG, taking § 5 GEG into account, that the structural requirements for reducing solar gain required by § 14 para. 2 GEG are to be regarded as economically justifiable in principle, i.e. they must be strictly adhered to per se. However, § 14 para. 4 GEG makes an exception to this directly regulated in the law, from which it follows that the requirements of § 14 para. 2 GEG in the case of the use of cooling systems only have to be complied with insofar as the (additional) constructional measures for their part present themselves as economically justifiable despite the use of cooling systems. In contrast to § 102 GEG, this does not require an application for exemption. It follows from section 14 (4) that structural summer thermal insulation is now only required if it proves to be economical despite the use of cooling systems. In practice, this means that the priority of structural measures over the use of air-conditioning systems has been turned into its opposite. In terms of content, the economic efficiency requirement raises numerous questions of interpretation (e.g. "usual useful life", does the useful life refer to the building or only to individual components). The economic efficiency requirement also lacks a description of a methodology in which - at the latest since the Fuel Emissions Trading Act came into force - a CO₂ price would have to be taken into account on a prognostic basis. Constitutionally, the economic efficiency requirement is not necessary. On the contrary, the unconstitutionality of the efficiency requirement can be derived from Article 20a of the Basic Law, which contains the climate protection requirement, and also

from the constitutional mandate for effective climate protection described by the Federal Constitutional Court.

Comparison of methods (chapter 7)

The comparison includes the solar input characteristic value method according to DIN 4108-2, thermal simulation according to DIN 4108-2, comfort evaluations according to DIN EN 16798-1 and according to the National Annex of DIN EN 16798-1, the passive house project planning package (summer case) and the determination of the cooling load according to VDI 2078. Based on selected variants of the basic investigation with different evaluation methods, it is checked for which method the requirement value is met. Overall, there is a surprisingly good agreement between the DIN 4108-2 simulation and the comfort rating according to DIN EN 16798-1, especially for residential and office buildings. Justifiably, the characteristic value method is not complied with more often than in the DIN 4108-2 simulation, which mainly concerns the MIN measure package. There is no reverse case. According to the National Annex, the least number of cases are complied with. As already criticized in the basic chapter for the evaluation values, the NA requirement value for non-cooled buildings is set too low. The amount of cooling load shows the same trends as a function of the package of measures, location, and amount of window area as the comfort ratings. Finally, a qualitative assessment is made for the evaluation methods on the informative value of the result variable, the complexity of the calculation mode, and the workload. The most important suggestions derived from the comparison of methods are included in the recommendations for action.

Conclusions and recommendations for action (chapter 8)

The climate change will also become noticeable in the future through rising room temperatures in the summer. The key factors for a comfortable room temperature in the future will be still a moderate proportion of window area, effective sun protection, ventilation depending on the cooling potential (cooling potential exists when outside is cooler than inside) and, last but not least, passive cooling with "environmental cooling" (e.g. groundwater, soil). The challenges to the building industry which result in higher outdoor temperatures and heat waves are high. The selection of the measure combinations - because a combination will be required in the future - must be based on a balancing of the goals of health protection, high energy efficiency, low resource use, high robustness and, last but not least, cost efficiency. Passive measures are the most important factor for buildings that need to operate without active cooling or have a low cooling energy demand. However, even in the case of passive measures, the energy requirement must be taken into account (e.g. in the case of mechanical night ventilation), which must be significantly lower than an active cooling system.

Extending the obligation to provide proof of summer thermal insulation to renovations and further expanding the BEG subsidy program with regard to appropriate measures is seen as the next urgently needed step. It is also necessary to establish the uniform standards so that, for example, the simulation for the proof and comfort assessment can be carried out with the same parameter. The comfort ranges and requirement values must be revised for this purpose on the basis of the latest scientific findings on health protection and comfort assessment. In addition, there is a need for regular updates of climate data and the relevant standard references in times of climate change. The definition of "passive cooling" in DIN 4108-2 should be revised and a threshold value for electricity efficiency should be added.

Buildings are supposed to protect against environmental impacts. How much comfort they are expected to provide and how much energy is allowed to be used for this purpose are the issues that we need to discuss in the future as well. Further research is needed in the areas of comfort ranges, monitoring of buildings and a deep analysis of measures for summer thermal insulation.

1 Einleitung

Dem sommerlichen Wärmeschutz wird zukünftig aufgrund des Klimawandels mit zunehmenden Hitzeperioden eine immer wichtigere Bedeutung zukommen. Die Auswirkungen des Klimawandels treffen Wohngebäude ebenso wie Nichtwohngebäude, Neubauten wie Bestandsgebäude. Die negativen Folgen sind vielfältig und reichen von Komforteinbußen über ernste gesundheitliche Folgen bis hin zu Hitzetoten. Fraglich sind als Gegenmaßnahme eingesetzte Klimaanlage, die aufgrund des vermehrten Stromverbrauchs verbunden mit weiteren Klimagasemissionen einen den Klimawandel noch verstärkenden Rückkopplungseffekt haben.

Die Entwicklung von Strategien zur Vermeidung von Überhitzung in Innenräumen und gleichzeitig ansteigendem Kühlenergiebedarf ist deshalb von immenser Bedeutung. Um diesen Auswirkungen entgegenzuwirken, soll im Rahmen dieser Studie geprüft werden, ob die gegenwärtig geltenden Vorschriften im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz ausreichend sind oder angepasst und erweitert werden sollten. Derzeit gelten Vorschriften bezüglich eines zu gewährenden sommerlichen Wärmeschutzes nur für Neubauten und Erweiterungsbauten, sofern diese größer als 50 m² sind, jedoch nicht für Bestandsgebäude. Gesetzliche Grundlage ist das Gebäudeenergiegesetz mit der Verpflichtung zur Einhaltung der „Mindestanforderung an den sommerlichen Wärmeschutz“ nach DIN 4108-2:2013-02. Ziel dieser Norm ist, durch passive Maßnahmen den Kühlenergiebedarf für gekühlte Gebäude gering zu halten bzw. bei Gebäuden ohne Kühlung hohe sommerliche Raumtemperaturen zu vermeiden.

In der planerischen Praxis bei Neubauprojekten ist die Erstellung eines Konzepts für den sommerlichen Wärmeschutz aufgrund der Vielzahl von Einflussgrößen, aber auch infolge Einschränkungen durch architektonische und Fachplaner-Vorgaben, oft komplex. Aus diesem Grund sind geeignete Werkzeuge zur Analyse von geeigneten Maßnahmenkombinationen essenziell. Als Bewertungsmethoden stehen neben den beiden möglichen Nachweisverfahren nach DIN 4108-2 (Kennwertverfahren, thermische Simulation) auch thermische Simulationen mit an die Nutzung angepassten Randbedingungen nach DIN EN 16798-1 zur Verfügung. Von großer Bedeutung für die Ergebnisse von Berechnungen bzw. Simulationen zum sommerlichen Verhalten sind die zugrunde gelegten Klimadaten. Insbesondere für den Gebäudebereich mit immens langen Nutzungszeiten ist hierbei die Einbeziehung von Klimaprognosen wichtig. Gleichzeitig ist festzustellen, dass leicht anzuwendende Werkzeuge zur Analyse von geeigneten Maßnahmenkombinationen unter Berücksichtigung der zu erwartenden ansteigenden Außenlufttemperaturen fehlen.

Mit Hilfe der vorliegenden Studie sollen Erkenntnisse gewonnen werden zu

- ▶ den Auswirkungen von zukünftigem Klima auf die Raumtemperaturen
- ▶ Sensitivität von einzelnen Parametern (Klimadaten, Raumbeschaffenheit, Nutzungsrandbedingungen, Maßnahmen).
- ▶ Wirksamkeit und Grenzen passiver Maßnahmen
- ▶ dem technischen und finanziellen Aufwand von passiven Maßnahmen
- ▶ den Methoden für die Bewertung passiver Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz und deren jeweiligen Vor- und Nachteilen
- ▶ zum sommerlichen Wärmeschutz in teil- und unsanierten Bestandsgebäuden.

Nach der Einleitung beschäftigt sich Kapitel 2 mit Veränderungen durch den Klimawandel bezüglich Auswirkungen auf derzeitige und zukünftige Außenlufttemperaturen. In Kapitel 3 werden wichtige Grundlagen zum sommerlichen Wärmeschutz zusammengestellt: Einflussgrößen

auf Innenraumtemperaturen, eine Übersicht über mögliche Maßnahmen gegen Überhitzung, diesbezügliche gesetzliche und sonstige Vorgaben, gängige Bewertungsmethoden sowie eine Diskussion möglicher Auswertegrößen für thermische Simulationen. Um zur Verfügung stehenden Klimadaten für dieses Forschungsprojekt besser einschätzen zu können, werden diese für 3 Beispielorte hinsichtlich Mitteltemperatur im Sommerhalbjahr, Anzahl von Sommer- und Hitzetagen und weiteren Kenngrößen analysiert und mit Wetterdaten der Jahre 2011 bis 2022 verglichen. Das Grundlagenkapitel wird mit einer Fachliteraturauswertung abgeschlossen.

Kernstück ist eine Parameterstudie, bei welcher auf Basis zahlreicher thermischer Simulationen der Einfluss von Maßnahmenpaketen, Klimadaten sowie Nutzungs- und Fassadentypen untersucht wird. Sie ist untergliedert in eine Basis- und eine Detailuntersuchung. Für diese werden typische Modellräume für die Nutzungstypen Wohnen, Büro und Schule entworfen, u.a. ein Wohnzimmer mit moderatem Fensterflächenanteil, ein 2-Personen-Büroraum und ein Klassenzimmer. Der Büroraum und das Klassenzimmer wird jeweils mit drei Fassadentypen variiert: einer Lochfassade, einem Fensterband und einer Vollverglasung. Variiert wird auch das Maß an passiven Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz. Beim MIN-Maßnahmepaket gibt es wenig Vorkehrung, beim STD-Paket ein normales Maß an Vorkehrung und beim MAX-Maßnahmepaket viel Vorkehrung gegen Überhitzung. Wichtiger Input, um derzeitiges und zukünftiges Wetter im Klimawandel abbilden zu können, sind die Klimadaten. Um klimatische Unterschiede in Deutschland abzubilden, werden bezugnehmend auf die Sommerklimaregionen A, B und C der DIN 4108-2:2013-02 die Städte Rostock (kühles Klima), Potsdam (durchschnittliches Klima) und Mannheim (warmes Klima) ausgewählt. Von den aktuellen, ortsgenauen Testreferenzjahren 2017 (DWD 2020b) werden die Zukunfts-Testreferenzjahre Normaljahr TRY2045 und das sommer-fokussierte TRY2045x verwendet. Als Vergleichsbasis werden die Simulationen auch mit dem Normaljahr des Testreferenzjahre 2011 durchgeführt, auf das die DIN 4108-2:2013-02 Bezug nimmt. Diese Testreferenzjahre werden noch durch Wetterdaten des extrem warmen Sommers 2018 ergänzt, die für die Simulation aufbereitet wurden. So spannt sich für die Basisuntersuchung unter Einbeziehung unterschiedlicher Raumorientierungen eine Variantenmatrix von über 1.500 Simulationen auf, für welche die Übertemperaturgradstunden nach dem Komfortband des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 NA ausgewertet werden. In der Detailuntersuchung werden dann einzelne Parameter wie die Speichermasse oder der Dämmstandard herausgegriffen und variiert. Ergänzt wird die Parameterstudie durch eine Energiebedarfsanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. In Kapitel 4 wird die Vorgehensweise detailliert beschrieben und in Kapitel 5 werden die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

In Kapitel 6 erläutert Prof. Klinski in seiner rechtsgutachtlichen Stellungnahme, welche Bedeutung das im Gebäudeenergiegesetz verankerte Wirtschaftlichkeitsgebot für die Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz hat und zieht interessante Schlussfolgerungen bezüglich der Anwendung des Wirtschaftlichkeitsgebots.

Der daran anschließende Methodenvergleich in Kapitel 7 hat das Ziel für die untersuchten Bewertungsmethoden eine qualitative Einschätzung der Aussagekraft der Ergebnisgröße, der Komplexität des Berechnungsmodus und des Arbeitsaufwands zu ermöglichen. Einbezogen in den Vergleich werden das Sonneneintragskennwerteverfahren nach DIN 4108-2, Thermische Simulation nach DIN 4108-2, Komfortbewertungen nach DIN EN 16798-1 und nach Nationalem Anhang der DIN EN 16798-1, die PHPP-Berechnung des Sommerfall und die Bestimmung der Kühllast. Aufbauend auf die Systematik der Parameterstudie und ausgewählten Varianten werden die Methoden angewendet und die jeweiligen Stärken und Schwächen herausgearbeitet.

Schließlich werden in Kapitel 8 Schlussfolgerungen gezogen und Handlungsempfehlungen abgeleitet.

2 Hintergrund - Klimawandel

Anlass der vorliegenden Untersuchung zum sommerlichen Wärmeschutz sind steigende Außentemperaturen infolge der Auswirkungen des Klimawandels. Steigende Außentemperaturen haben wiederum Einfluss auf die sich im Gebäude einstellenden Raumtemperaturen. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel ein Überblick über den derzeitigen Wissensstand zur Entwicklung der Außenlufttemperaturen in Deutschland von der Industrialisierung, den derzeitigen Stand bis hin zu Prognosen für die Zukunft gegeben (Kapitel 2.1) und ergänzend Auswirkungen des Klimawandel auf die Solarstrahlung eingeschätzt (Kapitel 2.2). Da es eine Vielzahl an fundierter Fachliteratur zu diesem Thema gibt, werden zum Abschluss des Kapitels noch Hinweise auf weiterführende Literatur gegeben (vgl. Kapitel 2.3).

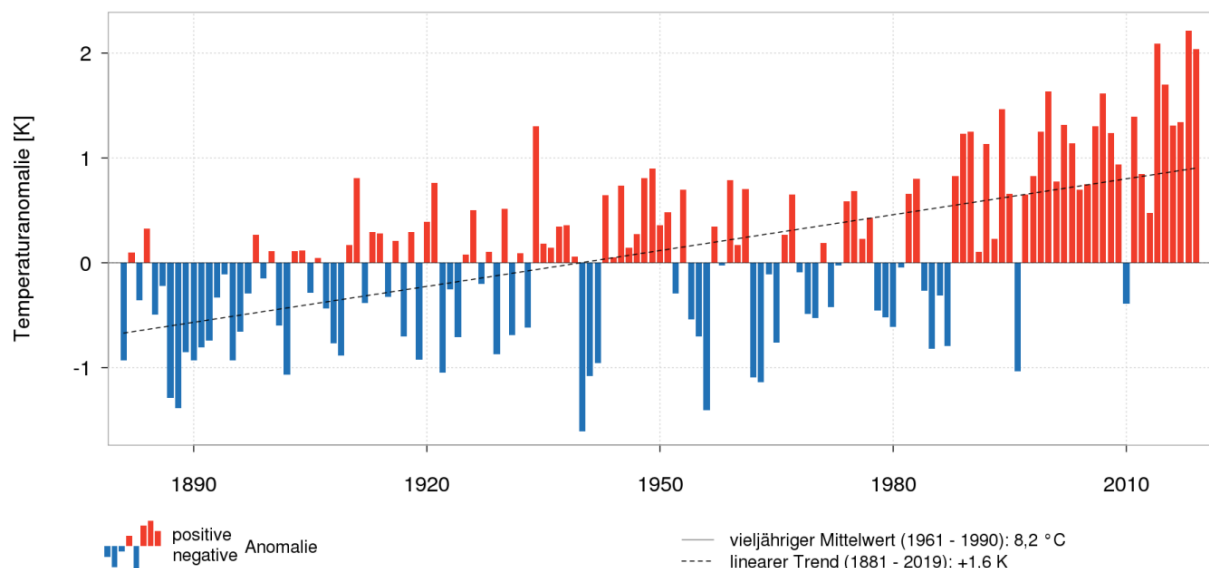
2.1 Außenlufttemperatur

2.1.1 Veränderungen seit Beginn der Industrialisierung bis heute

Wie Auswertungen von Beobachtungsdaten seit Mitte des 19. Jahrhunderts zeigen, erwärmt sich die Erde stetig. Seit den 1960er Jahren hat die Mitteltemperatur der Land- und Wasseroberfläche in Deutschland je Dekade stetig zugenommen. Das bedeutet, dass 2011 bis 2020 die bisher wärmste Dekade darstellt (Schönthaler et al. 2019, S. 18). In Abbildung 8 ist die jährliche Temperaturabweichung vom vieljährigen Mittel des Referenzzeitraums 1961 bis 1990 dargestellt. Daraus lässt sich entnehmen, dass die Mitteltemperatur in Deutschland seit 1881 bereits um 1,6 K angestiegen ist (Deutscher Wetterdienst 2020c).

Abbildung 8: Temperaturanomalie 1881 bis 2019

Abweichung der Jahresmittel der Temperatur für Deutschland vom vieljährigen Mittel des Referenzzeitraums 1961 - 1990



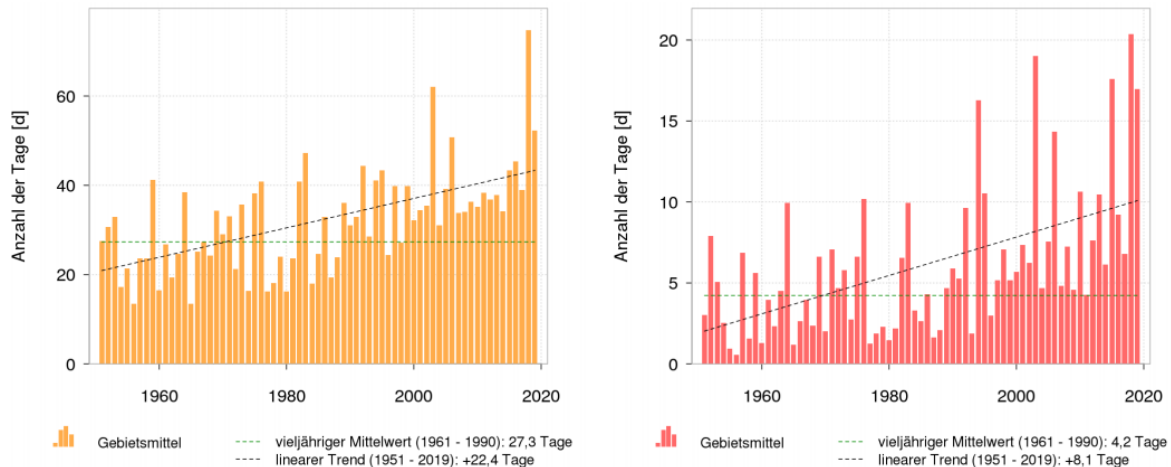
Quelle: (Deutscher Wetterdienst 2020c, S. 16)

Mit der Jahresmitteltemperatur haben auch Hitzeextreme an Häufigkeit und Intensität zugenommen (Schönthaler et al. 2019). In Abbildung 9 sind die Anzahl der Sommertage mit einer Tageshöchsttemperatur von mindestens 25 °C und die Anzahl der heißen Tage mit einer

Tageshöchsttemperatur von mindestens 30 °C von 1951 bis 2019 im Flächenmittel von Deutschland eingetragen. Wertet man den linearen Trend aus, hat sich seit 1951 die Anzahl der Sommertage in etwa verdoppelt, während sich die Anzahl der heißen Tage sogar verdreifacht hat.

Abbildung 9: Sommertage und Heiße Tage (1951 bis 2019)

Gebietsmittel, Mittelwert und linearer Trend für die Anzahl der Sommertage (gelb) und heißen Tage (rot)



Quelle: (Deutscher Wetterdienst 2020c, S. 18)

Steigende Außentemperaturen sind auch anhand der Auswertung der Kühlgradtage erkennbar. Die Kühlgradtage nach Spinoni (Spinoni et al. 2015) summieren die Höhe und Dauer der Überschreitung des Temperaturschwellenwertes von 22 °C für jeden Tag eines Jahres in gewichteter Form auf. Ihre Auswertung gibt ein Maß für den Kühlbedarf und entsprechend für die Anforderung an den sommerlichen Wärmeschutz von Gebäuden. Seit den 1970ern haben sich die Kühlgradtage von jährlich 70 für das Fünffahresmittel auf etwa 140 verdoppelt (Schröder et al. 2019). Auch hat sich der Zeitraum mit Kühlbedarf auf April bis Oktober ausgedehnt (Bettgenhäuser et al. 2011).

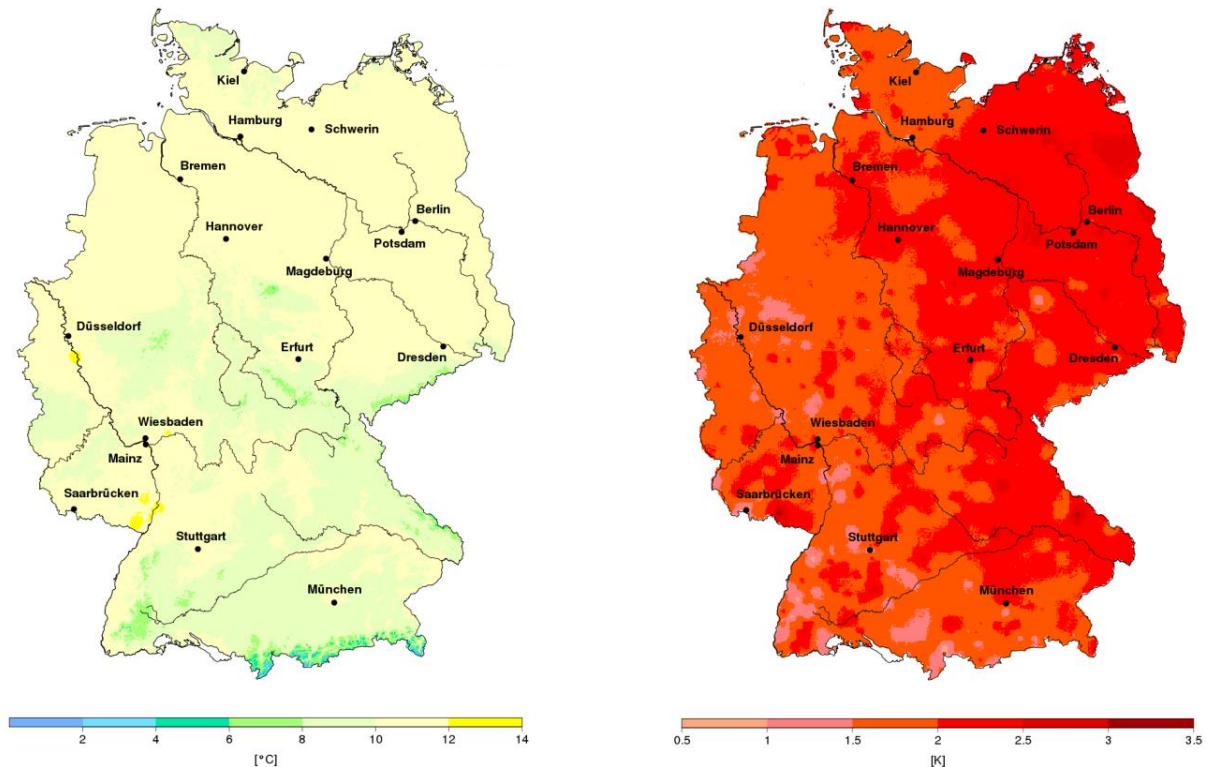
2.1.2 Aktueller Stand

Eine Beschreibung des Klimas umfasst in der Regel Wetterdaten über einen Zeitraum von 30 Jahren, wodurch kurzzeitige Witterungsschwankungen „ausgeklammert“ werden können. Der aktuelle Vergleichszeitraum des DWD beläuft sich auf die Periode von 1981 bis 2010. Für diesen beträgt die mittlere Jahrestemperatur in Deutschland 8,9 °C. Im Vergleich dazu ergab sich für das Jahr 2019 eine Mitteltemperatur von 10,3 °C (Deutscher Wetterdienst 2020c, S. 4).

Das Klima, aber auch die Auswirkungen des Klimawandels sind in Deutschland regional unterschiedlich. Abbildung 10 zeigt beispielhaft für das Jahr 2019 die regional verschiedene Jahresmitteltemperatur in Deutschland sowie die Abweichungen bezogen auf die Mittelwerte der Jahre 1961-1990.

Abbildung 10: Jahresmitteltemperatur 2019 und Abweichung vom vieljährigen Mittelwert

Jahresmittel 2019 (links) sowie die Abweichungen von den vieljährigen Mittelwerten 1961-1990 (rechts) für die Lufttemperatur



Quelle: (Deutscher Wetterdienst 2020c, S. 6)

Um die regionalen Unterschiede hinsichtlich Klimawandel einschätzen zu können, stellt das Umweltbundesamt bundesländerspezifische Auswertungen der Klimaänderungen zur Verfügung (Umweltbundesamt 2020).

2.1.3 Prognosen

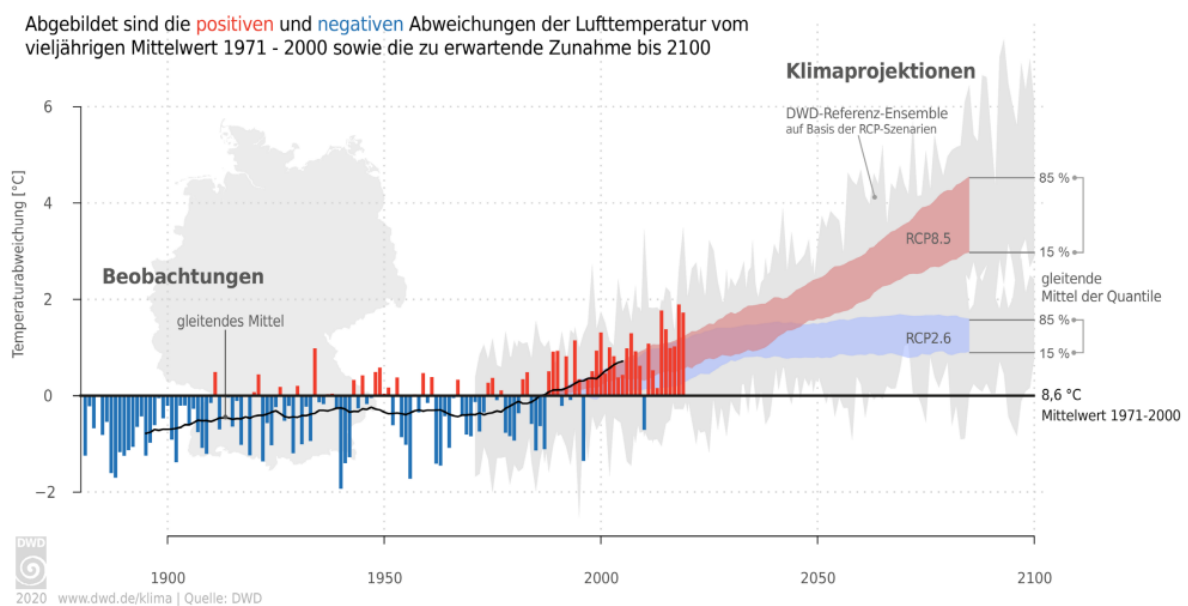
Wissenschaftlich ist es anerkannter Stand, dass ein weiterer Temperaturanstieg zu erwarten ist (Schönthaler et al. 2019). Repräsentative Konzentrationspfade (RCP) aus dem 5. IPCC-Sachstandsbericht definieren unterschiedliche Szenarien für anthropogene Wärmezunahmen auf der Erde durch Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1850. Die Zahl in der Benennung des Konzentrationspfads gibt den entsprechenden anthropogenen Strahlungsantrieb in W/m^2 im Jahr 2100 an.

- RCP2.6 bei Rückgang der Treibhausgaskonzentration
- RCP4.5 bis etwa 650 ppm CO_2 -Äquiv.
- RCP6.0 bis etwa 850 ppm CO_2 -Äquiv.
- RCP8.5 bis etwa 1370 ppm CO_2 -Äquiv.

RCP2.6, entsprechend einem Strahlungsantrieb von $2,6 \text{ W/m}^2$, steht für ein Szenario, bei dem die globale Klimaerwärmung auf unter 2 K gehalten wird und somit für ein Ziel des Pariser Klimaabkommens (DWD 2021a). Ohne zusätzliche Klimaschutzbestrebungen werden Szenarien zwischen RCP6.0 und RCP8.5 erwartet (IPCC 2014).

Um eine möglichst wahrscheinliche Klimaentwicklung zu finden, werden auf Basis eines jeweiligen Szenarios viele Simulationen, die gemeinsam als Ensemble bezeichnet werden, durchgeführt und ausgewertet. Die Auswertung des EURO-CORDEX/ReKliEs-De Ensembles zeigt für das Szenario RCP2.6 eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur in Deutschland um etwa 1 K und für RCP8.5 um etwa 3,8 K im Zeitraum 2071 bis 2100 im Vergleich zu 1971 bis 2000, wie Abbildung 11 zeigt (Hübener et al. 2017). Zwar ist eine etwas stärkere Temperaturzunahme im Winter als im Sommer wahrscheinlich, dennoch nimmt auch im Sommer die mittlere Temperatur für RCP4.5 um 1,3 bis 2,6 K und für RCP8.5 um 2,7 bis 4,8 K zu (Brasseur, Jacob und Schuck-Zöller 2017).

Abbildung 11: Beobachtete und projizierte Temperaturentwicklung für Deutschland 1881 - 2100.



Quelle: (Deutscher Wetterdienst 2020c, S. 22)

Während sich die Anzahl der kalten Tage und der Frosttage im Winter verringert, werden die Sommer durch häufigere, intensivere und länger andauernde Hitzewellen geprägt sein (Umweltbundesamt 2014). Für das RCP8.5-Szenario könnte bis 2100 die Zahl der jährlichen Hitzewellen in Norddeutschland um fünf Ereignisse und in Süddeutschland um 30 Ereignisse ansteigen (Brasseur, Jacob und Schmuck-Zöller 2017).

In Tabelle 7 ist die Zunahme der Sommertage im 30-jährigen Flächenmittel von 2036 bis 2065 für die jeweiligen Bundesländer für RCP2.6 und RCP8.5 im Vergleich zum Beobachtungszeitraum 1971 bis 2000 gelistet. Es fällt auf, dass die nördlichen, meeresnahen Bundesländer tendenziell sowohl weniger Sommertage im Beobachtungszeitraum als auch einen geringeren Anstieg aufweisen als in den südlich gelegenen Bundesländern.

Tabelle 7: Anzahl der Sommertage

Anzahl der Sommertage im 30-jährigen Flächenmittel für die jeweiligen Bundesländer nach dem GERICS-Bundesländer-Check auf Basis der Klimaensembles von EURO-CORDEX und ReKliEs-De

	Beobachtung Referenz- zeitraum 30-jähriges Flächen- mittel 1971 - 2000	RCP2.6 30-jähriges Flächen- mittel 2036 - 2065	RCP8.5 30-jähriges Flächen- mittel 2036 - 2065
Schleswig-Holstein	17 Tage	+ 4 Tage	+ 6 Tage
Mecklenburg-Vorpommern	22 Tage	+ 5 Tage	+ 8 Tage
Hamburg	23 Tage	+ 5 Tage	+ 8 Tage
Niedersachsen und Bremen	25 Tage	+ 6 Tage	+ 9 Tage
Nordrhein-Westfalen	27 Tage	+ 7 Tage	+ 11 Tage
Thüringen	28 Tage	+ 8 Tage	+ 13 Tage
Saarland	29 Tage	+ 9 Tage	+ 16 Tage
Hessen	29 Tage	+ 8 Tage	+ 14 Tage
Bayern	31 Tage	+ 9 Tage	+ 16 Tage
Baden-Württemberg	32 Tage	+ 9 Tage	+ 17 Tage
Rheinland-Pfalz	32 Tage	+ 9 Tage	+ 15 Tage
Sachsen	35 Tage	+ 9 Tage	+ 14 Tage
Sachsen-Anhalt	36 Tage	+ 8 Tage	+ 13 Tage
Brandenburg und Berlin	36 Tage	+ 8 Tage	+ 13 Tage

Quelle: (GERICS 2020)

Auch die Zahl der Tropennächte, in denen die Außenlufttemperatur nicht unter 20 °C fällt, wird sich erhöhen. Während im 30-jährigen Flächenmittel (1971 – 2000) in 10 Bundesländern noch keine oder in den restlichen nur eine Tropennacht pro Jahr zu verzeichnen war, werden nach RCP2.6 im Flächenmittel für die Jahre 2036 bis 2065 in allen Bundesländern ein bis zwei Tropennächte und nach RCP8.5 ein bis vier Tropennächte pro Jahr erwartet (GERICS 2020).

Bei den gemachten Prognosen ist zu beachten, dass es sich bei den aufgezeigten Klimaprojektionen bzw. -prognosen zur Temperaturzunahme um Vorhersagen handelt, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Um diese Unsicherheiten einzuschätzen, werden bei den Klimamodellen Ensembleberechnungen durchgeführt, wodurch eine Lösungsvielfalt entsteht und Unsicherheiten verringert werden können. Im 5. IPCC Bericht werden aufgrund der Unsicherheiten Aussagen mit Wahrscheinlichkeitsangaben versehen (IPCC 2014). Die globalen Klimaszenarien und Auswirkungen müssen für die aufgeführten Einschätzungen regional verfeinert werden, wofür wiederum Klimamodell-Projektionen mit Unsicherheiten durchgeführt werden (vgl. DWD 2019).

Vereinfacht ausgedrückt unterliegen die Temperaturvorhersagen Unsicherheiten, die Einflussfaktoren auf das Klima betreffen (z.B. Bevölkerungsentwicklung oder Vulkanausbrüche), Unsicherheiten, die in Zusammenhang mit dem begrenzten Wissen über Dynamiken des Klimasystems stehen (z.B. positive und negative Rückkopplungsprozesse oder Kippunkte) sowie Unsicherheiten bezüglich Defiziten von Klimamodellen (Wiki Klimawandel 2021).

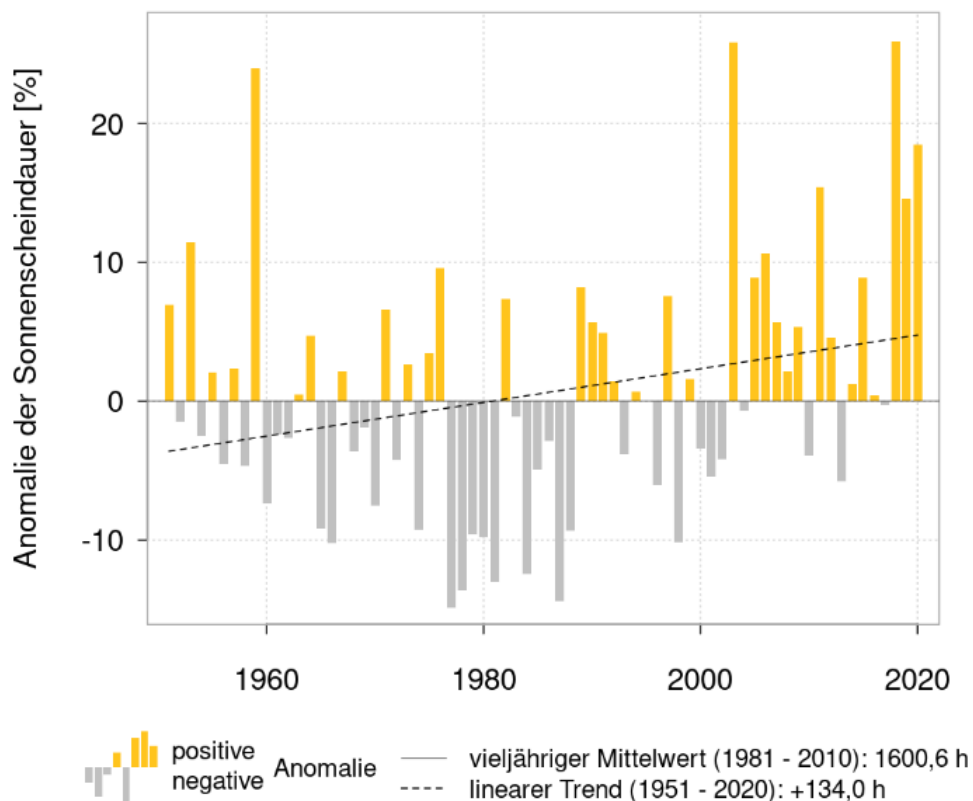
2.1.4 Urbaner Wärmeinsel-Effekt

Ein besonderer Effekt, der unter den Begriffen Urbaner Wärmeinsel-Effekt, Urbaner Hitzeinsel-Effekt oder Heat Island Effect bekannt ist, ist im Zusammenhang mit dem Klimawandel von besonderer Bedeutung. Der Effekt beschreibt, dass Temperaturen in der Stadt deutlich über denen im unbewohnten Umland liegen. Ursachen sind u.a. urbane Versiegelung, die zu verminderter Verdunstungskühlung führen, dunkle Bodenflächen und Gebäude, welche sich im Sommer durch die Solarstrahlung verstärkt aufheizen, anthropogene Wärmeerzeugung und veränderte Windverhältnisse. Der Effekt ist besonders in den Sommermonaten und auch insbesondere nachts stark ausgeprägt (Offermann et al. 2022).

2.2 Solarstrahlung

Die Solarstrahlung trägt insbesondere durch Transmission durch transparente Bauteile maßgeblich zum Wärmeintrag in Gebäuden bei. Unter Globalstrahlung versteht man die auf eine horizontale Ebene auftreffende Solarstrahlung, welche sich aus direkter und diffuser Sonnenstrahlung zusammensetzt und in W/m^2 angegeben wird. Der Deutsche Wetterdienst dokumentiert in seinen Wetterstationen neben anderen Werten auch die Globalstrahlung und die jährliche Dauer der direkten Sonneneinstrahlung, welche als Sonnenscheindauer bezeichnet wird. Wie in Abbildung 12 dargestellt, ist die Sonnenscheindauer in Deutschland in den letzten Jahrzehnten leicht gestiegen und lag im Beobachtungszeitraum 1981 bis 2010 bei durchschnittlich 1.601 Stunden pro Jahr (Deutscher Wetterdienst 2020c).

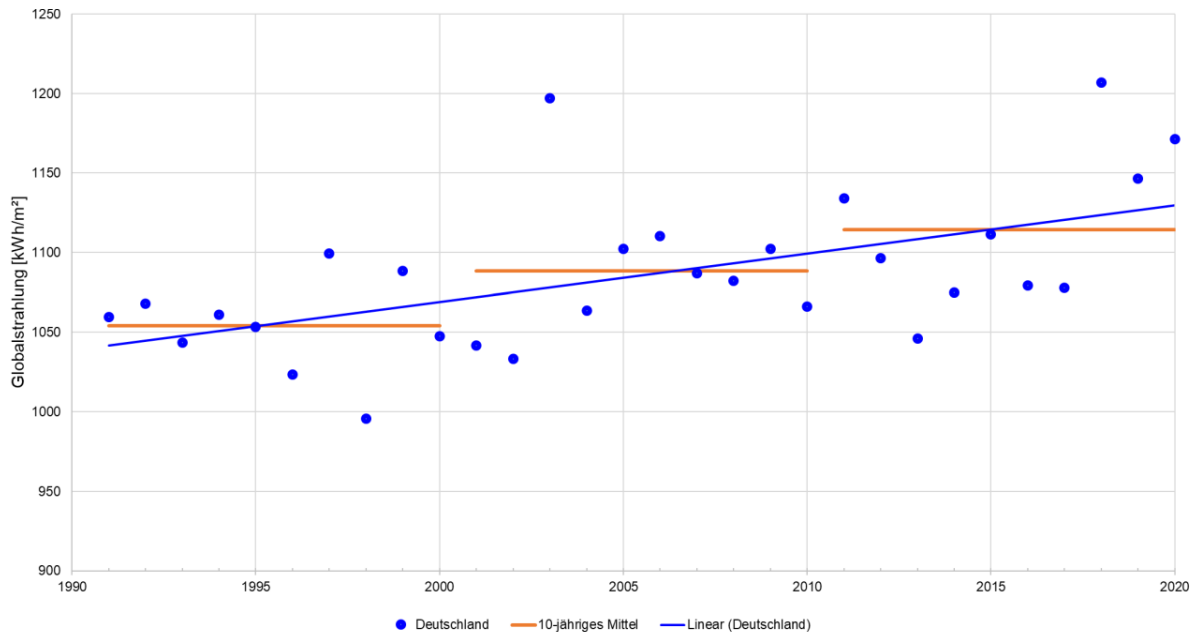
Abbildung 12: Anomalie der Sonnenscheindauer Deutschland mit Referenzzeitraum 1961 - 1990



Quelle: (Deutscher Wetterdienst 2020c)

Auch die Auswertung der Jahressummen der Globalstrahlung von 1990 bis 2020 zeigt einen leicht zunehmenden Trend (vgl. Abbildung 13). Zu sehen ist die jährliche Summe der Globalstrahlung (s. blaue Punkte). Die blaue Linie entspricht dem linearen Trend. Die waagrechten, orangen Linien sind die jeweiligen 10-jährigen Mittelwerte. Im Mittel hat sich die Jahressumme der Globalstrahlung jährlich um $2,93 \text{ kWh/m}^2$ erhöht. Deutscher Wetterdienst 2022a)

Abbildung 13: Jahressummen der Globalstrahlung in Deutschland 1990 - 2020



Quelle: (Deutscher Wetterdienst 2022a)

Seit etwa 1982 kann ein leicht ansteigender Trend der jährlichen Solarstrahlung in Deutschland festgestellt werden. Wie lang genau dieser anhalten wird und wie sich der Klimawandel auf die Globalstrahlung auswirken wird ist unklar (Deutscher Wetterdienst 2007). Die Auswertung der EURO-CORDEX/ReKliEs-De Ensembles zeigt bis Ende des 21. Jahrhunderts keine signifikanten Änderungen der Globalstrahlung (Hübener et al. 2017).

Die Globalstrahlung unterliegt Schwankungen in unterschiedlichen Zeiträumen: Die jährlichen Schwankungen werden von Schwingungen mit Zyklen über mehrere Dekaden sowie über Jahrtausende überlagert. Neben der Sonnenaktivität und der Erdbahn um die Sonne hängt die auf der Erde ankommende Globalstrahlung auch von der Beschaffenheit der Atmosphäre (Bewölkungsgrad, Aerosole) ab (Umweltbundesamt 2013).

2.3 Fazit und Literaturhinweise

Die Auswertung von Fachliteratur zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Außentemperatur ermöglicht eine Einschätzung der derzeitigen Situation: Der Klimawandel ist auch in Deutschland schon anhand zunehmender Jahresmitteltemperaturen und ansteigender Anzahl von Sommertagen in den letzten Jahren und Dekaden zu erkennen. Bei der Betrachtung der komplexen Thematik der Klimaprognosen zeigt sich, dass in Abhängigkeit des Szenarios mit mehr oder weniger stark ansteigenden Temperaturen gerechnet werden muss. Da im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht detaillierter auf diese Thematik eingegangen werden kann, soll auf einschlägige Fachliteratur verwiesen werden.

Informationen zu Klimadaten und -wandel sind beispielsweise zu finden unter:

- ▶ Climate Service Center Germany (GERICS) unter www.climate-service-center.de
- ▶ Deutsches Klimavorsorge-Portal unter www.klivoportal.de
- ▶ DWD-Homepage unter <http://www.dwd.de> z.B. der aktuelle Klimastatusbericht
https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_20.html
- ▶ IPCC - Deutsche Koordinierungsstelle unter www.de-ipcc.de (mit Möglichkeit zum Download der IPCC-Berichte)
- ▶ Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De) unter reklies.hlnug.de
- ▶ UBA-Homepage unter www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel.
Hier ist auch der Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie (Schönthaler et al. 2019) sowie die „Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland“ (Kahlenborn et al. 2021) herunterzuladen, die einen sehr guten Überblick über den derzeitigen Stand und die Folgen des Klimawandels geben.

3 Grundlagen

3.1 Raumtemperatur

3.1.1 Begriffsbestimmung

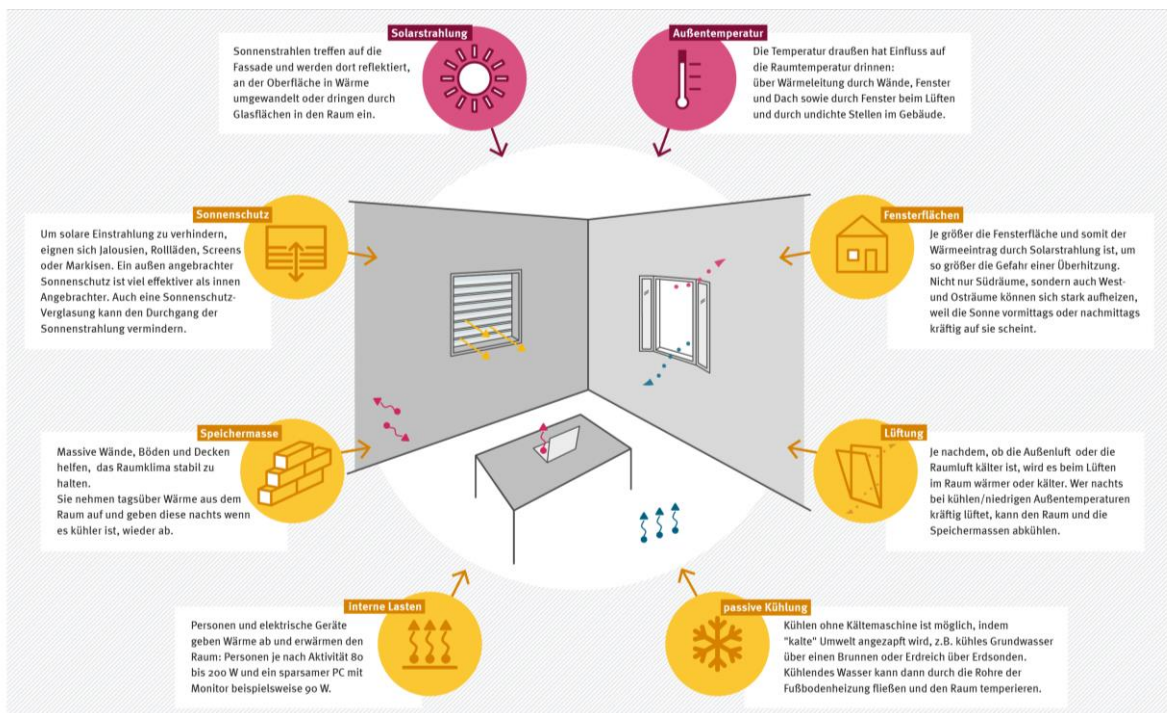
Bei der Innentemperatur oder Raumtemperatur ist im Zusammenhang mit Behaglichkeit gewöhnlich nicht die Lufttemperatur im Raum gemeint, sondern die operative Raumtemperatur, die neben der Lufttemperatur auch die Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen berücksichtigt. Die DIN EN 16798-1 definiert „operative Temperatur“ als „gleichmäßige Temperatur eines imaginären schwarzen Raumes, in dem eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauschen würde wie in der bestehenden ungleichmäßigen Umgebung.“ Sie wird aus dem arithmetischen Mittel der Lufttemperatur und der mittleren Temperatur der Umschließungsflächen berechnet.

Die operative Raumtemperatur wird auch als Empfindungstemperatur bezeichnet, weil sie dem menschlichen Temperaturempfinden entspricht. Im Folgenden ist mit Raumtemperatur die operative Raumtemperatur gemeint.

3.1.2 Einflussgrößen

Neben klimatischen Einflüssen wie Außenlufttemperatur, Solarstrahlung und Wind haben eine Vielzahl weiterer Parameter Auswirkungen auf die resultierende Raumtemperatur. Diese sind grafisch in Abbildung 14 dargestellt und nachfolgend aufgelistet:

- ▶ Fensterflächenanteil
- ▶ Fensterorientierung und -neigung
- ▶ Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung
- ▶ Wirksamkeit der Sonnenschutzvorrichtung oder Verschattung
- ▶ Wärmespeicherfähigkeit der raumumschließenden Flächen
- ▶ Interne Wärmelasten
- ▶ (Nacht-)Lüftung
- ▶ Raumkonditionierung

Abbildung 14: Einflussgrößen auf die Raumtemperatur

Quelle: eigene Darstellung, IBH

3.1.3 Messungen

Eine Vielzahl von Untersuchungen mit Auswertung von Sommer-Raumtemperaturen und von Behaglichkeitskriterien ist in der Fachliteratur vorhanden, z.B. (Gossauer 2008), (Menard et al. 2009) oder Messungen im Rahmen des Projektes (HeatResilientCity 2021). Aus diesen lassen sich zwar nicht allgemeine Aussagen ableiten, da oft nur spezielle Fragestellungen untersucht werden, jedoch lässt sich durch diese der Handlungsbedarf veranschaulichen.

Für eine Einschätzung sollen einige Arbeiten mit Messungen der Raumtemperatur von Wohngebäuden vorgestellt werden.

- ▶ (Schröder et al. 2019): In dieser Studie konnten über elektronische Heizkostenverteiler stündliche Temperaturmessungen erfasst werden. Hierfür wurden 90 Wohnungen in einem teilsanierten Bestandswohnblock in Leipzig und 48 Wohnungen in einer Münchner Neubau-Wohnanlage ausgewertet. Es konnte festgestellt werden, dass frühere sommerliche Hitzeperioden die Wohnraumtemperaturen nur um 2-3 K auf etwa 25 °C anhoben, die Hitzeperioden 2015 und 2018 jedoch im Mittel einen Anstieg der Wohnraumtemperaturen um 5 K bewirkten. Außerdem wurde beobachtet, dass es in Neubauten mit EnEV-2009-Standard häufiger zu Überhitzung kommt als in älteren Gebäuden.
- ▶ (Kunze 2019): Im Rahmen des Forschungsprojekts (HeatResilientCity 2021) wurden in einem unsanierten Dresdner Wohngebäude aus den 1970er Jahren Temperatur-Messungen während des außergewöhnlich heißen Sommers 2018 durchgeführt. In den einzelnen Räumen gab es Maximalwerte zwischen 28,5 °C (Erdgeschoss) und 35,8 °C (5. Obergeschoss). In einem anderen untersuchten Raum mit einer maximalen Innenraumtemperatur von 33 °C gab es eine zusammenhängende Periode von 19 Tagen, in der die Innenraumtemperatur nie unter 27 °C gesunken ist.

- (tado 2020): Eine von der tado GmbH durchgeführte Studie hat gezeigt, dass die Raumtemperaturen der meisten Haushalte in Deutschland und in anderen europäischen Ländern im Sommer zu hoch sind. Hierfür wurden Messungen in 150.000 Haushalten im Zeitraum von Juni bis August 2019 in Europa durchgeführt. Für die in Deutschland durchgeführten Messungen ermittelte sich eine durchschnittliche Raumtemperatur von 24,1° C.

3.2 Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz in Gebäuden

Gebäude dienen bei sommerlichen Temperaturen auch als Schutz vor Hitze. Damit Gebäude dieser Funktion gerecht werden, ist bei der Planung und Ausstattung einiges zu beachten.

Nachfolgend wird eine Übersicht über Maßnahmen gegeben, die beitragen, eine zu hohe Erwärmung von Räumen bei hohen sommerlichen Außentemperaturen zu vermeiden. Bei all diesen Maßnahmen handelt es sich um „passive“ Maßnahmen, d.h. es werden keine kälteerzeugenden Systeme eingesetzt. Es gibt jedoch auch passive Maßnahmen, für die Energie benötigt wird, um kühlende Medien zu transportieren. Diese als „passive Kühlung“ bezeichneten Maßnahmen sollen anschließend noch genauer definiert und erläutert werden (Kapitel 3.2.2). Um die Abgrenzung zur „aktiven Kühlung“ zu verdeutlichen, wird ergänzend eine Übersicht über gängige aktive Maßnahmen gegeben (Kapitel 3.2.3).

3.2.1 Passive Maßnahmen im Überblick

Es gibt eine Vielzahl an passiven Maßnahmen, die dem sommerlichen Wärmeschutz dienen. Diese werden nachfolgend aufgeführt und kurz beschrieben.

► Geringer Fensterflächenanteil

Während solare Gewinne in der Heizperiode erwünscht sind, so zählen diese zu den Hauptursachen einer sommerlichen Überhitzung im Gebäude. Um hohe solare Einträge zu verhindern, zählt ein mäßiger bis geringer Fensterflächenanteil zu den wichtigsten Maßnahmen. Im Zusammenhang mit Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz ist hierfür der Wert des grundflächenbezogenen Fensterflächenanteils f_{WG} charakterisierend (zum Einfluss des f_{WG} und der Fensterorientierung vgl. Kapitel 5.1.2, zu Auswirkungen des f_{WG} auf den ganzjährigen Energiebedarf vgl. Kapitel 5.4).

► Sonnenschutzverglasung

Wieviel Wärme durch eine Verglasung in den dahinter liegenden Raum gelangt, hängt vom g-Wert der Verglasung ab. Der g-Wert gibt den Gesamtenergiedurchlass der Verglasung an. Bei einer 3-fach Wärmeschutzverglasung liegt dieser bei rund 0,5, bei einer 2-fach Wärmeschutzverglasung bei rund 0,6. Soll der solare Eintrag reduziert werden, bieten sich Sonnenschutzverglasungen an, bei denen durch Beschichtungen auf der Position 2 (Innenseite der äußeren Scheibe) der nach außen reflektierte Anteil der Solarstrahlung – insbesondere der langwelligen Infrarotstrahlung – erhöht wird. Mit Sonnenschutzverglasungen lässt sich der g-Wert deutlich reduzieren. Typische Sonnenschutzverglasungen weisen g-Werte von 0,27 bis 0,37 und sogar bis zu 0,15 auf. Alternativ oder zusätzlich lässt sich der solare Eintrag auch über eine Bedruckung reduzieren.

► Sonnenschutz

Um solare Einträge über Fensterflächen zu verhindern, kann ein außenliegender Sonnenschutz eingesetzt werden. Hierfür können Jalousien, Screens, Markisen, Rollläden eingesetzt werden und auch eine Verschattung durch Bauteile wie Vordächer oder andere Gebäudeteile kann einen Betrag leisten. Ferner kann ein innenliegender Sonnenschutz solare Einträge mindern, jedoch nicht so effektiv. Wie wirksam ein außenliegender oder innenliegender Sonnenschutz ist, wird durch den Abminderungsfaktor F_c charakterisiert. In Tabelle 8 sind ausgewählte F_c -Werte nach DIN 4108-2 zusammengestellt.

Tabelle 8: Sonnenschutz – Beispiele für Abminderungsfaktoren

	Sonnenschutz- wirkung	Abminderungsfaktor F_c nach DIN 4108-2
Außenliegender Sonnenschutz		
Jalousie mit drehbaren Lamellen	hoch	0,25 (45° Lamellenstellung)
Markise parallel zur Verglasung (Screen)	hoch	0,25
Rollläden	hoch	0,30 (3/4 geschlossen)
Innenliegender Sonnenschutz		
Jalousie	gering	0,65
heller Vorhang mit geringer Transparenz	gering	0,75

F_c -Werte können nur in Verbindung mit der Verglasung angegeben werden, da diese Einfluss auf den F_c -Wert hat. Die in der Tabelle angegebenen F_c -Werte beziehen sich auf eine 2-Scheiben Wärmeschutzverglasung.

Quelle: (DIN 4108-2:2013-02)

Vereinfacht lässt sich durch Multiplikation vom g -Wert der Verglasung und dem F_c -Wert des Sonnenschutzes der Wert g_{tot} , also der Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases einschließlich Sonnenschutz, berechnen (s. hierzu Kapitel 3.4.1).

► Nachtlüftung

Der Effekt, dass die Außenlufttemperatur während der Nacht und in den frühen Morgenstunden abkühlt, kann mittels Lüftung genutzt werden, das Gebäude auszukühlen. Besonders effektiv ist die Nachtlüftung bei hohen Luftwechseln und, wenn Speichermassen (z.B. massive Decken, Wände, Bodenaufbauten) ausgekühlt werden können. Ab einem 2-fachen nächtlichen Luftwechsel, d.h. die Luft wird in einer Stunde 2-mal ausgetauscht, spricht man nach DIN 4108-2¹ von einer erhöhten Nachtlüftung, ab einem 5-fachen Luftwechsel von einer hohen Nachtlüftung. Die Belüftung kann hierbei entweder über vom Bewohner öffnen- und schließbaren Fenstern bei Wohnnutzung oder bei Nichtwohngebäuden über einbruchssichere und witterungsgeschützte Fassadenöffnungen (z.B. Lüftungselemente, Kippflügel, die u.U. motorisch betrieben werden) erfolgen. Ein hoher Luftwechsel lässt sich bei natürlicher Lüftung über Querlüftung oder über thermischen Auftrieb z.B. in Atrien erreichen, beispielsweise in Kombination mit im Dach integrierten Abluftventilatoren. Alternativ kann der Luftwechsel mechanisch über eine Lüftungsanlage

¹ Bezug genommen wird im Rahmen dieser Studie immer auf die Version DIN 4108-2:2013-02.

mit Zu- und Abluft, bei der die Wärmerückgewinnung über einen Bypass umgangen wird, erzeugt werden.

► Passive Kühlung (s. nächstes Kapitel 3.2.2)

Gebäude lassen sich auch effektiv über kühle bzw. abgekühlte Medien temperieren. Als Medien kommen Wasser über Flächenheizsysteme (z.B. Nutzung Fußbodenheizung auch zum Kühlen, Bauteilaktivierung, Heiz-/Kühlsegel) oder Luft über die RLT-Anlage in Frage. Als Kältequelle bei wassergeführten Systemen können beispielsweise Grundwasser oder Erdsonden bzw. -kollektoren, bei einer Lüftungsanlage ein Erdwärmetauscher zur Vortemperierung, eine adiabate Kühlung, die über den Kühleffekt bei der Verdunstung von Wassertröpfchen funktioniert, oder nächtliche kühle Außenluft (=Nachtlüftung s.o.), dienen. Die verschiedenen Arten passiver Kühlmaßnahmen werden in Kapitel 3.2.2 erläutert.

► Speichermassen

Speichermassen dienen dazu, Temperaturschwankungen auszugleichen, indem bei hohen Raumtemperaturen Wärme zwischengespeichert wird, die bei kühleren Temperaturen wieder abgegeben wird.

Zur Beurteilung der Wärmespeicherfähigkeit dient eine Berechnung der wirksamen Wärmekapazität c_{wirk} . Hierbei werden nur Speichermassen berücksichtigt, die auch als Wärme- bzw. Kältepuffer raumseitig zur Verfügung stehen, d.h. Speichermassen, die oberflächennah sind bzw. nicht von einer Dämmung oder Luftschicht (z.B. Abhangdecke) abgeschirmt werden.

Nach DIN 4108-2 erfolgt in Abhängigkeit der auf die Nettoraumfläche A_G bezogenen wirksamen Wärmekapazität eine Einteilung in schwere ($C_{\text{wirk}}/A_G > 130 \text{ Wh/Km}^2$), mittlere ($50 \text{ Wh/Km}^2 \leq C_{\text{wirk}}/A_G \leq 130 \text{ Wh/Km}^2$) und leichte Bauweise ($C_{\text{wirk}}/A_G < 50 \text{ Wh/Km}^2$).

► Städtebaulicher Kontext

Im urbanen Kontext kommt es durch den sogenannten urbanen Wärmeinsel-Effekt zu einer stärkeren Erwärmung der Außenluft im Vergleich zu ländlichen Regionen (siehe Kapitel 2.1.4).

Nachfolgend sind zwei Maßnahmen genannt, die diesem Effekt entgegenwirken können (Offermann et al. 2022), (Fahrion et al. 2020):

- Solarer Strahlungsreflexionsgrad (SRI)

Im urbanen Kontext kommt es in Abhängigkeit von Oberflächenfarbe und -beschaffenheit von Dachflächen, Fassaden und versiegelten Flächen zu einer erhöhten Absorption von Solarstrahlung. Als Kenngröße hierfür dienen der SRI (solar reflectance index), der sich aus solarem Strahlungsreflexionsgrad und thermischen Emissionsgrad errechnet, oder mit Einschränkung auch die Albedo, welche das Rückstrahlvermögen ohne Berücksichtigung des thermischen Emissionsgrades angibt. Eine Farbwahl mit hohem SRI-Wert (helle Farben) ist anzustreben, um den absorptiven Beitrag zum Wärmeinseleffekt gering zu halten.

- Begrünung

Dach- und Fassadenbegrünung und Bepflanzung von Freiflächen mit Bäumen haben einen positiven Einfluss auf das Mikroklima (kühlender Effekt durch Transpiration und Verschattung) und können die Überwärmung von Städten, genannt Wärme- bzw. Hitzeinseleffekt, abmildern. Die Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen sind komplex, jedoch konnten verschiedene Studien den kühlenden Effekt von Bepflanzung auch durch Messungen belegen (Brune et al. 2017), (Fahrion et al. 2020).

Ausführlich werden die Maßnahmen gegen Hitzeinseln in Städten in einem anderen UBA-Forschungsprojekt behandelt, auf welches verwiesen wird:

UBA-Forschungsprojekt „Nachhaltige Gebäudeklimatisierung in Europa - Konzepte zur Vermeidung von Hitzeinseln und für ein behagliches Raumklima“ (Offermann et al. 2022)

Dem UBA-Forschungsbericht können folgende Informationen/Handlungsempfehlungen entnommen werden:

- Ausführliche Erläuterung des urbanen Hitzeinseleffekts und dessen Ursachen
- Maßnahmenpakete für klimaresiliente Gebäude und Quartiere
- Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Wärmeinseln

3.2.2 Passive Kühlung

3.2.2.1 Definition

Passive Kühlung kann das thermische Verhalten von Räumen positiv beeinflussen. Nach DIN 4108-2 ist unter passiver Kühlung zu verstehen, „wenn zur Raumkühlung Systeme eingesetzt werden, bei denen Energie ausschließlich zur Förderung des Kühlmediums erforderlich ist. Vorausgesetzt wird eine fallspezifische Auslegung des Systems, in der Regel thermisch aktivierte Bauteile mit Nutzung eines Sohlplattenkühlers oder Erdwärmetauschers (geothermische Kühlung, kein bivalenter Betrieb mit Kältemaschinen) oder Systeme mit Kühlung über indirekte Verdunstung (monovalente Betriebsweise).“

Nach (Radermacher 2019) können zur passiven Kühlung nach Definition der DIN4108-2 auch eine natürliche oder mechanische Tag- bzw. Nachtlüftung, eine thermische Bauteilaktivierung mit Außenluft oder Erdreich als Wärmesenke, eine adiabate Kühlung durch Verdunstung sowie eine freie Kühlung über ein Rückkühlwerk zugeordnet werden. Weiter führt (Radermacher 2019) aus, dass eine eindeutige Begriffsdefinition der passiven Kühlung sich als schwierig darstellt, da auch andere Definitionen kursieren, die Maßnahmen mit jeglicher Energieaufwendung ausschließen. In anderen Literaturstellen wird einzig die freie Kühlung mit Nachtlüftung als passive Kühlung angesehen.

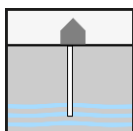
Im Rahmen dieser Arbeit wird als Oberbegriff „passive Maßnahme“ verwendet, welcher alle Maßnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes einbezieht, mit Ausnahme einer aktiven Kälteerzeugung. Unter „passiver Kühlung“ sind passive Maßnahmen zu verstehen, bei denen ein kühlendes Medium bewegt und verteilt wird, wobei jegliche aktive Kälteerzeugung auszuschließen ist. Zur passiven Kühlung nach dieser Definition zählt auch eine Nachtlüftung über Fenster.

3.2.2.2 Arten passiver Kühlung

Passive Kühlung bedeutet nach vorangegangener Definition, dass keine Energie für die Kälteerzeugung, jedoch für den Transport eines Kühlmediums eingesetzt werden darf. Als Transportmedium kann Wasser oder Luft dienen.

Beim Kühlmedium Wasser kann die passive Kälteerzeugung beispielsweise erfolgen über

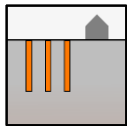
► Grundwasser



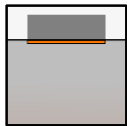
Um Grundwasser thermisch nutzen zu können, bedarf es der Förderung und Rückführung des Grundwassers über einen Saug- und Schluckbrunnen. Für die Förderung werden Unterwasserpumpen eingesetzt.

► Solekreislauf

Eine als Sole bezeichnete frostsichere Flüssigkeit zirkuliert in Rohren, welche die Wärme aus dem Gebäude an das Erdreich abgeben. Für die Solezirkulation werden Pumpen eingesetzt. Zur Wärmeübertragung in das Erdreich dienen z.B.



- Erdsonden und -kollektoren

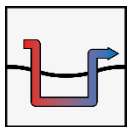


- Bohrpfähle oder Bodenplatte

Kälte des Grundwassers bzw. der abgekühlten Sole wird dann über einen Wärmetauscher an das Kühlwassersystem des Gebäudes übertragen und zum Kälteübergabesystem (z.B. Fußbodenheizung, Bauteilaktivierung, Kühldecke) weitergeleitet.

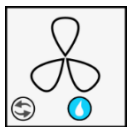
Beim Kühlmedium Luft kann die Zuluft beispielsweise (vor-)temperiert bzw. gekühlt werden durch einen

► Erdkanal



Bei einem Erdkanal (auch Luft-Erdwärmetauscher) werden Rohre im Erdreich verlegt, durch welche die Außenluft geführt wird. Dadurch wird die Außenluft im Sommer abgekühlt, bevor sie zum Lüftungsgerät geführt und im Gebäude verteilt wird.

► Adiabate Kühlung (Nutzung von Verdunstungskälte)



Bei der adiabaten Kühlung entzieht verdunstendes Wasser der Luft Wärme. Hierfür wird die Abluft (vor dem Wärmetauscher) im Lüftungsgerät befeuchtet, wodurch eine Abkühlung hervorgerufen wird, welche über den Wärmetauscher an die Zuluft „abgegeben“ wird. So ist eine Abkühlung der Außenluft um bis zu etwa 10 K möglich (Radermacher 2019). Die Effektivität ist jedoch maßgeblich von der Feuchte der Außenluft abhängig und sinkt bei hoher Luftfeuchtigkeit.

Für die Verteilung werden in der Regel Lüftungskanäle und -auslässe einer Lüftungsanlage verwendet (Ausnahme: Nachtlüftung über Fenster).

Im Gegensatz zur aktiven Kühlung mit Auslegung der Systeme auf ein bestimmtes Raumtemperaturniveau ist bei der passiven Kühlung nur eine Temperierung der Räume möglich.

3.2.3 Aktive Kühlung

Untersuchungsgegenstand dieser Forschungsarbeit ist, Möglichkeiten von passiven Maßnahmen zu charakterisieren und zu bewerten. Dennoch soll hier – auch zur begrifflichen Abgrenzung – der Begriff „aktive Kühlung“ im Sinne dieser Forschungsarbeit definiert werden.

Unter aktiver Kühlung wird nachfolgend in Kältemaschinen oder Klimageräten erzeugte Kälte verstanden. Hierbei durchläuft ein Kältemittel über Verdampfen und Kondensieren einen thermodynamischen Kreisprozess, bei dem Wärme zugeführt und entzogen wird. Kältemaschinen lassen sich mit Strom betreiben (z.B. elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen) oder thermisch (z.B. Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen). Kältemaschinen kühlen ein Medium (i.d.R. Wasser) ab, welches dann dem Gebäude über kalte Oberflächen oder der Zuluft über

ein Kühlregister Wärme entzieht, bei der Direktverdampfung (Monosplit-, Multisplit- und VRF-Technik) wird warme Raumluft am Kältemittel vorbeigeführt, das beim Verdampfen der Raumluft Wärme entzieht.

Die Kennzahl EER (Energy Efficiency Ratio) gibt die Energieeffizienz der Kälteerzeugung an. Der EER wird als Quotient der Kälteleistung bezogen auf die elektrischen Leistungsaufnahme berechnet. Der EER wird für den Auslegungsfall ermittelt und ist abhängig vom Verdichtertyp, dem Kältemittel und der Austrittstemperatur (vgl. DIN V 18599-7). Im Jahresverlauf ändert sich die Effizienz der Kälteerzeugung abhängig von der Außentemperatur und dem Teillastfaktor. Die Effizienz über das ganze Jahr gemittelt wird durch die Kenngröße des SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) beschrieben. Der SEER gibt das Verhältnis aus Jahreskälteerzeugung und dem jährlichen Strombedarf für die Kälteerzeugung an und berücksichtigt daher sowohl das reale Verhalten unter Teillastbedingungen als auch variable Außenlufttemperaturen.

3.3 Gesetze, Normen und sonstige Vorgaben

Nachfolgend wird ein Überblick über gesetzliche Vorgaben, DIN-Normen, Richtlinien und weitere Vorgaben den sommerlichen Wärmeschutz betreffend gegeben.

3.3.1 Gebäudeenergiegesetz

Nach Gebäudeenergiegesetz GEG § 14 „Sommerlicher Wärmeschutz“ gilt:

„Ein Gebäude ist so zu errichten, dass der Sonneneintrag durch einen ausreichenden baulichen sommerlichen Wärmeschutz nach den anerkannten Regeln der Technik begrenzt wird.“

Ein ausreichender sommerlicher Wärmeschutz liegt nach GEG vor, wenn die Anforderungen nach DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 8 eingehalten werden. Sowohl das Kennwerteverfahren nach Abschnitt 8.3 DIN 4108-2 als auch der Nachweis über thermische Gebäudesimulation nach Abschnitt 8.4 DIN 4108-2 sind nach GEG zugelassen. Auf Berechnungen kann unter den Voraussetzungen des Abschnitts 8.2.2 der DIN 4108-2: 2013-02 gänzlich verzichtet werden.

Bei Gebäuden mit Anlagen zur Kühlung, bei denen der Nachweis nach Abschnitt 8.4 DIN 4108-2 durchgeführt wird, sind bauliche Maßnahmen nur so weit vorzusehen, sofern sich die Investitionen durch die Einsparung von Energiekosten zur Kühlung innerhalb der Nutzungsdauer wieder erwirtschaften lassen.

Die Vorgaben des § 14 GEG richten sich an Neubauten. Nach GEG § 51 „Anforderungen an ein bestehendes Gebäude bei Erweiterung und Ausbau“ sind die o.g. Vorgaben auch auf Erweiterungen und Ausbauten mit einer hinzukommenden Nutzfläche größer als 50 m² einzuhalten. An Bestandsgebäude und bei Sanierungen werden diese Anforderungen nicht gestellt.

Im GEG § 14 wird explizit auf die Tageslichtversorgung hingewiesen, die in Konkurrenz mit Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz stehen kann.

3.3.2 Sommerlicher Wärmeschutz nach DIN 4108-2

Einleitend zu diesem Kapitel sei drauf hingewiesen, dass im Rahmen dieser Studie immer auf die derzeit geltende DIN 4108-2 in der Version vom Februar 2013 (DIN 4108-2:2013-02) Bezug genommen wird.

Ziel der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz ist es laut Vorwort der DIN 4108-2, die sommerliche thermische Behaglichkeit in Aufenthaltsräumen sicherzustellen, eine hohe Erwärmung der Aufenthaltsräume zu vermeiden und den Energieeinsatz für Kühlung zu vermindern. Dies sei mit entsprechenden Maßnahmen für Wohn- und Büronutzungen ohne Anlagen zur Raumluftkonditionierung möglich (Kapitel 4.3.1 DIN 4108-2). In Kapitel 4.3.1 der DIN 4108-2 heißt es im Hinblick auf Energieeinsparungsmaßnahmen, dass nicht unzumutbare Temperaturbedingungen in Gebäuden entstehen dürfen, die maschinelle und energieintensive Kühlmaßnahmen zur Folge haben.

Ferner werden allgemeine Zusammenhänge erläutert (s. Kapitel 4.3.2 DIN 4108-2), z.B. dass

- ▶ der sommerliche Wärmeschutz vom Gesamtenergiedurchlassgrad der transparenten Außenbauteile, ihrem Sonnenschutz, ihrem Anteil an der Fläche der Außenbauteile, ihrer Orientierung nach der Himmelsrichtung, ihrer Neigung, der Lüftung, der Wärmekapazität und den Wärmeleiteigenschaften der Außenbauteile sowie den instationären Randbedingungen von Außentemperatur und Sonneneinstrahlung abhängig ist,
- ▶ insbesondere große Fensterflächen ohne Sonnenschutzmaßnahmen in Kombination mit geringen Speichermassen eine Überhitzung zur Folge haben,
- ▶ Räume mit nach zwei oder mehr Richtungen orientierten Fensterflächen – insbesondere bei Südost- oder Südwestorientierungen – ungünstiger hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes als bei einseitig orientierten Fensterflächen sind,
- ▶ eine dunkle Farbgebung der Außenbauteile zu höheren Temperaturen an der Außenoberfläche als eine helle Farbgebung führt, was zu höheren Wärmeinträgen in den Raum führen kann.

Wie schon im GEG weist auch die DIN 4108-2 in Kapitel 4.3.2 auf die Konkurrenzsituation mit der Tageslichtversorgung hin. Im Grundlagen-Kapitel 4.3 der DIN 4108-2 werden ferner Begriffserläuterungen zu Nachtlüftung, passiver Kühlung, wirksamer Wärmekapazität u.a. gegeben.

Kapitel 8 DIN 4108-2 „Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz“ erläutert schließlich die Nachweisführung. In Kapitel 8.2.2 finden sich Voraussetzungen, die einen Verzicht auf einen Nachweis ermöglichen. Dies ist bei einem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil von kleiner 7 bis 15 % (Grenzwert abhängig von Fensterorientierung und -neigung) bzw. bei Wohngebäuden bei einem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil kleiner 35 % in Kombination mit bestimmten F_c - bzw. g -Werten möglich.

Eine ausführliche Beschreibung der nach GEG für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes zulässigen Verfahren („Sonneneintragskennwerteverfahren“ nach Kapitel 8.3 und „thermische Gebäudesimulation“ nach Kapitel 8.4) erfolgt im Kapitel 3.4.1 dieser Arbeit.

3.3.3 Arbeitsstättenrichtlinie - Raumtemperatur

Arbeitgeber müssen zum Gesundheitsschutz ihrer Mitarbeiter die Arbeitsstätten-Verordnung (ArbStättV) umsetzen. Wie diese eingehalten werden kann, führen die Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) aus. Die ASR 3.5 macht folgende Vorgaben zur Raumtemperatur:

- ▶ Grundsätzlich dürfen Fenster nicht zu einer übermäßigen Erwärmung führen.
- ▶ Wenn der solare Eintrag über transparente Bauteile zu einer Raumtemperatur über 26°C führt, so sind diese Bauteile mit geeigneten Sonnenschutzsystemen auszurüsten. Wenn trotz Sonnenschutzsystem die Raumtemperatur über 26°C beträgt, sind *zusätzliche* Gegenmaßnahmen zur ergreifen.
- ▶ Bei einer Raumlufthtemperatur von über 30°C müssen *wirksame* Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Zu möglichen Maßnahmen zählen beispielsweise eine effektive Steuerung des Sonnenschutzes, Nachtlüftung, Reduktion der inneren thermischen Lasten, Lüftung in den frühen Morgenstunden oder eine Lockerung der Bekleidungsregeln.

3.3.4 Komfortbewertung

Wichtige Grundlagen für die Komfortbewertung enthält die Norm DIN EN ISO 7730. In der Einleitung der DIN EN ISO 7730:2005 (D) steht:

„Das menschliche Wärmeempfinden hängt im Wesentlichen vom thermischen Gleichgewicht (Wärmebilanz) des Körpers als Ganzem ab. Dieses Gleichgewicht wird durch körperliche Tätigkeit und Bekleidung sowie durch die Parameter des Umgebungsklimas, das sind Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte, beeinflusst. Sofern diese Faktoren geschätzt oder gemessen wurden, kann das Wärmeempfinden für den Körper als Ganzes vorausgesagt werden, indem das vorausgesagte mittlere Votum (predicted mean vote, PMV) berechnet wird. Der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen (predicted percentage of dissatisfied, PPD) liefert Angaben zur thermischen Unbehaglichkeit oder Unzufriedenheit, indem der Prozentsatz an Menschen vorausgesagt wird, die ein bestimmtes Umgebungsklima wahrscheinlich als zu warm oder zu kalt empfinden. Der PPD lässt sich aus dem PMV berechnen“.

Ausgehend vom menschlichen Wärmeempfinden werden in der DIN EN ISO 7730 also Parameter analysiert, die die Wärmebilanz des Körpers beeinflussen. Eine Berechnungsformel, in welche diese Parameter einfließen, ermöglicht schließlich die Vorhersage über das Wärmeempfinden von Personen.

Auf Basis der Grundlagen der DIN EN ISO 7730 macht die DIN EN 16798-1:2022-03 Vorgaben für den sommerlichen Komfort.² Die Norm DIN EN 16798-1 unterscheidet hierbei folgende Kategorien für die Innenraumqualität (IEQ).

² Die Norm DIN EN 16798-1:2022-03 ersetzt die mittlerweile zurückgezogene DIN EN 15251:2012-12.

Tabelle 9: Kategorien für die Innenraumqualität nach DIN EN 16798-1

Kategorie	Maß an Erwartungen
IEQ I	hoch
IEQ II	mittel
IEQ III	moderat
IEQ IV	niedrig

Da die Erwartungshaltung der Nutzer*innen an klimatisierte und natürlich belüftete Gebäude auch Einfluss auf die Komfortbewertung hat, wird in der DIN EN 16798-1 bei den Anforderungen zwischen gekühlten und ungekühlten Gebäuden unterschieden.

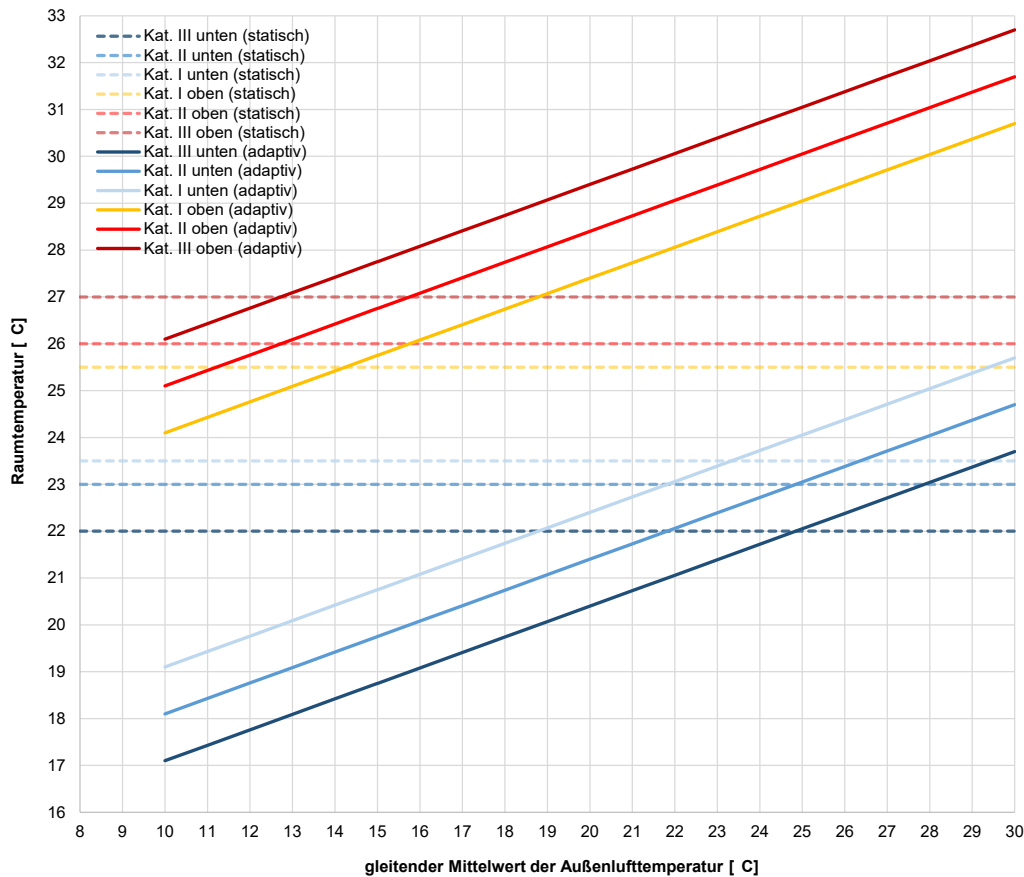
Die DIN EN 16798-1 definiert „maschinelle Kühlung“ als

„Maschinelle Kühlung eines Raums oder eines Gebäudes zur Kühlung der Zuluft. ... Hierzu gehören Ventilator-konvektoren, Kühldecken und -balken, gekühlte Oberflächen usw. ... Das Öffnen von Fenstern am Tag und in der Nacht oder eine ventilator-gestützte Versorgung mit kalter Außenluft gelten nicht als maschinelle Kühlung.“

Das bedeutet, dass Gebäude mit passiver Kühlung mit Kälteübergabe über Bauteilaktivierung oder Fußbodenkühlung als „maschinell gekühltes Gebäude“ eingestuft werden.

In Abbildung 15 sind die Anforderungen an die Raumtemperatur für gekühlte Gebäude (statische Anforderung) und ohne maschinelle Kühlung (adaptiv an den gleitenden Mittelwert der Außentemperatur angepasst) in Abhängigkeit der Kategorien I bis III grafisch dargestellt. Der gleitende Mittelwert der Außentemperatur, genauer gesagt, der exponentiell gewichtete gleitende Mittelwert der Tagesmittelwertes der Außenlufttemperatur, dient dazu, auch die Tagesmitteltemperaturen der vorangegangenen Tage in die Bewertung einfließen zu lassen.

Abbildung 15: Grenztemperaturen für den sommerlichen Komfort gemäß DIN EN 16798-1 (für Büro- und Wohnräume)



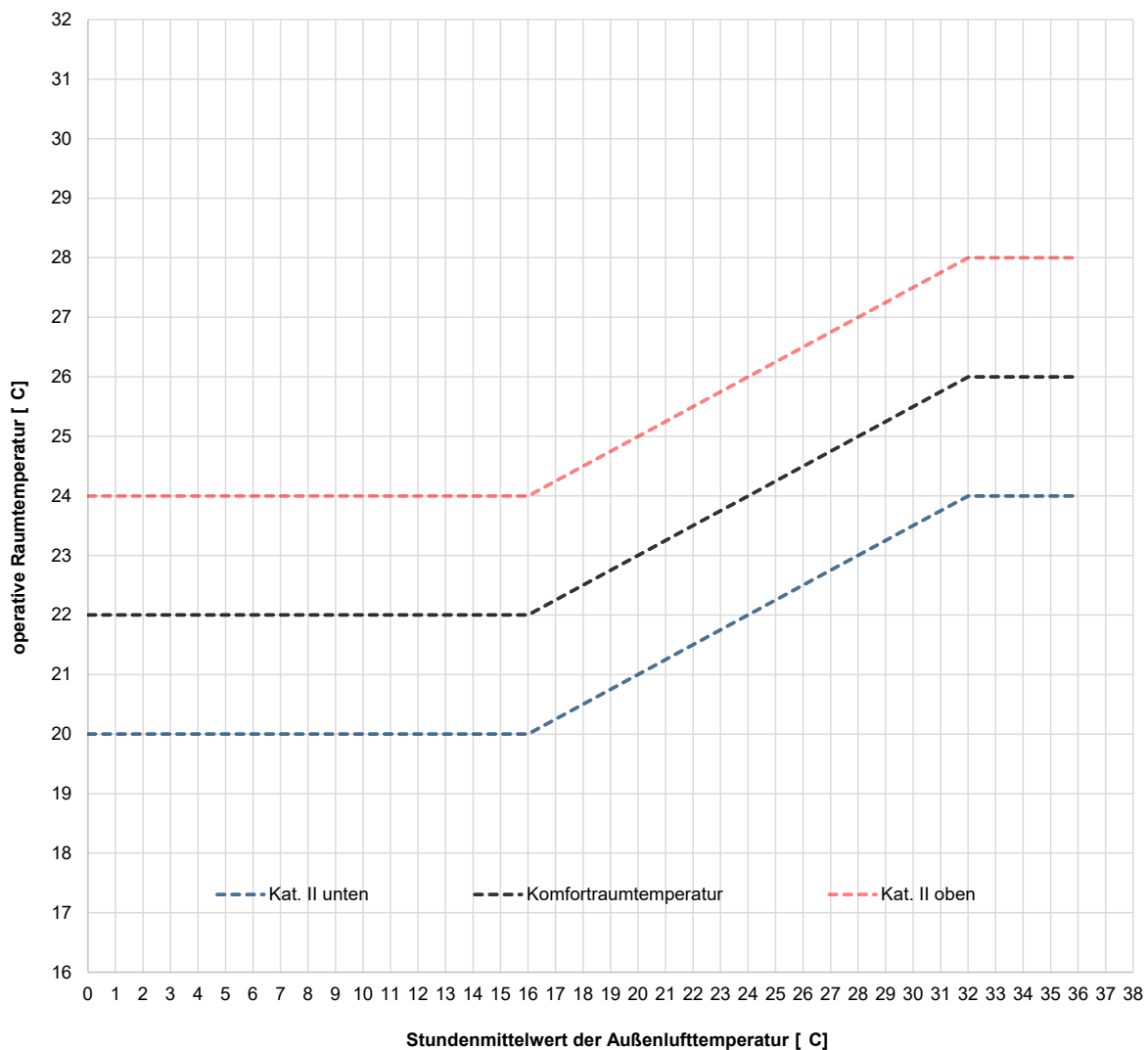
Quelle: (DIN EN 16798-1:2022-03), Darstellung IBH

Bei einem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur von 25°C wäre der Grenzwert für Kategorie II bei einem ungekühlten Gebäude 30°C, bei einem gekühlten Gebäude (unabhängig von der Außentemperatur) 26°C.

In Anhang G der mittlerweile zurückgezogenen DIN EN 15251 werden Kriterien für zulässige Abweichungen angegeben. Danach sind Überschreitungen an bis zu 3 % (oder 5 %) der Nutzungszeit für die Einhaltung der jeweiligen Kategorie zulässig. Nach der nun eingeführten EN 16798-Systematik sind die Standardwerte für Überschreitungen nun in der TR 16798-2 aufgeführt (vgl. Fußnote 7, S. 96).

Im Nationalen Anhang der DIN EN 16798-1 NA wird ein von der DIN EN 16798-1 abweichendes Komfortband zur Einhaltung der Kategorie II festgelegt, welches in Abbildung 16 zu sehen sind.

Abbildung 16: Empfohlene operative Raumtemperaturen des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1:2022-03



Quelle: (Nationaler Anhang der DIN EN 16798-1:2022-03), Darstellung IBH

Dargestellt sind die Komfortraumtemperatur (schwarze Linie) mit zugelassenem Toleranzbereich für die operative Raumtemperatur (rote bzw. blaue Linie) in Abhängigkeit von dem stündlichen Mittel der Außenlufttemperatur. Zulässig für Kategorie II ist, „wenn in weniger als 1 % der Nutzungszeit des Raums der Sollwertbereich der operativen Raumtemperatur um maximal 2 K unter- bzw. um maximal 2 K überschritten wird“ und zusätzlich die Überschreitung zu keinem Zeitpunkt während der Nutzungszeit mehr als 2 K beträgt. Über- und Unterschreitungen sind getrennt zu berechnen und anschließend zu summieren (Nationaler Anhang der DIN EN 16798-1:2022-03).

Da die DIN EN 16798-1:2022-03 und der Nationale Anhang der DIN EN 16798-1:2022-03 bauaufsichtlich nicht eingeführt wurden, sind sie rechtlich nicht bindend. Im Nationalen Anhang steht jedoch: „Für den Neubau und sanierte Bestandsgebäude wird die Kategorie II als Basis für die Planung und Auslegung empfohlen. Abweichende Einstufungen müssen mit dem Bauherrn vereinbart werden.“

Auch im Internet stehen Hilfsmittel zur Komfortbewertung mit Normenbezug zur Verfügung: Als Beispiel sei auf das CBE Thermal Comfort Tool unter <https://comfort.cbe.berkeley.edu/EN> (Tartarini et al. 2020) hingewiesen.

3.3.5 Sonstige Vorgaben

Einige weitere, den sommerlichen Wärmeschutz betreffende Vorgaben sollen nachfolgend ergänzend aufgeführt werden:

► Zertifizierung nach DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen)

Bei einer DGNB-Gebäudezertifizierung wird der thermische Komfort im Bereich soziokulturelle und funktionale Qualität (SOC1.1) in die Bewertung einbezogen. Hierfür sind thermische Simulationen mit dem Klimadatensatz TRY 2017, und zwar für den Sommerfall mit dem sommerfokussierten TRY2015x (siehe 3.6.1), durchzuführen. Es gelten für Neubauten (DGNB 2018a) und Sanierungen (DGNB 2021) folgende Kriterien:

- Die diesbezüglich höchste Punktzahl wird erreicht, wenn die Kategorie I in Anlehnung an DIN EN 16798-1 erreicht wird. Hierbei ist eine Abweichungshäufigkeit von 3% zulässig.
- Das Erreichen der Kategorie II in Anlehnung an DIN EN 16798-1 wird mit einer noch relativ hohen Punktzahl belohnt, für Kategorie III gibt es eine mittlere Punktzahl. Bei den Kategorien II und III ist eine Abweichungshäufigkeit von 5% erlaubt.
- Die Einhaltung der DIN 4108-2 wird immer gefordert. Wird keine der oben genannten Kategorien erreicht, gibt es allein für die Einhaltung der DIN 4108-2 einige Punkte (geringste Punktzahl).
- bei Temperatur-Unterschreitungen im Sommer gelten für alle Kategorien die Anforderungen nach Kategorie III entsprechend 22°C.
- Entsprechend der DIN EN 15251 wird bei den Anforderungen zwischen Gebäuden mit maschineller Kühlung und ohne Kühlung unterschieden.

Alternativ kann der Nachweis des thermischen Komforts über Messungen erfolgen, wenn die Anforderungen an Behaglichkeitsmessungen der DIN EN 15251 erfüllt werden oder bei gekühlten Gebäuden über raumbezogene Kühllastberechnungen nach VDI 2078 erfolgt.

Des Weiteren werden hinsichtlich thermischer Behaglichkeit während der Kühlperiode Anforderungen an die Strahlungstemperaturasymmetrie und den Feuchtegehalt der Raumluft gestellt. Bei der Strahlungstemperaturasymmetrie können zusätzliche Punkte erhalten werden, wenn die raumseitigen Oberflächentemperaturen bestimmte Minimal- und Maximalwerte nicht über- bzw. unterschreiten (z.B. Decke maximal 35°C). Bei der Raumluftfeuchte werden Punkte vergeben, wenn der absolute Feuchtegehalt 12 g/kg nicht übersteigt.

► Zertifizierung nach BNB (Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen) für Bundesbauten

Das BNB-Bewertungssystem wurde in Zusammenarbeit mit der DGNB entwickelt und ist sehr ähnlich der DGNB-Gebäudezertifizierung aufgebaut. (BMUB 2017)

► Passivhaus-Zertifizierung (Sommerfall)

Bei einer Passivhaus-Gebäudezertifizierung werden auch Anforderungen an die sommerliche Behaglichkeit gestellt (vgl. Kapitel 3.4.4). Mit dem PHPP-Nachweistool erfolgt hierfür eine Berechnung der Übertemperaturhäufigkeit. Wenn die "Häufigkeit über 25 °C" 10 % überschreitet, sind weitere Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz zu ergreifen, bis das Kriterium erfüllt wird. Für hohen sommerlichen Komfort werden Übertemperaturhäufigkeiten von höchstens 5 % empfohlen.

3.3.6 Zusammenfassende Übersicht

Nachfolgende Tabelle gibt eine Zusammenfassung über die wichtigsten normativen Vorgaben zum sommerlichen Wärmeschutz.

Tabelle 10: Sommerlicher Wärmeschutz - Wichtige Normen und Richtlinien

Norm	Anwendung	Verfahren	Rechtlich bindend
GEG	Neubauten, Erweiterungen	Nachweis ist nach DIN 4108-2:2013 zu führen	ja
DIN 4108-2	Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach GEG	Sonneneintragskennwerteverfahren, alternativ thermische Simulation mit vorgegebenen Randbedingungen	ja
ASR 3.5 Raumtemperatur	Arbeitsplätze	Maßnahmen sind bei über 26°C zu ergreifen.	nein, aber gleiches Niveau muss erreicht werden
DIN EN ISO 7730	Bestimmung und Interpretation von thermischer Behaglichkeit	Berechnung von PMV (predicted mean vote) und PPD (predicted percentage of dissatisfied)	nein
DIN EN 16798-1	Komfortbewertung von Räumen	Auswertung von thermischen Simulationen oder Messungen über statisches bzw. adaptives Komfortmodell und Einteilung in Kategorien I bis IV	nein

Quelle: (Fahrion 2015), IBH

3.4 Bewertungsmethoden

Im Folgenden werden gängige Methoden zur Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes und von Behaglichkeit in Innenräumen hinsichtlich Methodik, Randbedingungen, Einflussgrößen und Auswertungsmethodik dargestellt.

Folgende Methoden werden beschrieben:

- ▶ Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2
- ▶ Thermische Simulation nach DIN 4108-2
- ▶ Komfortbewertung einer thermischen Simulation
- ▶ Kühllast-Berechnung nach VDI 2078
- ▶ PHPP – Blatt Sommer
- ▶ Kühlenergiebedarfsberechnung nach DIN 18599

3.4.1 Methoden nach DIN 4108-2

Der Nachweis zur Einhaltung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz ist nach Kapitel 8.3 der DIN 4108-2 mindestens für den Raum zu führen, der im Rahmen des Anwendungsbereichs zu den höchsten Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes führt.

Um die regionalen Unterschiede der sommerlichen Klimaverhältnisse zu berücksichtigen, wird das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland in die Sommerklimaregionen A, B und C eingeteilt.

Zulässig ist das in Kapitel 8.3 beschriebene sogenannte „Sonneneintragskennwerteverfahren“ oder alternativ eine thermische Gebäudesimulation mit festgelegten Randbedingungen, welche in Kapitel 8.4 der DIN 4108-2 beschrieben sind.

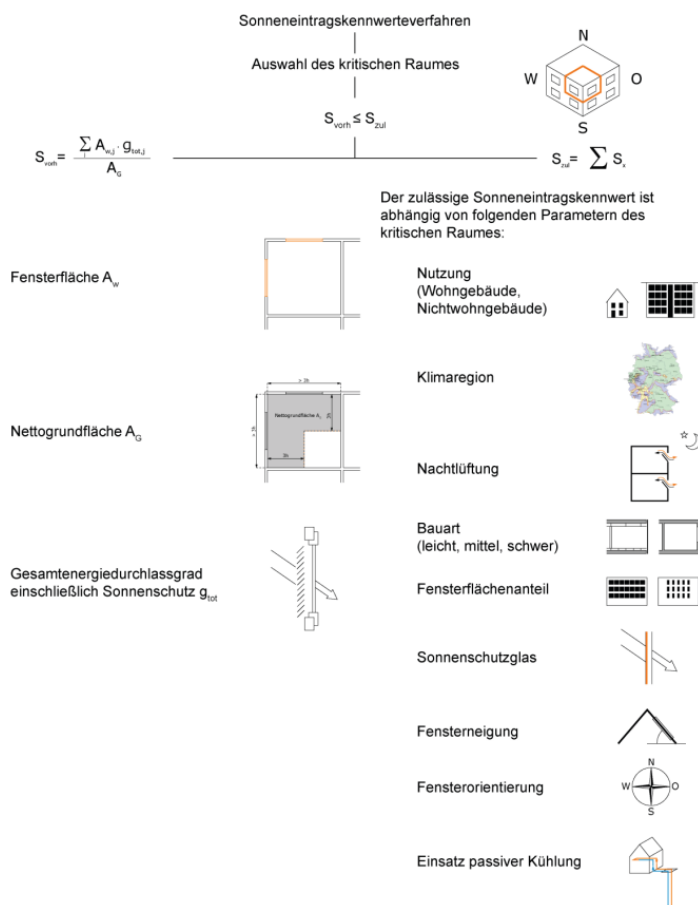
3.4.1.1 Kennwerteverfahren

Beim Sonneneintragskennwerteverfahren, abgekürzt nachfolgend auch Kennwerteverfahren genannt, wird ein maximal zulässiger Sonneneintragskennwert S_{zul} bestimmt und mit dem berechneten vorhandenen Sonneneintragskennwert S_{vorh} verglichen. Gilt $S_{vorh} \leq S_{zul}$ ist der Nachweis erbracht.

In S_{zul} ergibt sich aus der Summe einzelner Sonneneintragskennwerte (S_1 bis S_6) (vgl. DIN 4108-2 Tabelle 8). S_1 bewertet Nachtlüftung und Bauweise, S_2 den grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil, S_3 den Einsatz von Sonnenschutzglas, S_4 die Fensterneigung, S_5 die Fensterorientierung und S_6 den Einsatz passiver Kühlung.

S_{vorh} errechnet sich aus dem Produkt der Fensterfläche und dem Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} , das auf die Nettoraumfläche des Raums bezogen wird. Bei g_{tot} handelt es sich um den Gesamtenergiedurchlassgrad einschließlich Sonnenschutz, der vereinfacht als Produkt aus dem Gesamtenergiedurchlassgrad g der Verglasung und dem Abminderungsfaktor für die Sonnenschutzvorrichtung F_c berechnet werden kann. Im Falle von baulicher Verschattung kann mit F_s , dem sogenannten Teilbestrahlungsfaktor, basierend auf den Tabellen A.1 bis A.3 der DIN V 18599-2:2011 ein weiterer Faktor in der g_{tot} -Berechnung ergänzt werden.

Eine grafische Darstellung des Kennwerteverfahrens ist in (Fahrion 2015) zu finden, welche nachfolgend in Abbildung 17 wiedergegeben ist.

Abbildung 17: Sonneneintragskennwertverfahren nach DIN 4108-2

Quelle: (Fahrion 2015)

3.4.1.2 Thermische Simulation

Für die Nachweisführung über eine thermische Simulation nach Kapitel 8.4 der DIN 4108-2 wird der zu untersuchende Raum als Modell in einem Gebäude-Simulationsprogramm abgebildet und werden die Übertemperaturgradstunden ermittelt. Die Übertemperaturgradstunden, angegeben in Kh/a, ergeben sich aus den stündlich ermittelten Differenzen der operativen Raumtemperatur zur angesetzten Grenztemperatur im Falle einer Überschreitung, welche über das Simulationsjahr aufsummiert werden.

Die Bezugswerte der operativen Innentemperaturen werden in Abhängigkeit der drei Sommer-Klimaregionen (25 °C für A, 26 °C für B und 27 °C für C) vorgegeben. Bezogen auf den zugrunde zu legenden Bezugswert der operativen Innentemperatur ist nachzuweisen, dass im kritischen Raum der Übertemperaturgradstunden-Anforderungswert nicht überschritten wird.

Der Anforderungswert liegt bei Wohngebäuden bei 1.200 Kh/a und bei Nichtwohngebäuden bei 500 Kh/a. In Abhängigkeit von der Nutzungsart wird die übliche Anwesenheitszeit (Wohnnutzung 24 h/d; Nichtwohnnutzung Montag bis Freitag 7 Uhr bis 18 Uhr) für den zu bestimmenden Übertemperaturgradstundenwert ausgewertet.

Die anzusetzenden Simulations-Randbedingungen werden ebenfalls in Kapitel 8.4 der DIN 4108-2 festgelegt, u.a.:

► Klimadaten

Es sind folgende Testreferenzjahre der TRY 2011 zu verwenden:

- Klimaregion A: Normaljahr TRY-Zone 2
- Klimaregion B: Normaljahr TRY-Zone 4
- Klimaregion C: Normaljahr TRY-Zone 12

► interne Wärmegewinne

Als mittlerer interner Wärmeeintrag ist bezogen auf die Nettogrundfläche anzusetzen:

- für Wohngebäude: $100 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$
- für Nichtwohngebäude: $144 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$

► Luftwechselraten

- Grundluftwechsel
 - bei Wohngebäuden: $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$
 - bei Nichtwohngebäuden: $n = 4 A_G/V \text{ h}^{-1}$ während der Nutzungszeit (mit A_G : Nettogrundfläche, V : Nettoraumvolumen) und $n = 0,24 \text{ h}^{-1}$ außerhalb der Nutzungszeit
- Erhöhter Tagluftwechsel
 - Überschreitet die Raumlufttemperatur 23 °C und liegt gleichzeitig die Raumlufttemperatur über der Außenlufttemperatur, darf der mittlere Luftwechsel während der Aufenthaltszeit bis auf $n = 3 \text{ h}^{-1}$ erhöht werden.
- Nachtluftwechsel
 - Außerhalb der Aufenthaltszeit darf der Luftwechsel auf $n = 2 \text{ h}^{-1}$ erhöht werden, wenn die Möglichkeit zur nächtlichen Fensterlüftung besteht. (= erhöhte Nachtlüftung)
 - Wenn für den zu bewertenden Raum eine geschossübergreifende Lüftungsmöglichkeiten (z. B. über angeschlossenes Atrium) besteht, darf der Luftwechsel auf $n = 5 \text{ h}^{-1}$ erhöht werden. (=hohe Nachtlüftung)
 - Bei einer Lüftungsanlage darf ein erhöhter Nachtluftwechsel gemäß der Dimensionierung der Anlage angesetzt werden.
- Steuerung Sonnenschutz
 - Im Falle einer automatischen Sonnenschutzsteuerung kann von einer strahlungsabhängigen Steuerung für nord-, nordost- und nordwestorientierte Fenster mit einer Grenzbestrahlungsstärke von $200 \text{ W}/\text{m}^2$ (Wohngebäude) bzw. $150 \text{ W}/\text{m}^2$ (Nichtwohngebäude) und für alle anderen Orientierungen mit einer Grenzbestrahlungsstärke von $300 \text{ W}/\text{m}^2$ (Wohngebäude) bzw. $200 \text{ W}/\text{m}^2$ (Nichtwohngebäude) ausgegangen werden. Bei einer abweichenden Betriebsweise der Sonnenschutzvorrichtung darf diese in der Simulationsrechnung angesetzt werden.

- Im Falle einer nicht-automatischen Sonnenschutzsteuerung wird der Sonnenschutz bei Nichtwohngebäuden am Wochenende nicht aktiviert.
- Von einer windunabhängigen Betriebsweise ist auszugehen.

Als Simulationssoftware können Gebäudesimulationsprogramme, wie z.B. TRNSYS oder IDA ICE eingesetzt werden. Mittlerweile bieten die gängigen GEG-Berechnungsprogramme auch Zusatzmodule zur vereinfachten Simulation des sommerlichen Wärmeschutzes an.

3.4.2 Komfortbewertung einer thermischen Simulation

Thermisch-dynamische Simulationen können auch mit freien, d.h. an die tatsächlichen Gegebenheiten angepassten, Randbedingungen durchgeführt werden. Sowohl einzelne Räume oder Raumgruppen als auch ganze Gebäude (Whole Building Simulation) lassen sich mit Hilfe von Gebäudesimulationsprogrammen simulieren.

Um eine thermisch-dynamische Simulationsrechnung durchzuführen, ist eine Vielzahl an Berechnungsrandbedingungen festzulegen. Durch die vielen festzulegenden Parameter und auch durch den Modellierungsprozess sind thermische Simulationen aufwendig und bedürfen fundierter Fachkenntnisse. Andererseits ermöglichen Simulationsergebnisse bei detaillierter Abbildung der Gegebenheiten die genauesten Aussagen über die sich einstellenden Bedingungen, insbesondere der Raumtemperaturen.

Wie die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt, ist nicht festgeschrieben. Gängig sind:

- Grafische Auswertungen
- Auswertung der Übertemperaturgradstunden
- Komfortbewertung nach DIN EN 16798 Teil 1:2021-4 (ersetzt DIN EN 15251)

Da die gewählte Methode für die Auswertung einer thermischen Simulation und insbesondere für die auszuwählende Auswertungsgröße für die durchzuführende Parameterstudie essenziell sind, werden diese in einem separaten Kapitel detailliert beschreiben und deren Vor- und Nachteile analysiert (s. Kapitel 3.5 „Auswertegrößen von thermischen Simulationen im Vergleich“).

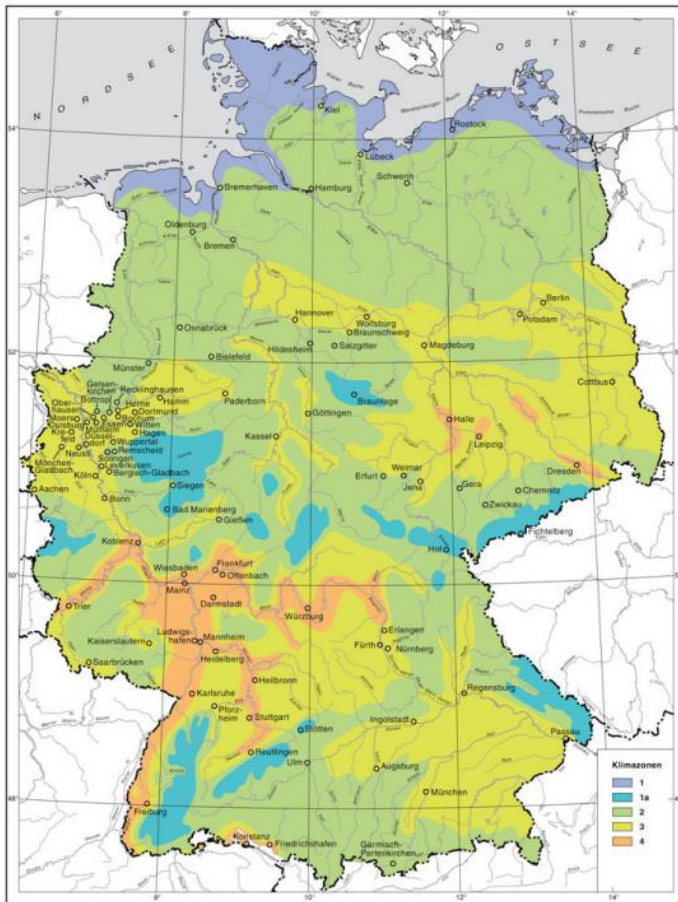
3.4.3 Kühllast-Berechnung

Die VDI 2078 „Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)“ dient zur Bestimmung der maximalen Kühllast sowie der Berechnung der vorherrschenden operativen Raumtemperaturen an einem Auslegungstag. Die maximale Kühllast dient in der Fachplanung der technischen Gebäudeausrüstung zur Auslegung von gebäudetechnischen Anlagen. Dabei wird zunächst die Kühllast einzelner Räume oder Zonen berechnet, die unter Berücksichtigung von Gleichzeitigkeitsfaktoren zur gesamten Gebäude-Kühllast verrechnet wird. Zusätzlich ist mit der VDI 2078 auch eine Jahresbetrachtung möglich.

Anders als die Berechnung der Heizlast, welche rein statisch erfolgt, wurde die Berechnung der Kühllast in der VDI 2078 von 2015 auf ein teildynamisches Vorgehen umgestellt. Bei der Berechnung werden Außenklima, Nutzung, innere Wärmequellen, Bauteile sowie die TGA-Anlagen berücksichtigt.

Die regionalen Klima-Unterschiede werden zusammenfassend in vier bzw. fünf Kühllastzonen (KLZ) abgebildet (s. Abbildung 18).

Abbildung 18: Kühllastzonen nach (VDI 2078)



Quelle: VDI 2078: 2015-06, wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e. V.

Um die realen Gegebenheiten noch etwas differenzierter abbilden zu können, erfolgt bei Standorten in Großstadtzentren eine Korrektur der Daten der Repräsentanzstationen der jeweiligen Kühllastzone. Eine weitere Korrektur erfolgt bei Gebäudestandorten über 650 m ü. NN.

Den in der DIN 4710 enthaltenen Klimadaten werden definierte Außentemperaturen sowie direkte und diffuse Solarstrahlung entnommen und für die Berechnung der maximalen Kühllast an einem Auslegungstag, dem sogenannten Cooling Design Day (CDD), weiterverwendet. Vorgesaltet erfolgt ein aperiodischer Einschwingvorgang – die Cooling Design Period (CDP).

► Die CDP beträgt 19 Tage und ist unterteilt in drei Phasen:

- Vorberechnung: 14 Tage mit mittlerem bedeckten (bzw. bei KLZ 4 bewölkten) Tag
- Anlaufberechnung: 4 Tage steigende Außentemperaturen (lineare Anpassung an den CDD | Sonneneinstrahlung entspricht CDD)
- Auslegungstag (CDD): 1 Tag maximale Außentemperatur mit hoher Sonneneinstrahlung

Innere Wärmequellen (Personen, Beleuchtung, Geräte) werden angegeben und in einem 24-Stunden Zeitprofil abgebildet. Für die Berechnung in der CDP kann in zwei Tagesprofile AT (Arbeitstag) und NAT (Nicht-Arbeitstag) unterschieden werden. Die Abfolge von AT und NAT während der CDP kann man dann je nach Gebäudenutzung festlegen. Beispielsweise wird ein Wohngebäude, welches jeden Tag in etwa gleich genutzt wird, während der CDP ausschließlich mit nur einem Tagesprofil angegeben.

Alle Bauteile werden mit genauem Schichtaufbau beschrieben, so dass das thermische Verhalten der umschließenden Bauteile abgebildet werden kann. Für transparente Bauteile steht der Anhang B3 der VDI-Richtlinie zur Verfügung. Dieser enthält die Kennwerte Gesamtenergiedurchlassgrad, Lichttransmission, Wärmedurchgangskoeffizient und Konvektivanteil für verschiedene Glas-/Sonnenschutz-Kombinationen.

Das Regelungskonzept bzw. die Betriebsweise einer TGA-Anlage, z.B. ob die Anlage im durchgehenden oder unterbrochenen Betrieb läuft, kann in der VDI 2078 abgebildet werden, da dies die maximale Kühllast erheblich beeinflusst. Natürliche Lüftung lässt sich ebenfalls vereinfacht in die Berechnung integrieren. Diese unterscheidet sich in Grundlüftung sowie eine Zusatzlüftung, wenn es im Raum zu warm wird.

Wie bereits beschrieben, erfolgt die Anwendung der VDI 2078 in den meisten Fällen zur Berechnung der maximalen Kühllast. Meistens wird eine gewünschte Raumtemperatur als Sollwert und ein zulässiger Schwankungsbereich angeben, so dass die erforderliche Kühllast errechnet werden kann. Es ist aber ebenfalls möglich, die Kühlleistung zu begrenzen, um die Reaktion der Luft- und operativen Temperaturen auszuwerten. Die Berechnung erfolgt jeweils in Stundenschritten über den gesamten CDD.

In gängiger Software zur Kühllastberechnung sind zusätzlich Testreferenzjahre hinterlegt, so dass Raumtemperaturen für das ganze Jahr simuliert werden können.

3.4.4 Passivhaus-Projektierungspaket - Sommerfall

Bei der Planung von Passivhaushäusern liegt das Hauptaugenmerk auf einem geringen Jahresheizwärmebedarf, aber auch der sommerliche Komfort wird anhand der Kenngröße „Übertemperaturhäufigkeit“ bewertet.

Als Basis für die Planung und Bilanzierung von Passivhaushäusern dient das sogenannte Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP). Das PHPP ist ein Excel-basiertes Gebäudebilanzierungswerkzeug, das für die Berechnung der Passivhauskenngrößen Jahresheizwärme- und Primärenergiebedarf u.a. eine Flächenermittlung der Hüllflächen, U-Wert- und Wärmebrücken-Berechnung, Berechnung von Temperaturkorrekturfaktoren, eine detaillierte Berechnung von Verschattungsfaktoren zur Bestimmung solarer Gewinne über transparente Bauteile, interne Wärmegewinne, Anlagentechnik und die Auswahl von Klimadaten umfasst.

Diese Angaben zu Fenstergröße und -orientierung, Verschattung, Lüftung und internen Wärmegewinnen sind gleichzeitig auch Grundlage für die Bewertung der sommerlichen Behaglichkeit. Zusätzlich werden noch sommerliche Besonderheiten erfasst wie an das Sommerklima angepasstes Lüftungsverhalten, Einsatz von temporärem Sonnenschutz (z.B. Jalousien) und Verschattung durch Laubbäume.

Die Berechnung der Übertemperaturhäufigkeit erfolgt im Registerblatt „Sommer“ und basiert auf dem stationären Bilanzmodell der mittlerweile zurückgezogenen bzw. ersetzten EN 832, das durch die Bestimmung einer zeitabhängigen Komponente zur Berücksichtigung des thermischen Ladeffekts ergänzt wird (Passivhaus Institut 2001). Das Rechenverfahren errechnet für den

Fall „ohne aktive Kühlung“ die Temperaturentwicklung, ohne auf stündliche Klimadaten zuzugreifen.

Ein Auszug aus der PHPP-Beispieldatei für ein Passivhaus-Reihenendhaus ist in Abbildung 19 dargestellt.

Abbildung 19: PHPP-Beispielberechnung Übertemperaturhäufigkeit

Sommer: Passive Kühlung Passivhaus mit PHPP Version 9.6b

Passivhaus-Reihenendhaus / Klima: PHPP-Standard / EBF: 156 m² / Heizen: 12,5 kWh/(m²a) / Übertemperatur: 1 % / PER: 31,7 kWh/(m²a)

Objekttyp: Reihenhaus	Energiebezugsfläche A _{EB} : 156,0 m ²
Übertemperaturgrenze: 25 °C	Gebäudevolumen: 390 m ³
Sollfeuchte: 12 g/kg	Interne Feuchtequellen: 1,9 g/(m ² h)
spez. Kapazität: 204 Wh/(m ² K)	

Bauteile	Temperaturzone	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Reduktionsfaktor f _{R, Sommer}	H _{Sommer} Wärmeleitwert
Außenwand Außenluft	A	184,3	0,138	1,00	25,3
Außenwand Erdreich	B			1,00	
Dach/Decken Außenluft	A	83,4	0,108	1,00	9,0
Bodenplatte/Kellerdecke	B	80,9	0,131	1,00	10,6
	A			1,00	
	A			1,00	
	X			0,00	
Fenster	A	43,5	0,777	1,00	33,8
Außentür	A			1,00	
Wbrücken außen (Länge/m)	A	116,9	-0,030	1,00	-3,5
Wbrücken Perimeter (Länge/m)	P			1,00	
Wbrücken Boden (Länge/m)	B	11,4	0,061	1,00	0,7

Transmissionsleitwert außen H_{T,e}	64,6 W/K
Transmissionsleitwert Erdreich H_{T,g}	11,3 W/K

Lüftung Sommer aus Blatt Sommerluft

Lüftungsleitwerte Anlage	Lüftungsparameter	Regelung Sommerlüftung
außen H _{l,s} : 0,0 W/K	Tagl. Temperaturschwankung im Sommer: 11,7 K	keine geregelt nach Temperatur geregelt nach Enthalpie immer
ohne WRG: 0,0 W/K	minimal zulässige Innentemperatur: 22,0 °C	
Erdreich H _{l,g} : 0,0 W/K	Wärmekapazität Luft: 0,33 Wh/(m ² K)	
ohne WRG: 0,0 W/K	Luftwechsel Zuluft: 0,00 1/h	
Lüftungsleitwerte sonstige	Luftwechsel Außenluft: 0,38 1/h	geregelt nach Temperatur geregelt nach Feuchte
außen: 48,8 W/K	Luftwechsel nächtliche Fensterlüftung, manuell @ 1 K: 0,15 1/h	
	Luftwechsel mechanische, autom. geregelte Lüftung: 0,00 1/h	
	spez. Leistungsaufnahme dafür: 0,00 Wh/m ²	
	η _{WRG} : 82%	
	η _{FRG} : 0%	
	η _{EWÜ} : 93%	

Ausrichtung der Fläche	Winkel-faktor Sommer	Versch.-faktor Sommer	Ver-schmutzung	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m ²	Verglasungsanteil	Apertur m ²
Nord	0,9	0,92	0,95	0,50	11,0	64%	2,8
Ost	0,9	1,00	0,95	0,00	0,0	0%	0,0
Süd	0,9	0,30	0,95	0,50	30,4	65%	2,5
West	0,9	0,94	0,95	0,50	2,0	60%	0,5
Horizontal	0,9	1,00	0,95	0,00	0,0	0%	0,0
Summe opake Flächen							1,1

Solarapertur Summe **6,9** m²/m² **0,04**

Innere Wärmequellen Q_i	spezif. Leistung q _i W/m ² : 2,4	A _{EB} m ² : 156	=	W: 378	W/m ² : 2,4
--	---	---	---	---------------	-------------------------------

Übertemperaturhäufigkeit h_{9 ≥ 9max} **1,0%** **bei der Übertemperaturgrenze 9_{max} = 25 °C**

Wenn die "Häufigkeit über 25 °C" 10% überschreitet, sind zusätzliche Maßnahmen zum Schutz vor Sommerhitze erforderlich.

Quelle: (PHPP 2015)

Auf Basis einer erstellten PHPP-Berechnung ist so die Auswertung der Übertemperaturhäufigkeit mit geringem Zeitaufwand durchzuführen.

Eine Bewertung des Übertemperaturhäufigkeit-Ergebnisses erfolgt nach der in Tabelle 11 angegebenen Einteilung.

Tabelle 11: Bewertung der mit PHPP berechneten Übertemperaturhäufigkeit

h_{<25 °C}	Bewertung
>15 %	katastrophal
10 - 15 %	schlecht
5 - 10 %	akzeptabel
2 - 5 %	gut
0 - 2 %	exzellent

Quelle: (PHPP 2015)

Eine Passivhaus-Berechnung erfolgt immer für das ganze Gebäude. Auch das Übertemperaturhäufigkeits-Berechnungsverfahren wird nicht für die Anwendung auf einzelne Räume empfohlen (PHPP 2015).

3.4.5 Kühlenergiebedarfsberechnung

Die Energiebilanzierung nach GEG erfolgt nach DIN V 18599. Das darin beschriebene iterative Berechnungsverfahren basiert auf einer Monatsbilanz und entsprechend auf monatlichen Klimadaten. Im Teil 2 der DIN V 18599 wird u.a. die Berechnungsvorschrift für den Nutzenergiebedarf für Kühlung beschrieben und noch in weiteren Normenteilen konkretisiert.

Grundsätzlich dient das Verfahren zur Bilanzierung ganzer Gebäude. In (Höttges, Kempkes 2009) wurde jedoch die Nutzkälte nach DIN V 18599 (Version 2007) von Räumen mit Wohn- und Nichtwohngebäudenutzung berechnet und mit dem Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 (Version 2003) sowie den Simulationsergebnissen für Nutzkälte und Übertemperaturstunden verglichen. Es zeigte sich, dass die Nutzkälte-Ergebnisse zwischen thermischer Simulation und das Monatsbilanzverfahren der DIN V 18599 korrelieren, jedoch die DIN V 18599-Ergebnisse auf der „sicheren Seite“ liegen.

3.5 Auswertegrößen von thermischen Simulationen im Vergleich

Ziele des Forschungsprojektes sind die Analyse der Sensitivität von Parametern hinsichtlich sommerlichen Wärmeschutzes sowie die Einschätzung der Wirksamkeit und der Grenzen passiver Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz bei heutigem und zukünftigem Klima. Dafür ist es essenziell, die untersuchten Maßnahmen und Sensitivitäten anhand einer geeigneten Größe zu bewerten und diese genau zu kennen. Nachfolgend werden daher mögliche Auswertegrößen des sommerlichen Innenraumkomforts hinsichtlich ihrer Anschaulichkeit und Aussagekraft untersucht sowie ihre Unterschiede und jeweiligen Stärken und Schwächen analysiert. Verschiedene Auswertegrößen fokussieren sich jeweils auf unterschiedliche Aspekte des vielschichtigen Themas „sommerlicher Komfort“.

3.5.1 Größen zur Bewertung sommerlichen Komforts

In DIN 4108-2, DIN EN ISO 7730 und DIN EN 16798-1 sowie deren Nationalem Anhang existieren verschiedene Ansätze zur Bewertung des sommerlichen Komforts in Innenräumen. Diese sowie weitere anschauliche Größen wie Raumtemperaturen werden im Folgenden analysiert.

3.5.1.1 Durchschnittliche und maximale Raumtemperatur

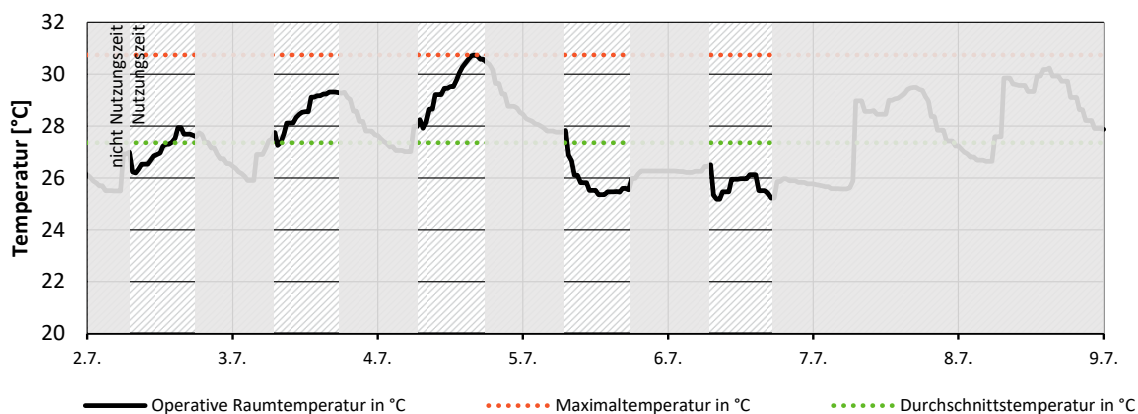
Durchschnittstemperatur und Maximaltemperatur in °C sind allgemein verständliche Größen zur Beschreibung thermischer Raumkonditionen. Die Arbeitsstättenrichtlinie ASR 3.5 koppelt Vorgaben an die Maximaltemperatur, wobei bei über 26 °C Sonnenschutzmaßnahmen und bei über 30 °C zusätzliche wirksame Maßnahmen erforderlich werden (vgl. Kapitel 3.3.3).

Bei der Auswertung von Simulationen kann verfahrensbedingt nur der maximale Stundenmittelwert der Raumtemperatur und kein absolutes Maximum ermittelt werden. Beim Begriff Maximaltemperatur ist im Zusammenhang mit Simulation daher immer der der maximale Stundenmittelwert der Raumtemperatur gemeint.

Wegen der leichten Verständlichkeit soll eine mögliche Auswertung anhand von durchschnittlicher Raumtemperatur und maximaler Raumtemperatur in °C untersucht werden. In Abbildung 20 ist die operative Raumtemperatur (schwarz), die Maximaltemperatur (rot) und die Durchschnittstemperatur (grün) einer exemplarischen Woche dargestellt. Graue Felder markieren die Zeiten außerhalb der Büronutzung an. Die Maximalwerte der operativen Raumtemperatur dieser Woche beträgt 30,7 °C und die Durchschnitts-Raumtemperatur während der Nutzungszeit 27,4 °C.

Während die Angabe der Maximaltemperatur gut vorstellbar, aber nur eine Aussage über den heißesten Moment ist, nicht aber über die Temperaturen des restlichen Zeitraums, bildet die Durchschnittstemperatur den gesamten Betrachtungszeitraum ab, ohne Informationen über besonders heiße Zeitpunkte zu geben.

Abbildung 20: Darstellung der Maximaltemperatur und Durchschnittstemperatur für eine exemplarische Sommer-Woche



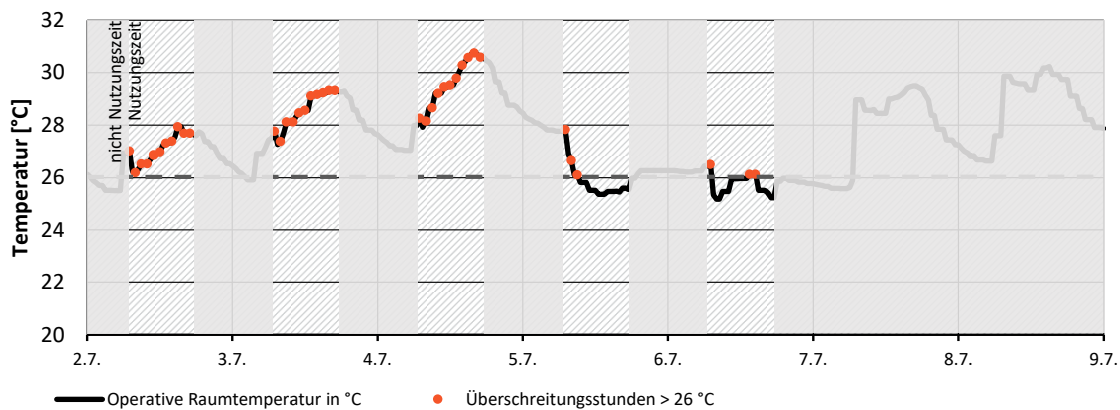
Quelle: eigene Darstellung, IBH

3.5.1.2 Übertemperaturhäufigkeit

Die Übertemperaturhäufigkeit, angegeben in Prozent, beschreibt den Anteil der Stunden, an denen eine zu definierende Grenztemperatur während der Nutzungsdauer überschritten wird. Bei der Passivhaus-Gebäudezertifizierung z.B. darf die „Häufigkeit über 25 °C“ nicht mehr als 10 % betragen. DIN 4108-2 schlägt zusätzlich zum Nachweisverfahren die Ausweisung der Übertemperaturhäufigkeiten über der der Sommerklimaregion entsprechenden Grenztemperatur sowie der um 2 K bzw. 4 K erhöhten Grenztemperatur vor. Die Angab der Häufigkeit kann auch als

absolute Zahl an Stunden, an denen eine bestimmte Temperaturgrenze überschritten wird, angegeben werden. In Abbildung 21 sind die Übertemperaturstunden über 26 °C einer Beispielwoche bei Büronutzung dargestellt. Graue Felder zeigen wiederum die Zeiten außerhalb der Büronutzung an und werden nicht ausgewertet. Während 37,5 Stunden der 55 Nutzungsstunden wird die gewählte Grenztemperatur von 26 °C überschritten, was einer Übertemperaturhäufigkeit von 68 % entspricht.

Abbildung 21: Darstellung Übertemperaturstunden bzw. -häufigkeit für eine exemplarische Sommer-Woche (Büro)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

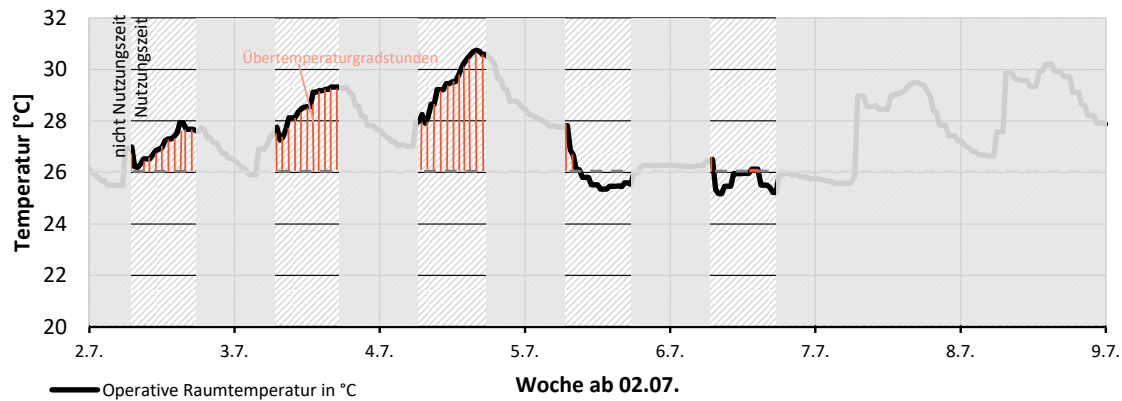
3.5.1.3 Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, wird bei der Nachweisführung über thermische Simulation nach DIN 4108-2 die Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes anhand der Zahl der jährlichen Übertemperaturgradstunden bewertet. Die Übertemperaturgradstunden, angegeben in Kelvinstunden pro Jahr (Kh/a), ergeben sich aus den stündlich ermittelten Differenzen der operativen Raumtemperatur zur angesetzten Grenztemperatur im Falle einer Überschreitung, welche über das Simulationsjahr aufsummiert werden. Die Bezugswerte der operativen Innentemperaturen werden aufgrund der Anpassungsfähigkeit des Menschen an das Außenklima in Abhängigkeit der drei Sommer-Klimaregionen (25 °C für A, 26 °C für B und 27 °C für C) vorgegeben.³ Bezogen auf den Bezugswert ist nachzuweisen, dass im kritischen Raum der Übertemperaturgradstunden-Anforderungswert nicht überschritten wird. Der Anforderungswert liegt bei Wohngebäuden bei 1.200 Kh/a und bei Nichtwohngebäuden bei 500 Kh/a.

In Abbildung 22 bildet die rot schraffierte Fläche die Übertemperaturgradstunden anhand einer exemplarischen Woche vom 2.-8. Juli ab. An 37,5 Stunden wird die Grenztemperatur von 26 °C während der Nutzungszeit jeweils unterschiedlich hoch – um bis zu 4,7 K - überschritten. Die jeweiligen Überschreitungshöhen summiert ergeben für die betrachtete Woche 82,6 Kh.

³ Vgl. Anmerkung 1 zu Tabelle 9 DIN 4108-2:2013-02: „Eine unterschiedliche Festlegung des Bezugswertes der operativen Innentemperatur ist wegen der Adaption des Menschen an das vorherrschende Außenklima gewählt. Würde in allen Regionen dieselbe Anforderung an das sommerliche Raumklima wie in der Sommer-Klimaregion A gestellt, könnte in den Sommerklimaregionen B und C keine für die Tageslichtbeleuchtung ausreichende Fenstergröße zugelassen werden.“

Abbildung 22: Darstellung von Übertemperaturgradstunden für eine exemplarische Sommer-Woche (Büro)



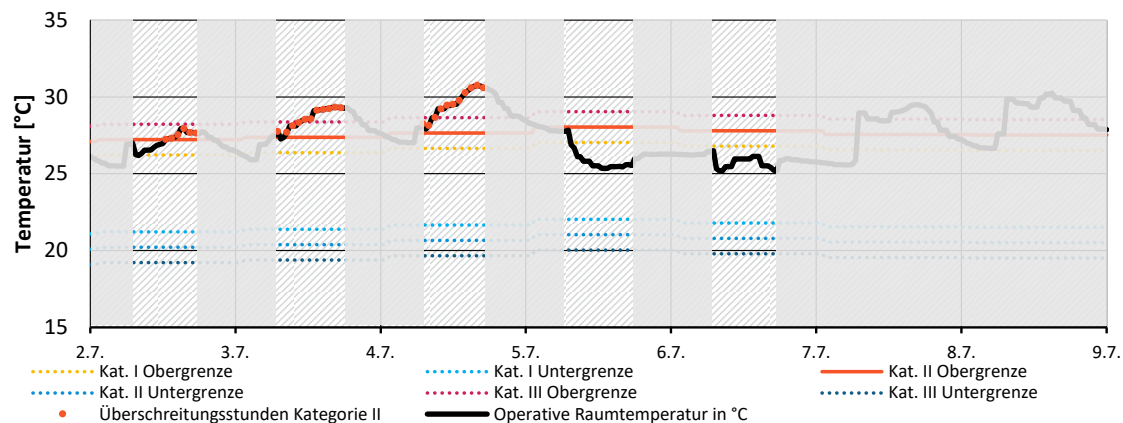
Quelle: eigene Darstellung, IBH

3.5.1.4 Adaptives Komfortmodell nach DIN EN 16798-1

Anhang B der DIN EN 16798-1 definiert -wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben- drei Komfortbänder durch untere und obere Temperaturgrenzen, innerhalb dieser die operative Raumtemperatur liegen sollte. Diese verlaufen in den Sommer- und Übergangsperioden bei ungekühlten Gebäuden direkt proportional zum gleitenden Mittelwert der Außenlufttemperatur, in welchen die Außenlufttemperaturen der vorherigen Tage eingehen. In der Heizperiode bzw. bei aktiv gekühlten Gebäuden sind diese Grenzen konstant (s. Abbildung 15). Thermische Simulationen werden auf Basis der Komfortbänder der EN 16798-1 hinsichtlich der Übertemperaturhäufigkeit ausgewertet (s. nachfolgendes Kapitel 3.5.1.4.1). Obwohl dies nach EN 16798-1 nicht vorgesehen ist, werden ergänzend für den anschließenden Vergleich auch die Übertemperaturgradstunden für das Komfortband der EN 16798-1 ausgewertet (s. Kapitel 3.5.1.4.2)

3.5.1.4.1 Auswertung Übertemperaturhäufigkeit

Die Übertemperaturhäufigkeit beschreibt den Anteil an Stunden, während derer die operative Raumtemperatur außerhalb der gewählten Kategorie liegt. Abbildung 23 zeigt beispielhaft die Auswertung der Übertemperaturhäufigkeit nach EN 16798-1. Gepunktet sind i. über Kategorie II. Während 30 Stunden der 55 Nutzungsstunden wird die Grenztemperatur der Kategorie II überschritten, was einer Übertemperaturhäufigkeit von 55 % in dieser Woche entspricht.

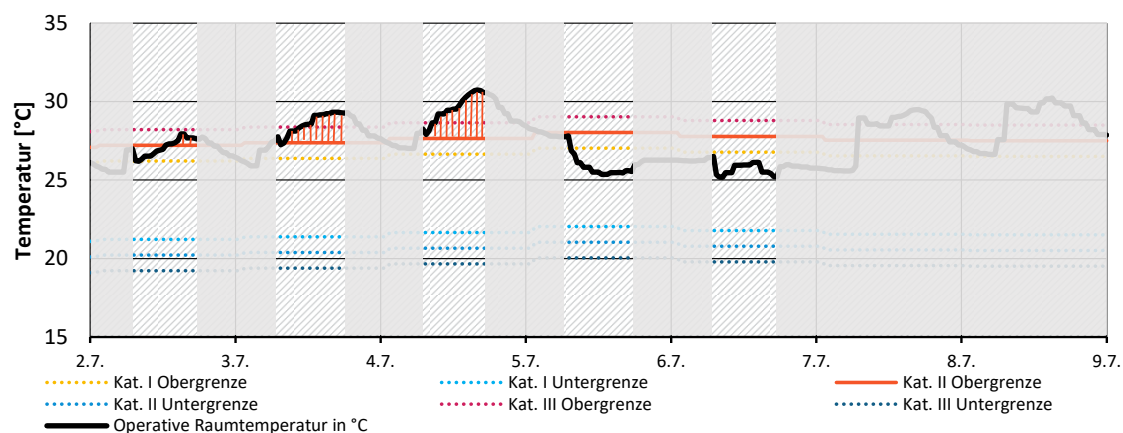
Abbildung 23: Darstellung der Übertemperaturhäufigkeit über Kategorie II für eine exemplarische Sommer-Woche (Büro)

Quelle: eigene Darstellung, IBH

3.5.1.4.2 Auswertung Übertemperaturgradstunden

In DIN EN 16798-1 wird nur die Auswertung von Übertemperaturstunden erwähnt, welche die adaptive Grenztemperatur beispielsweise von Kategorie II übersteigen (s. Kapitel 3.5.1.4.1). In Anlehnung an die DIN 4108-2 (s. Kapitel 3.5.1.3) soll in dieser Untersuchung zusätzlich eine Gewichtung der Übertemperaturen mit der Höhe der Überschreitung erfolgen. Diese Gewichtung führt zu den sogenannten Übertemperaturgradstunden und ermöglicht nachfolgend einen Vergleich mit dem Auswerteverfahren für thermische Simulationen anhand Übertemperaturgradstunden nach DIN EN 16798-1 und nach DIN 4108-2.

In Abbildung 24 sind die Übertemperaturgradstunden bei einer Auswertung entsprechend dem Komfortband der EN 16798-1 nach Kategorie II als rot schraffierte Fläche dargestellt. An 30 Stunden wird die Temperaturobergrenze der Kategorie II während der Nutzungszeit jeweils unterschiedlich hoch überschritten. Die jeweiligen Überschreitungshöhen summiert ergeben für die betrachtete Woche 51,7 Kh.

Abbildung 24: Darstellung der Übertemperaturgradstunden über Kategorie II für eine exemplarische Sommer-Woche (Büro)

Quelle: eigene Darstellung, IBH

3.5.1.5 Übertemperaturgradstunden nach dem Nationalen Anhang der DIN EN 16798-1

Im Nationalen Anhang (NA) der DIN EN 16798-1, der den Nationalen Anhang der DIN EN 15251 ersetzt, werden im Vergleich zur DIN EN 16798-1 stark abweichende Festlegungen getroffen. Der Nationale Anhang bezieht sich bei den behaglichkeitsrelevanten Kriterien auf die Kategorie II, Komfortbänder für andere Kategorien werden nicht beschrieben.

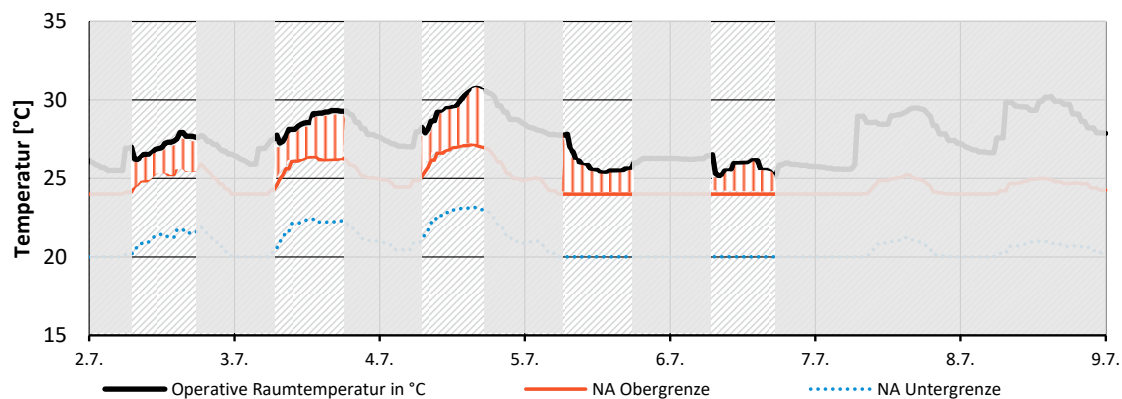
Die NA-Komfortraumtemperatur ist in Kapitel 3.3.4 in Abbildung 16 dargestellt und hängt nicht vom gleitenden Mittel der Außenlufttemperatur, sondern vom stündlichen Mittel der Außenlufttemperatur ab. Das Komfortband ist auf maximal 28 °C begrenzt.

Unterschiede des Nationalen Anhangs im Vergleich zum Komfortband der EN 16798-1 sind somit:

- der unterschiedliche Ansatz der Außenlufttemperatur für die Adaption der Komforttemperatur
- die Begrenzung auf eine maximale Komforttemperatur
- Geltungsbereich ist sowohl Heiz- als auch Kühlperiode⁴
- keine Unterscheidung zwischen maschineller und freier Kühlung

Abbildung 25 zeigt rot schraffiert die Übertemperaturgradstunden über der Komforttemperatur des Nationalen Anhangs für die exemplarische Sommer-Woche. Diese betragen 119,3 Kh.

Abbildung 25: Darstellung der Übertemperaturgradstunden über der Komforttemperatur des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 für eine exemplarische Sommer-Woche (Büro)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

3.5.1.6 Predicted Mean Vote (PMV) und Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)

In die Berechnung des Predicted Mean Vote (PMV) nach DIN EN ISO 7730 gehen neben der Lufttemperatur u.a. auch die Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte mit ein. Der PMV beschreibt das wahrscheinliche momentane Wärmeempfinden von Personen und nimmt Werte zwischen -3 (kalt) und +3 (heiß) an. Aus diesem errechnet sich der Anteil

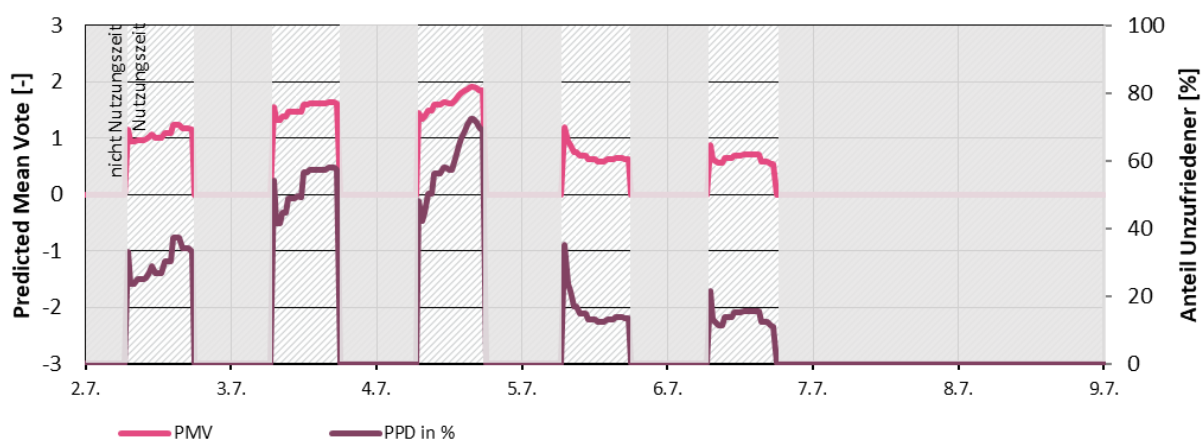
⁴ In der EN 16798-1 hingegen wird zwischen dem statischen Komfortband während der Heizperiode und dem adaptiven (ohne maschinelle Kühlung) bzw. statischen (maschinell gekühlt) Komfortband unterschieden, wobei die Übergänge zwischen Heiz- und Kühlperiode nicht klar beschrieben sind.

Unzufriedener (PPD). Anhang H der DIN EN ISO 7730 gibt verschiedene Möglichkeiten, die Komfortbewertung mithilfe des PMV über einen längeren Zeitraum zusammenzufassen.

- Anteil der Stunden, an denen der PMV einen festgelegten Bereich über- oder unterschreitet
- Gewichtete Zahl der Stunden, an denen der PMV einen festgelegten Bereich über- oder unterschreitet, gewichtet nach der Höhe der Über- oder Unterschreitung
- Mittlerer Anteil Unzufriedener (PPD)
- Summierung des PPD

In Abbildung 26 sind der Predicted Mean Vote (PMV) und der daraus resultierende Anteil Unzufriedener (PPD) während der exemplarischen Woche vom 2. – 9. Juli dargestellt. Der PMV liegt während der Nutzungszeit bei Werten zwischen 0,6 und 2, was ein „etwas warmes“ bis „warmes“ Empfinden der Nutzenden bedeutet. Daraus errechnet sich der Anteil Unzufriedener, welcher in dieser Woche zwischen 10 % und 72 % liegt und durchschnittlich 34 % beträgt.

Abbildung 26: Darstellung des PMV und des daraus resultierenden PPD für eine exemplarische Sommer-Woche (Büro)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

3.5.2 Vergleich der Auswertegrößen

Die vorgestellten Größen sollen nachfolgender noch detaillierter miteinander verglichen werden, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Auswertegrößen und Komfortansätze besser verstehen zu können. Hierfür wird zunächst der Verlauf der Auswertegrößen in einer Sommerwoche grafisch dargestellt und anschließend Auswertungen über ein Jahr gemacht.

3.5.2.1 Verlauf in einer exemplarischen Woche

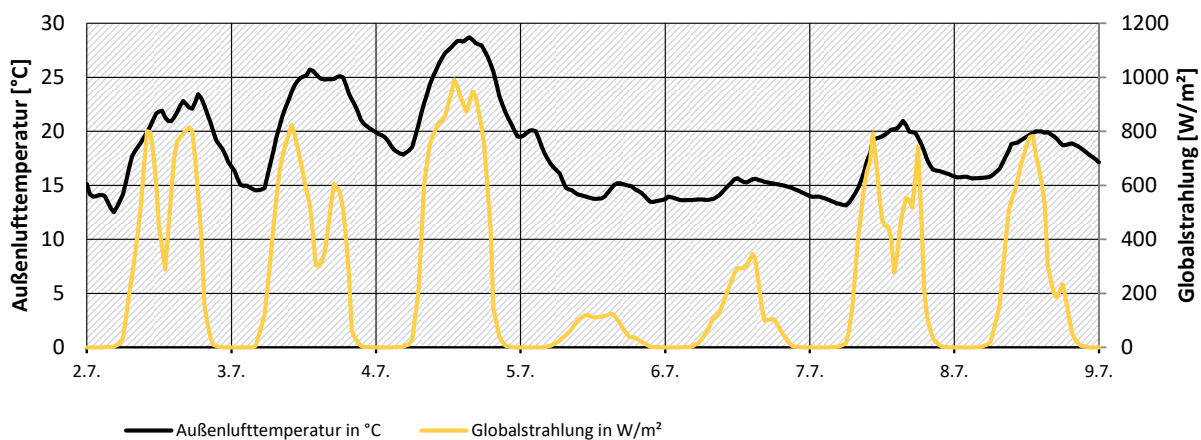
Wie sich die ausgewählten Auswertegrößen im Verlauf der exemplarischen Sommer-Woche vom 2. – 8. Juli (Montag bis Sonntag) entwickeln, ist in Abbildung 27 dargestellt. Die oberste Grafik zeigt zur Information die Einflussgrößen Außenlufttemperatur und Globalstrahlung. Im Diagramm darunter wird die **Raumtemperatur** ausgewertet: die Maximaltemperatur der Woche steigt bis zur Temperaturspitze am Mittwoch an, während die Durchschnittstemperatur bis zum Mittwochabend steigt, und danach durch den kühleren Donnerstag und Freitag wieder fällt.

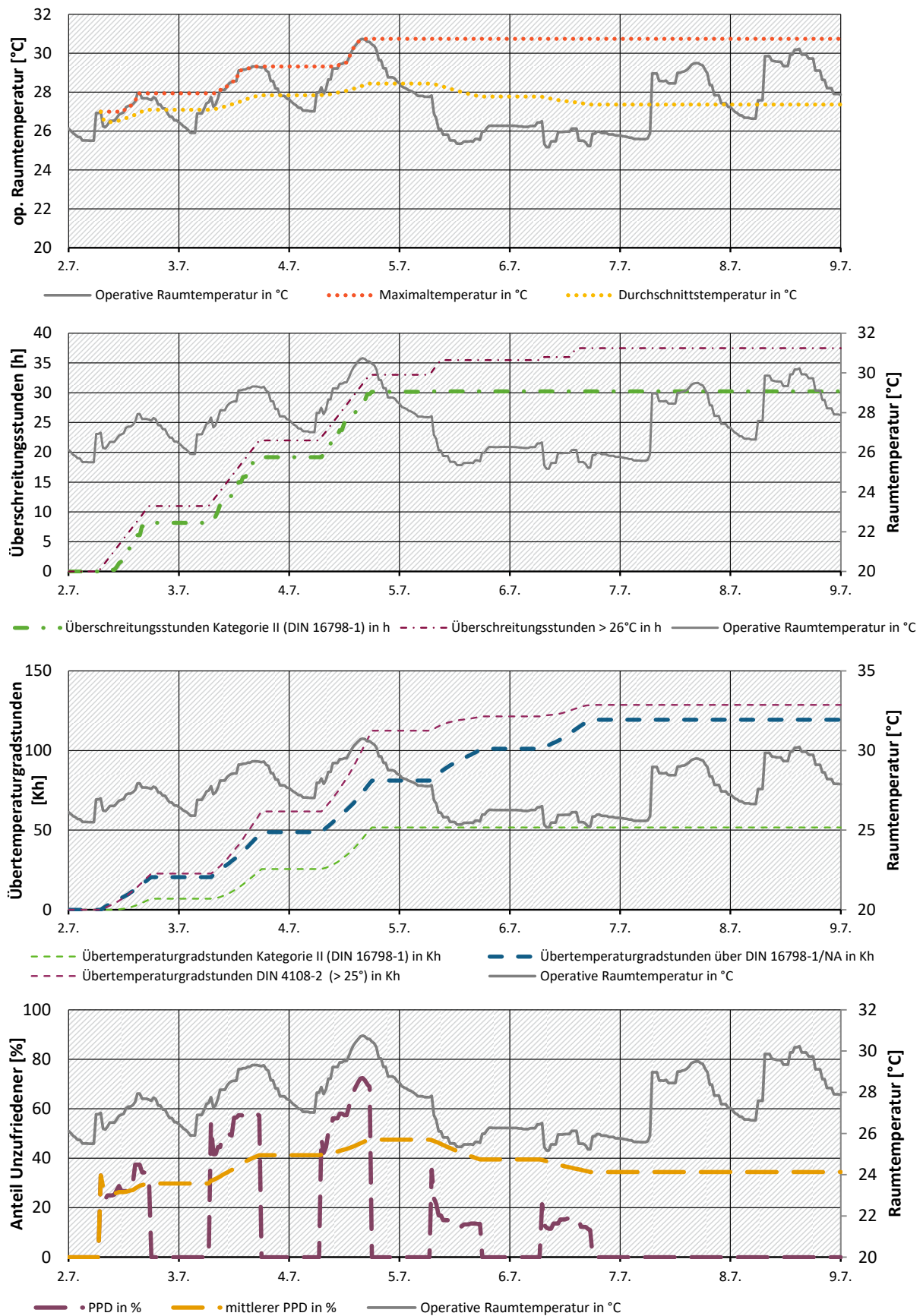
Danach wird die **Übertemperaturhäufigkeit** betrachtet bzw. hier zur besseren grafischen Darstellung die Überschreitungsstunden. Gezeigt werden die Überschreitungsstunden über 26 °C (vgl. Kapitel 3.5.1.2) sowie die Überschreitungsstunden nach Kategorie II des adaptiven Komfortmodells nach DIN EN 16798-1 (vgl. Kapitel 3.5.1.4.1). Die Überschreitungsstunden steigen abgesehen von einem geringen Versatz bis einschließlich Mittwoch gleichermaßen an, da beide Grenztemperaturen durchgehend überschritten werden. Ab Donnerstag steigen nur noch die Überschreitungsstunden über 26 °C stellenweise an, wohingegen die Überschreitungsstunden nach adaptivem Komfortmodells der DIN EN 16798-1 nicht weiter steigen, weil die Raumtemperatur nicht mehr über der Komforttemperatur der Kategorie II liegt, da diese die Adaptivität des Menschen an das Klima der vergangenen Tage einbezieht.

Im darunter anschließenden Diagramm werden die **Übertemperaturgradstunden** nach DIN 4108-2 mit 25 °C Bezugstemperatur für Rostock (s. Kapitel 3.5.1.3), nach Kategorie II des adaptiven Komfortmodells DIN EN 16798-1 (s. Kapitel 3.5.1.4.2) sowie nach dem Komfortmodell des Nationalen Anhangs (s. Kapitel 3.5.1.5) ausgewertet. Die Übertemperaturgradstunden nach Kategorie II der DIN EN 16798-1 steigen aufgrund der geringeren Differenz zwischen Raum- und Komfortgrenztemperatur schwächer an als die der DIN 4108-2 mit der starren 25 °C Grenztemperatur. Die Übertemperaturgradstunden des Nationalen Anhangs bleiben immer leicht unterhalb der von der DIN 4108-2, wobei die Steigung in Abhängigkeit der Außentemperatur unterschiedlich ausfällt. Hieran ist erkennbar, dass die Grenztemperatur beim Nationalen Anhang vom Mittel der stündlichen Außentemperatur abhängt, die der DIN EN 16798-1 vom gleitenden Mitteltemperatur über die letzten Tage. Daher verzeichnet die Auswertung nach Nationalem Anhang am Donnerstag und Freitag weiter Übertemperaturen trotz der niedrigeren Raumtemperaturen. In diesem Zusammenhang wäre von Fachgremien zu diskutieren, wie schnell die zumutbare Grenztemperatur nach einer Anpassung an hohe Außentemperaturen wieder absinkt.

Der **Anteil Unzufriedener (PPD)** verläuft während der exemplarischen Woche ähnlich zur Raumtemperatur, da die Raumtemperatur während der Nutzungszeit stets über den behaglichen Verhältnissen liegt. Somit steigt der mittlere PPD bis einschließlich Mittwoch an und fällt zum Ende der Woche wieder leicht ab - bis zum Wochenende, das wiederum außerhalb der Nutzungszeit liegt und nicht einfließt.

Abbildung 27: Verlauf der Kenngrößen in exemplarischen Sommer-Woche (Beispiel Rostock, TRY2045x, MIN)





Quelle: eigene Darstellung, IBH

3.5.2.2 Auswertung über ein Jahr

3.5.2.2.1 Methodik und Randbedingungen

Um die Unterschiede zwischen den Auswertegrößen zu analysieren, werden diese zur Auswertung der thermisch-dynamischen Simulation des in Kapitel 4.3 definierten, nach Westen orientierten Büroraums mit 20,7 m² Nettoraumfläche herangezogen. Der Modellraum mit Fensterband weist einen grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil von 34 % auf. Die Bauteile entsprechen einer leichten Bauweise und GEG-Standard. Er wird montags bis freitags von zwei Personen von 7 – 18 Uhr genutzt und verfügt über einen außenliegenden Sonnenschutz, der bei einer Solarstrahlung von 200 W/m² auf Fassadenaußenfläche betätigt wird. Es werden analog zu den in Kapitel 4.5 beschriebenen Randbedingungen der Parameterstudie die Varianten MIN (wenig Vorkehrung gegen Überhitzung), STD (normale Vorkehrung gegen Überhitzung) und MAX (viel Vorkehrung gegen Überhitzung) untersucht, für welche die Merkmale in Tabelle 12 zusammengestellt sind. Als Klimadaten werden die Wetterdatensätze des DWD für das Normaljahr mit dem Bezugszeitraum 2031 – 2060 (TRY 2045) an den Standorten Rostock, Potsdam und Mannheim (Vorort) verwendet. Weitere Randbedingungen sind wie in Kapitel 4.5 beschrieben angesetzt.

Tabelle 12: Randbedingungen der Varianten MIN, STD und MAX

	MIN	STD	MAX
Sonnenschutz	Außenliegende Jalousie	Außenliegende Jalousie	Außenliegende Jalousie + Sonnenschutzverglasung
Taglüftung 7 - 18 Uhr (Mo – Fr)	Fensterlüftung (vereinfacht mit konstantem Luftwechsel von $n = 1,33 \text{ h}^{-1}$ und Erhöhung auf $n = 3 \text{ h}^{-1}$ bei Raumtemperatur $> 23 \text{ °C}$ und $> \text{AT}$ abgebildet)	Fensterlüftung (vereinfacht mit konstantem Luftwechsel von $n = 1,33 \text{ h}^{-1}$ und Erhöhung auf $n = 3 \text{ h}^{-1}$ bei Raumtemperatur $> 23 \text{ °C}$ und $> \text{AT}$ abgebildet)	Mechanische Lüftung mit adiabater Kühlung Konstanter Luftwechsel von $n=1,33 \text{ h}^{-1}$ und zusätzliche Fensterlüftung $n = 1,66 \text{ h}^{-1}$ bei Raumtemperatur $> 23 \text{ °C}$
Nachtlüftung 18 - 7 Uhr	keine	Freie Nachtlüftung (vereinfacht mit konstantem Luftwechsel von $n = 2 \text{ h}^{-1}$ wenn Raumtemperatur $> 21,5 \text{ °C}$ abgebildet)	Mechanische Nachtlüftung Konstanter Luftwechsel von $n = 2 \text{ h}^{-1}$, wenn Raumtemperatur $> 21,5 \text{ °C}$

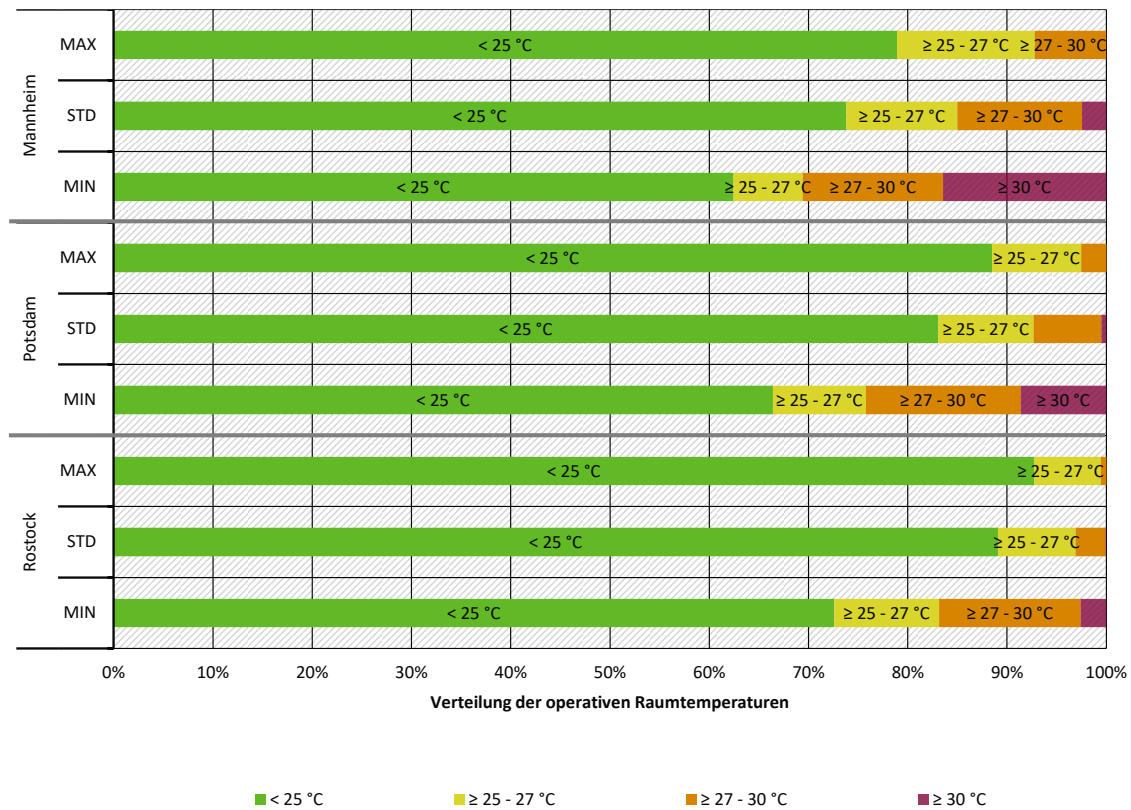
Da es in dieser Untersuchung allein um die Thematik des sommerlichen Wärmeschutzes geht, werden im Falle von Auswertungen von Komfortbändern nur Überschreitungen ausgewertet. Hingewiesen werden soll auch auf die Büro-Nutzungszeiten: die Auswertung erfolgt nur für Nutzungszeiten, Überschreitungen außerhalb der Nutzungszeiten werden nicht ausgewertet.

3.5.2.2.2 Auswertung

Eine möglichst anschauliche Auswertung wird in Abbildung 28 gezeigt. Die Verteilung der operativen Raumtemperaturen eines Jahres wird in mehrere Temperaturbereiche eingeteilt und farblich markiert. Diese graphische Art der Auswertung ist sehr anschaulich, leicht verständlich und greifbar. Da sie jedoch nicht einen einzelnen Wert je Variante liefert, ist diese Art wenig

geeignet für die Auswertung von vielen Varianten, wie beispielsweise in diesem Forschungsprojekt.

Abbildung 28: Darstellung der Verteilung der operativen Raumtemperaturen



Quelle: eigene Darstellung, IBH

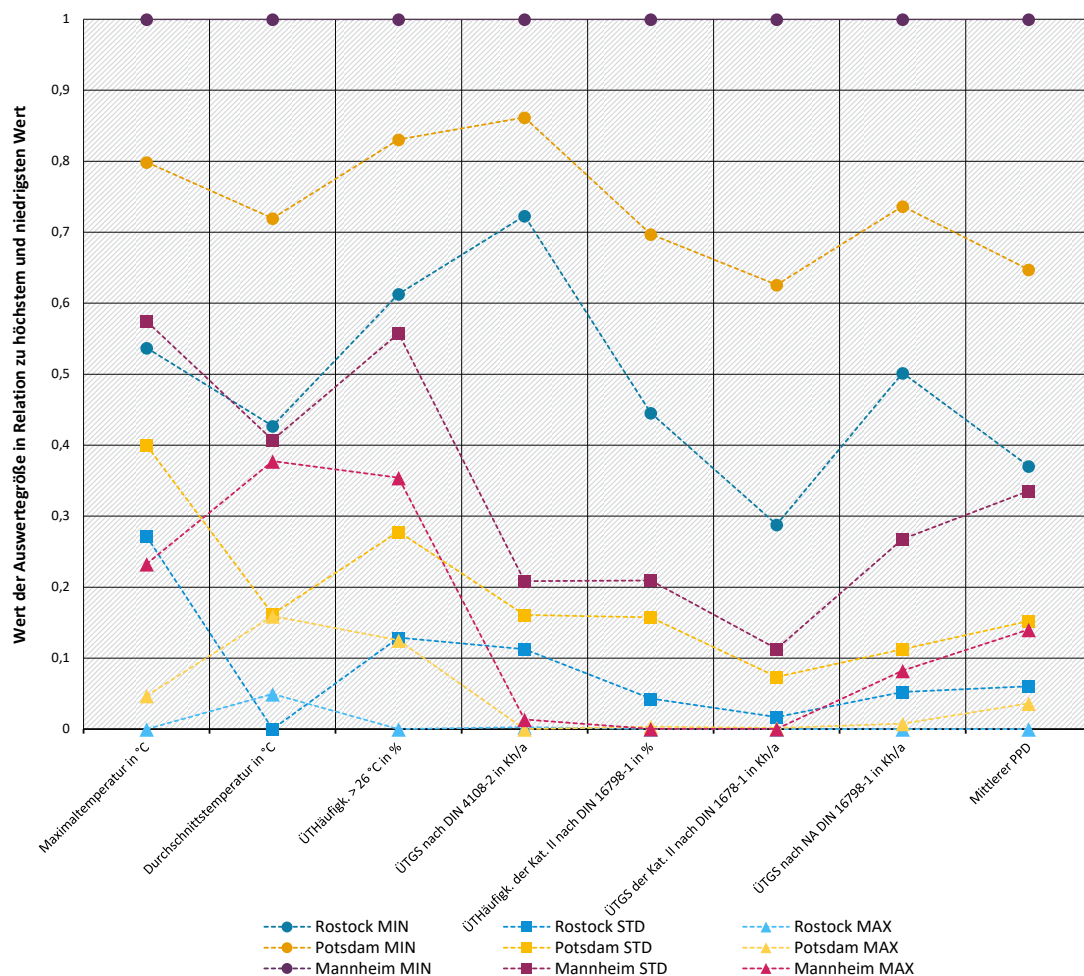
In Tabelle 13 sind die Ergebnisse für die Auswertegrößen, welche aus jeweils einem einzelnen Zahlenwert bestehen, für ein Jahr angegeben.

Tabelle 13: Ergebniswerte der untersuchten Varianten für ausgewählte Auswertegrößen

	Rostock			Potsdam			Mannheim		
	MIN	STD	MAX	MIN	STD	MAX	MIN	STD	MAX
Maximale op. Raumtemperatur (Stundenmittelwert) in °C	32,2	30,3	28,3	34,1	31,2	28,7	35,6	32,5	30,0
Durchschnittstemperatur in °C	23,5	22,6	22,7	24,2	23,0	22,9	24,8	23,5	23,4
Übertemperaturhäufigkeit > 26 °C in %	22 %	6 %	2 %	29 %	11 %	6 %	35 %	20 %	14 %
Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2 in Kh/a	2079	461	171	2446	590	163	2813	716	199
Übertemperaturhäufigkeit der Kat. II nach DIN EN 16798-1 in %	11 %	1 %	0 %	18 %	4 %	0 %	25 %	5 %	0 %
Übertemperaturgradstunden der Kat. II nach DIN EN 16798-1 in Kh/a	441	28	2	956	114	5	1525	174	2
Übertemperaturgradstunden nach NA DIN EN 16798-1 in Kh/a	2116	253	37	3089	503	69	4180	1147	379
Mittlerer PPD in %	12 %	7%	6 %	17 %	9 %	7 %	22 %	12 %	8 %

Die nachfolgende Abbildung 29 stellt diese Ergebnisse der Varianten je Auswertegröße im relativen Vergleich zueinander dar. Je Auswertegröße erhält also die Variante mit dem höchsten Ergebnis den Wert 1, die mit dem niedrigsten Ergebnis den Wert 0 und alle übrigen Varianten werden dazwischen entsprechend ihrem normierten Ergebnis positioniert. Die gestrichelten Linien erleichtern zu identifizieren, bei welchen Auswertegrößen sich die Reihenfolge der Variantenbewertung tauscht.

Abbildung 29: Ergebniswerte der Auswertegrößen im relativen Vergleich für die Maßnahmenpakete MIN, STD und MAX an den Standorten Rostock, Potsdam und Mannheim



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Die Maximalwerte (der Stundenmittelwerte) der Raumtemperatur sind aufgrund der Momentaufnahme einer einzelnen Stunde wenig aussagekräftig für den sommerlichen Komfort. Dennoch lassen sich die Auswirkungen der Maßnahmenpakete sowie des Standorts erkennen. Für die Variante MIN Mannheim ergibt sich die höchste Maximaltemperatur, gefolgt von der Variante MIN Potsdam. Die errechneten Durchschnittstemperaturen zeigen weniger starke Unterschiede: STD- und MAX-Varianten liegen nah beieinander. Dies ist eine gänzlich andere Verteilung als bei den Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2, welche wenig Unterschiede bei den Standorten, dafür deutliche bei den Maßnahmenpaketen zeigt. Auch die ausgewerteten Übertemperaturhäufigkeiten und die Übertemperaturgradstunden nach DIN EN 16798-1 weisen einen größeren Unterschied zwischen den Maßnahmenpaketen als zwischen den Standorten auf, da die Grenztemperaturen pauschal über die jeweilige Klimaregion oder entsprechend dem Außenklima angepasst werden. Dadurch liegt der Fokus dieser Auswertegrößen auf der Bewertung der Gebäudequalität und nicht auf den absolut vorherrschenden Raumtemperaturen. Gegensätzlich hierzu verhält sich der mittlere PPD, der ausschließlich die im Innenraum herrschenden thermischen Verhältnisse bewertet und eine Adaption an das Außenklima außer Acht lässt. Die Übertemperaturgradstunden nach Nationalem Anhang der DIN EN 16798-1 spannen die Brücke zwischen der Bewertung relativ zum Außenklima und der absolut im Innenraum vorherrschenden thermischen Verhältnisse, da die Grenztemperatur nur bis maximal 28 °C relativ zum Außenklima adaptiv angesetzt ist. Zu erkennen ist dies gut in Abbildung 29, da die Ergebnisverteilung bei den

Varianten (Potsdam STD und MAX sowie Mannheim STD und MAX) zwischen den Übertemperaturgradstunden nach DIN EN 16798-1 und mittlerem PPD liegt, bei den besonders warmen MIN-Varianten jedoch vergleichsweise höhere Ergebniswerte auftreten als bei den Übertemperaturgradstunden nach DIN EN 16798-1 bzw. des mittleren PPD.

Hinsichtlich einer Auswertung von Übertemperaturhäufigkeit im Vergleich zu Übertemperaturgradstunden fällt der nur geringe Unterschied in den Varianten mit kühleren Raumtemperaturen auf. Der Unterschied nimmt jedoch aufgrund der Gewichtung der Übertemperaturgradstunden durch die Höhe der Überschreitung bei den wärmeren MIN-Varianten stark zu.

Interessant ist auch ein Vergleich der sich ergebenden Unterschiede der Auswertung von Übertemperaturgradstunden nach Nationalem Anhang im Vergleich zur DIN 4108-2 (s. Tabelle 13). Für diese Beispielsimulationen lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse in vergleichbarer Größenordnung liegen. Größere Abweichungen gibt es beim Standort Rostock für die Varianten STD und MAX (NA-Werte liegen deutlich unter denen der DIN 4108-2) und beim Standort Mannheim (NA-Werte liegen über denen der DIN 4108-2). Diese Verschiebungen lassen sich damit erklären, dass für den Standort Rostock mit dem NA-Komfortband in Abhängigkeit der Außentemperatur auch Raumtemperaturen über 25° zulässig sein können, beim Standort Mannheim hingegen tragen beim NA-Komfortband bei entsprechend niedrigen Außentemperaturen auch Raumtemperaturen unter 27° zu den Übertemperaturgradstunden bei.

3.5.2.2.3 Analyse von Stärken und Schwächen

In Form einer Tabelle werden die Stärken und Schwächen der einzelnen Auswertegrößen gegenübergestellt. (s. Tabelle 14)

Tabelle 14: Stärken und Schwächen der untersuchten Auswertegrößen

	Stärken	Schwächen
Maximaltemperatur	- leicht verständlich - einfache Auswertung	- nur Aussage über einen einzigen Stundenwert
Durchschnittstemperatur	- leicht verständlich - einfache Auswertung	- ohne Schwankungsbreite nicht einzuordnen
Einteilung der Raumtemperaturen in farbige Temperaturbereiche	- sehr anschaulich - leicht verständlich	- quantitativer Vergleich zwischen Varianten schwierig
Übertemperaturhäufigkeit (z.B. > 26 °C)	- leicht verständlich - einfache Auswertung	- keine Unterscheidung ob knappe oder hohe Überschreitung - Anpassung des Menschen an Klima wird ignoriert
Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2	- Fokus auf Gebäudequalität - Höhe der Überschreitung geht mit ein	- „fördert“ einheitliches statt klimagerechtes Bauen - harte Grenzen zwischen Klimaregionen - ÜTGS nicht anschaulich
Übertemperaturhäufigkeit der Kat. II nach DIN EN 16798-1	- anschaulicher als ÜTGS - Adaptivität des Menschen abgebildet über Bezug auf gleitenden Außentemperatur-Mittelwert der vorangegangenen Tage	- Gleitender Mittelwert der Außentemperatur ist komplizierte Größe

	Stärken	Schwächen
Übertemperaturgradstunden der Kat. II nach DIN EN 16798-1	- Adaptivität des Menschen abgebildet über Bezug auf gleitenden Außen-temperatur-Mittelwert der vorangegangenen Tage	- setzt unbegrenzte Anpassungsfähigkeit des Menschen an warme Außentemperaturen voraus - Komfortband im Übergang zwischen Heiz- und Kühlperiode nicht klar - ÜTGS nicht anschaulich - keine in DIN EN 16798-1 beschriebene Auswertegröße
Übertemperaturgradstunden nach Nationalem Anhang der DIN EN 16798-1 in Kh/a	- Stundenmittelwert der Außenlufttemperatur leichter nachvollziehbar als gleitender Mittelwert - Adaptivität des Menschen geht vereinfacht mit ein - Grenze der Adaption bei Raumtemperatur von 28°C - für Heiz- und Kühlperiode lückenloses Komfortband	- Komforttemperatur nur vom Stundenmittelwert der Außenlufttemperatur abhängig - ÜTGS nicht anschaulich - findet in keiner Methode Anwendung
Mittlerer PPD	- ganzheitliche Bewertung des thermischen Komforts - Mensch im Fokus - gut vorstellbar	- Luftgeschwindigkeit wird in gängigen therm. Simulationen kaum betrachtet - Anpassung des Menschen an Klima wird ignoriert

3.5.2.2.4 Schlussfolgerung

Für die Auswertung von thermischen Simulationen – wie auch im Rahmen dieses Forschungsprojekts - ist eine Auswertungsgröße notwendig, die einen einzelnen, gut vergleichbaren Wert ausgibt. Diese sollte die thermische Behaglichkeit im Innenraum möglichst des gesamten Sommers widerspiegeln. Zusätzlich sollte sie sich für die Bewertung des menschlichen Behaglichkeitsempfindens sowohl bei heutigem als auch bei zukünftigem Klima eignen. Vorteilhaft wäre ferner, wenn die Größe zumindest unter Fachleuten schon bekannt und gängig ist.

Eine leicht verständliche Größe wie die Übertemperaturhäufigkeit über eine festzulegende Temperaturgrenze scheint in Zeiten des Klimawandels zu ungenau, da sie die menschliche Adaption an die Umgebungstemperatur nicht einfließt.

Eine gängige Auswertegröße sind die Übertemperaturgradstunden wie sie für den Nachweis nach DIN 4108-2 bei thermischen Simulationen ermittelt werden. Allerdings sind diese keine gängige Größe zur Bewertung von „freien“ Simulationen, auch weil die starren Bezugstemperaturen in Abhängigkeit der Sommerklima-Region für eine genauere Bewertung nicht geeignet sind.⁵

Den Nachteil von starren Bezugstemperaturen weist die Nachweisgröße der DIN EN 16798-1 mit einem Komfortband, das die Adaption an warme Außentemperaturen über den Bezug zum gleitenden Mittelwert der Außentemperatur berücksichtigt, nicht auf. Allerdings ist die Berechnung der Übertemperaturhäufigkeit durch die fehlende Berücksichtigung der Höhe der Überschreitung nicht so aussagekräftig. Aus diesem Grund wurde das Komfortband der DIN EN

⁵ Dieser Nachteil kann in der vorliegenden Studie nicht detaillierter eingeschätzt werden, da nur Standorte betrachtet werden, welche die jeweilige Sommerklima-Region repräsentieren (vgl. Kap. 4.4.2.1). Wird jedoch schon in (Maas, Schlitzberger, S. 88) thematisiert: „Bereits die Simulationsrechnungen unter Ansatz der 15 für die verschiedenen TRY-Regionen geltenden Normal-TRYs zeigen für das Gebiet Deutschlands eine große Bandbreite hinsichtlich der infolge des Klimaeinflusses auftretenden thermischen Beanspruchungen des Innenraumklimas ..., sodass die Festlegung auf die TRY-Datensätze 2, 4 und 12 für die Klimaregionen A, B und C dieser Bandbreite nur schwer gerecht werden kann ...“

16798-1 hier auch anhand Übertemperaturgradstunden ausgewertet. Tatsächlich sind Verschiebungen im Vergleich zur Auswertung der Übertemperaturhäufigkeit ersichtlich. Nachteil dieser Auswertegröße ist, dass sie in keiner DIN beschrieben ist.

Die Auswertung der Übertemperaturgradstunden nach dem Komfortband des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 birgt im Vergleich zu den anderen untersuchten Auswertegrößen folgenden Vorteil: In einem gewissen im Sommer relevanten Außentemperatur-Bereich ist das Komfortband adaptiv. Gleichzeitig wird aber durch die definierte Unbehaglichkeit bei Raumtemperaturen über 28 °C dem menschlichen Empfinden Beachtung geschenkt, dessen Anpassungsfähigkeit nicht bis zu „unendlich hohen“ Temperaturen reichen dürfte. Vor- und Nachteile birgt die Anpassung der Grenztemperatur in Abhängigkeit der (aktuellen) stündlich gemittelten Außentemperatur: Sie ist einfacher zu verstehen als der gleitende Mittelwert, andererseits könnte es sein, dass sich die Anpassungsfähigkeit des Menschen an die Außentemperaturen langsamer als die stündliche Betrachtung vollzieht. Diese Thematik kann im Rahmen dieser Studie nicht beurteilt werden. Nachteilig ist sicherlich, dass die Auswertung nach Nationalem Anhang derzeit noch in keiner Methode (Nachweismethode, Bewertungsmethode) Anwendung findet.

Durch den Vergleich der normierten Ergebnisse ergeben sich interessante Erkenntnisse: Bei einer Auswertegröße, die die Adaption des Menschen an wärmere Temperaturen berücksichtigt, wie es bei dem adaptiven Komfortband der EN 16798-1 oder durch die Bezugstemperaturen bei der DIN 4108-2 der Fall ist, kann der Fokus bei der Auswertung auf die Qualität der Maßnahmen gelegt, d.h. die Frage beantwortet werden: Wie gut schützt das Gebäude vor Überhitzung? Wertet man hingegen allein die Raumtemperaturen ohne Bezug auf die äußeren Bedingungen aus und bewertet diese, wie beim PPD und der Auswertung von Übertemperaturhäufigkeiten mit fester Grenztemperatur, haben die Klimadaten entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse. Beides hat seine Berechtigung. Die Auswertung nach dem Komfortband des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 mit einem adaptiven Modell mit einer starren Grenze bei niedrigen und hohen Außentemperaturen ist eine Mischung der beiden Betrachtungsweisen.

Schlussfolgerung Auswertegröße für die Parameterstudie (Kapitel 4)

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Auswertegrößen ist das Komfortband des Nationalen Anhangs DIN EN 16798-1/NA am überzeugendsten und wird zur Auswertung der Parameterstudie herangezogen. Nachteilig an dieser Auswahl ist, dass die Auswertung nach Nationalem Anhang derzeit - im Gegensatz zur Auswertung von Übertemperaturgradstunden nach 4108-2 (Nachweismethode) oder zur Übertemperaturhäufigkeit nach DIN EN 16798-1 (Komfort-Bewertungsmethode) - noch in keiner Methode, angewendet wird.

Dennoch ist es ein Wesensmerkmal der Normenarbeit, dass sie ständiger Überarbeitungen unterliegen und demnach sich auch Methoden in Normen ändern können. Daher soll diese Wahl nicht als Nachteil erachtet, sondern als Anregung dienen, die Vorteile des Komfortbandes des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 in weiterer Normenarbeit aufzunehmen.

3.5.3 Anforderungswerte

3.5.3.1 Überblick

Für die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Auswertegrößen werden unterschiedliche Anforderungswerte vorgegeben. Die Festlegung der Anforderungswerte steht immer im Zusammenhang mit der Zielstellung der jeweiligen Norm bzw. Bewertungsmethodik.

Eine Übersicht über Vorgaben gibt Kapitel 3.3. Die wichtigsten sind hier nochmals kurz aufgeführt:

- ▶ **DIN 4108-2:2013-02**
Der Anforderungswert bezieht sich auf Übertemperaturgradstunden und liegt für Wohngebäuden bei 1.200 Kh/a und für Nichtwohngebäuden bei 500 Kh/a.
- ▶ **DIN EN 16798-1:2022-03 (ersetzt DIN EN 15251:**
Der Anforderungswert bezieht sich auf Übertemperaturhäufigkeit und kann individuell festgelegt werden⁶. Nach dem Anhang G der mittlerweile zurückgezogenen DIN EN 15251 soll die Übertemperaturhäufigkeit nicht mehr als 3 % oder 5 % der Nutzungszeit betragen⁷
- ▶ **Nationaler Anhang der DIN EN 16798-1:2022-03**
Der Anforderungswert bezieht sich auf Übertemperaturgradstunden („Gradstunden-Kriterium“). Abweichungen vom Toleranzbereich (s. Abbildung 16) sind zulässig, „wenn in weniger als 1 % der Nutzungszeit des Raums die Abweichung vom Toleranzbereich für die operative Raumtemperatur 2 K beträgt.“ Zusätzlich darf die Überschreitung zu keinem Zeitpunkt während der Nutzungszeit mehr als 2 K betragen.
- ▶ **DIN EN ISO 7730**
Die Anforderungswerte beziehen sich auf den PMV oder PPD. Für Kategorie B (entsprechend Kategorie II) müsste der PPD kleiner als 10 % sein. PMV und PPD bilden jedoch nur Momentaufnahmen ab und sind daher für eine Auswertung von thermischen Simulationen ungeeignet. Im Anhang H werden daher Möglichkeiten der Langzeitbewertung genannt, z.B. die Berechnung des mittleren PPD. Anforderungswerte werden allerdings nicht angegeben.

Die Anforderungswerte für die Auswertung von dynamisch-thermischen Simulationen sind in Tabelle 15 nochmal zusammengestellt. Für eine Vergleichbarkeit sind die vorgegebenen Nutzungszeiten bzw. Beispiel-Nutzungszeiten angegeben, so dass die entsprechenden Anforderungswerte für diese absolut und prozentual ermittelt werden können.

⁶ Für individuell angepasste (personalisierte) Anlagen s. FprCEN/TR 16798-2. Standardwerte für Überschreitungen sind ebenfalls in FprCEN/TR 16798-2 aufgeführt.

⁷ In der DIN EN 16798-1 steht: "Standardwerte für Überschreitungen sind in FprCEN/TR 16798-2 ... aufgeführt." Die CEN/TR 16798-2 liegt nur in der englischen Fassung der British Standards Institution vor und ist in dem den Verfassern vorliegenden Normenpaket nicht enthalten.

Tabelle 15: Anforderungswerte für die Auswertung dynamisch-thermischer Simulationen

Norm	Verfahren	Nutzungszeit	Anforderungswert
DIN 4108-2: 2013-02 (Kapitel 8.4)	thermische Simulation mit vorgegebenen Randbedingungen	Wohngebäude: 8.760 h/a Nichtwohngebäude (Mo - Fr 7.00 bis 18.00): 2.871 h/a	Zulässige Übertemperaturgradstunden: - Wohngebäude ≤ 1.200 Kh/a - Nichtwohngebäude ≤ 500 Kh/a
DIN EN 16798-1 (ersetzt DIN 15251)	Auswertung von thermischen Simulationen über statisches bzw. adaptives Komfortmodell und Einteilung in Kategorien I bis IV	Je nach angesetzter Nutzungszeit: - Wohnen 8.760 h/a (durchgehend) - Büro z.B. Mo - Fr 7:00 bis 18:00 führen zu 2.871 h/a - Schule z.B. Mo - Fr 7:30 bis 15:30 außerhalb Ferienzeiten führen zu ca. 1.200 h/a	Zulässige Überschreitungshäufigkeit kann individuell festgelegt werden. Bei zulässigen 5 % ergäben sich für die Beispiel-Nutzungszeiten: - Wohnen ≤ 438 h/a - Büro ≤ 144 h/a - Schule ≤ 60 h/a
Nationaler Anhang der DIN EN 16798-1:2022-03	Auswertung von thermischen Simulationen über NA-Komfortband für Kategorie II	Je nach angesetzter Nutzungszeit (s. DIN EN 16798-1)	Zulässige Übertemperaturgradstunden ($< 1\%$ der Nutzungszeit Abweichung um 2 K), d.h. für die Beispiel-Nutzungszeiten: - Wohnen < 175 Kh/a - Büro < 57 Kh/a - Schule < 24 Kh/a

Quelle: eigene Zusammenstellung, IBH

Der Anforderungswert des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1:2022-03 liegt im Vergleich zu den anderen Normen sehr niedrig. Wie Tabelle 15 zu entnehmen ist, ergeben sich für die Beispiel-Nutzungszeiten für Wohnräume < 175 Kh/a, für Büroräume < 57 Kh/a und für Klassenzimmer < 24 Kh/a.⁸ Im Vergleich dazu liegen die ÜTGS-Anforderungswerte nach DIN 4108-2:2013-02 für Wohngebäude bei 1.200 Kh/a und für Nichtwohngebäuden bei 500 Kh/a deutlich höher.

Bei einer Umrechnung der ÜTGS-Anforderungswerte nach DIN 4108-2 auf das prozentuale Gradstunden-Kriterium des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1:2022-03 mit einer zulässigen Abweichung für die Komforttemperatur von 2 K ergäbe sich eine prozentual auf die Nutzungszeit bezogene mögliche Überschreitung von:

Wohngebäude: $(1.200 \text{ Kh/a} / 8.760 \text{ h/a}) : 2 \text{ K} = 7 \%$ der Nutzungszeit

Nichtwohngebäude: $(500 \text{ Kh/a} / 2.871 \text{ h/a}) : 2 \text{ K} = 9 \%$ der Nutzungszeit

Verglichen mit der zulässigen Abweichung von 1% der Nutzungszeit des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 ist dies ein Vielfaches.

Die Festsetzung der Anforderungswerte ist von der jeweiligen Methodik und den Zielen abhängig und so sind auch die großen Unterschiede erklärbar.

⁸ Tel. Auskunft am 17.12.21 vom Fachverband Gebäude-Klima e. V. zum Hintergrund der so niedrig angesetzten zulässigen ÜTGS: Bei der Festlegung wurde die Erwartung aus Sicht Nutzer*innenzugrunde gelegt, d.h. „was ist für den Nutzer / die Nutzerin zumutbar?“, und nicht, „was muss das Gebäude leisten?“

3.5.3.2 Schlussfolgerung

Grundsätzlich sollte Methodik, Auswertegröße und Anforderungswert stringent nur einer Norm entnommen werden, da diese aufeinander abgestimmt sind.

Es zeigt sich, dass für die gewählte Methodik und Auswertegröße der zulässige Anforderungswert nach Nationalem Anhang für die Zielstellung dieser Studie nicht geeignet ist, weil er sich auch an gekühlten Gebäuden orientiert. Ein derart niedriger Anforderungswert ist für ungekühlte Gebäude schwer zu erreichen, so dass eine alternative Vorgehensweise für diese Studie gewählt wird, die in nachfolgender Textbox beschrieben und in Tabelle 16 zusammengefasst ist.

Schlussfolgerung Anforderungswert für die Parameterstudie (Kapitel 4)

Für die Parameterstudie dieser Forschungsarbeit, für die eine Auswertung nach dem Komfortband des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1:2022-03 erfolgt, wird ein Anforderungswert analog der in dieser Norm beschriebenen prozentual auf die Nutzungszeit bezogenen Abweichung mit einer Überschreitung von 2 K in Form von Übertemperaturgradstunden gewählt. Da die erlaubte Abweichung nach Nationalem Anhang äußerst niedrig festgelegt wurde, um eine hohe Nutzungszufriedenheit zu gewährleisten, ist dieser Sollwert, der auch für gekühlte Gebäude gilt, nicht für die Auswertung der Simulationen mit rein passiven Maßnahmen geeignet.

Die Übertemperaturgradstunden-Anforderungswerte der DIN 4108-2:2013-02 gelten ebenfalls für ungekühlte und gekühlte Gebäude, jedoch darf die aktive Kühlung in der Simulation nicht berücksichtigt werden.

Mit diesem Hintergrund werden für die Auswertung dieser Studie die auf die errechnete prozentuale Abweichung nach DIN 4108-2:2013-02 und somit auf die Gebäudequalität bezugnehmenden Anforderungswerte auf einen auf die prozentuale auf die Nutzungszeit bezogene zulässige Überschreitung übertragen (s. Tabelle 16). Eine gebäudebezogene Anforderungswertsetzung für die Auswertungsgröße nach Nationalem Anhang der DIN EN 16798-1 (Kategorie II) sollte in der weiteren Normenarbeit noch erfolgen, damit das sinnvoll gewählte Komfortband auch für die Bewertung von thermischen Simulationen ungekühlter Gebäude Anwendung finden kann.

Tabelle 16: Anforderungswerte für die Auswertung der dynamisch-thermischer Simulationen der vorliegenden Studie

	Verfahren	Nutzungszeit	Anforderungswert
Vorliegende Studie	Auswertung von thermischen Simulationen über Komfortband des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1:2022-03 (Kategorie II)	<ul style="list-style-type: none"> - Wohnen durchgehend: 8760 h/a - Büro (Mo - Fr 7:00 bis 18:00): 2.871 h/a - Schule (Mo - Fr 7:30 bis 15:30 außerhalb Ferienzeit): 1.203 h/a 	Zulässige Übertemperaturgradstunden - Wohngebäude $\leq 7\%$ der Nutzungszeit Abweichung um 2 K - Nichtwohngebäude $\leq 9\%$ der Nutzungszeit Abweichung um 2 K Dies führt zu zulässigen ÜTGS bei nebenstehenden Beispiel-Nutzungszeiten von: - Wohnräume $\leq 1.226 \text{ Kh/a}$ - Büroräume $\leq 517 \text{ Kh/a}$ - Klassenzimmer $\leq 217 \text{ Kh/a}$

Quelle: eigene Zusammenstellung, IBH

3.6 Klimadaten – Testreferenzjahre TRY

Eine wesentliche Eingangsgröße für die Bewertungsmethoden sind die Klimadaten. Diese gehen beispielsweise bei der Gebäudebilanzierung nach GEG (mit Verweis auf DIN V 18599-10: 2018-09 Tabelle E.1) oder im PHPP (vgl. Blatt „Klima“) in Form von Monatsmittelwerten in die Bilanzierung ein. Für die thermische Gebäudesimulation hingegen sind Monatsmittelwerte nicht ausreichend. Für Simulationen ist eine Auflösung mindestens in Stundenwerten nötig. Klimadaten in Stunden-Auflösung werden im Auftrag des BBSR vom DWD in Form von repräsentativen, synthetischen Klimadatensätzen, den sogenannten Testreferenzjahren (TRJ) oder englisch Test Reference Years (TRY), zur Verfügung gestellt (DWD 2020b). Diese sollen einen mittleren, aber für ein Jahr typischen Witterungsverlauf abbilden.

Nachfolgend wird eine Übersicht über zur Verfügung stehende Klimadaten gegeben, beschrieben, wie diese modelliert werden, und anschließend anhand ausgewählter Kenngrößen einem Vergleich mit aktuellen Wetterdaten unterzogen.

3.6.1 Übersicht

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt auf seiner Internetseite über das sogenannte „Klimaberatungsmodul“ den Testreferenzjahr-Datensatz 2017 zur Verfügung. Mit Hilfe einer Deutschlandkarte können im Raster von 1 km² folgende TRY ortsbezogen heruntergeladen werden (DWD 2020b):

- ▶ TRY2015 normales Jahr
- ▶ TRY2015 sommer-fokussiertes Jahr (mit extrem warmem Sommerhalbjahr)
- ▶ TRY2015 winter-fokussiertes Jahr (mit extrem kaltem Winterhalbjahr)

sowie die zukünftigen Testreferenzjahre

- ▶ TRY2045 normales Jahr
- ▶ TRY2045 sommer-fokussiertes Jahr (mit extrem warmem Sommerhalbjahr)
- ▶ TRY2045 winter-fokussiertes Jahr (mit extrem kaltem Winterhalbjahr)

Zu diesen aktuellen DWD-Testreferenzjahren gibt es noch Vorgängerversionen, z.B. die ebenfalls vom DWD im Auftrag des BBR erstellten TRY 2011, welche zusammen mit dem zugehörigen Handbuch auf der Homepage des BBSR zum Download zur Verfügung stehen (BBSR 2011). Die TRY 2011 bestehen – wie der neue Testreferenzjahr-Datensatz 2017 auch – aus Testreferenzjahren für ein mittleres gegenwärtiges Jahr (TRY2010), für extreme sommer- bzw. winter-fokussierte Jahre und mittlere und extreme zukünftige Jahre (TRY2035). Der Testreferenzjahr-Datensatz 2011 steht jedoch nicht im 1 km-Raster zur Verfügung, sondern in Form von 15 Klima- bzw. TRY-Regionen mit je einer Repräsentanzstation für ganz Deutschland. Der Hinweis auf die „älteren“ TRY 2011 ist in diesem Zusammenhang besonders wichtig, weil sich die DIN 4108-2:2013 explizit auf diese bezieht.

Erwähnt sei zudem, dass noch andere Klimadatensätze zur Verfügung stehen, wie z.B. die Meteorologieklimadaten (Remund et al. 2020), (Meteorologieklima 2021). Aus Monatswerten werden hier mittels der Meteorologieklima-Software, die eine weltweite Wetterdatenbank (z.B. aus DWD-Wetterdaten) enthält, mit Hilfe eines stochastischen Modells Stundendaten eines "typischen Jahres"

errechnet. Die Software ermöglicht auch die Ausgabe von zukünftigen Klimadaten basierend auf den IPCC-Szenarien RCP 2.6, 4.5 und 8.5 oder das Generieren von Klimadaten mit extrem warmen Sommerhalbjahren auf Basis von 10-Jahres-Extremwerten. Die Ergebnisse lassen sich in verschiedenen für Simulationssoftware oder auch das PHPP gebräuchlichen Formaten ausgeben.

3.6.2 Modellierung

Nachfolgend wird auf Basis von (DWD 2017) die Vorgehensweise bei der Modellierung der DWD-Testreferenzjahre 2017, dem sogenannten DWD-Klimaberatungsmodul, zusammengefasst.

► Normales TRY 2015

Die TRY umfassen stündliche Daten von ausgewählten meteorologischen Parametern über ein Jahr. Dabei wurde der Datensatz aus verschiedenen realen Witterungsabschnitten aus den Jahren von 1995 bis 2012 so zusammengesetzt, dass die Abweichungen vom langjährigen monatlichen und jahreszeitlichen Mittel so gering wie möglich sind. Die ausgewählten Witterungsabschnitte sind zwischen 10 und 30 Tagen lang und werden genau an den entsprechenden Kalendertagen im TRY eingesetzt. Hinsichtlich der maximalen monatlichen Differenz von Standardabweichung und Mittelwert der Temperatur und Globalstrahlung eines TRY zum langjährigen Mittel des Zeitraums 1995 bis 2012 wird dem jeweiligen TRY ein Qualitätsniveau zwischen 0 und 7 zugeordnet. Um die Rasterschärfe von 1 km² zu erreichen, wird zwischen den ca. 700 DWD-Wetterstationen unter Berücksichtigung der Topografie räumlich interpoliert. Ebenso wird der städtische Wärmeinseleffekt mithilfe von Landnutzungsdaten berücksichtigt.

► Extremes TRY 2015 (Sommer-fokussiertes extrem warmes Jahr)

Im Gegensatz zu den normalen TRY bestehen die extremen TRY aus den Messdaten von einem zusammenhängenden, realen Jahreszeitraum. Bei den sommer-fokussierten extrem warmen TRY wird das Jahr nach dem drittwärmsten Sommerhalbjahr (April bis September) des jeweiligen Ortes ausgewählt. Dafür werden reale Jahre nach dem 90 %-Quantil der stündlichen Lufttemperatur und nach der Anzahl der Tage, an denen das 95 %-Quantil der Tageshöchsttemperatur überschritten wird, sortiert. Die Wahl der drittwärmsten und nicht des wärmsten Jahres wird vom DWD mit dem Zweck der TRY zur Auslegung der technischen Gebäudeausstattung begründet, da eine Auslegung nach dem absolut wärmsten Jahr wirtschaftlich nicht als sinnvoll angesehen wird.

► Zukünftige TRY 2045

Zur Ermittlung der Zukunfts-TRY für die Periode 2031 bis 2060 werden Ensembles mithilfe von sechs unterschiedlichen regionalen Klimamodellen des „World Climate Research Programme (WCRP) Coordinated Downscaling Experiments (CORDEX)“ mit einer Auflösung von 12,5 km erstellt. Diese berücksichtigen die beiden Konzentrationspfade RCP 4.5 und RCP 8.5 als obere und untere Grenzen. Da die zeitliche Auflösung mancher dieser Klimaprojektionen lediglich Tageswerte vorweist, werden die Zukunfts-TRY wie die heutigen TRY aus realen Witterungsperioden des Beobachtungszeitraums 1995 bis 2012 zusammengesetzt, welche jedoch nach dem Jahresgang und der Streuung der Lufttemperatur aus den Klimaprojektionen ausgewählt werden.

► Zukünftige, extreme TRY 2045 (Sommer-fokussiertes extrem warmes Zukunftsjahr)

Für die Erstellung der sommer-fokussierten extrem warmen Zukunfts-TRY für den Zeitraum 2031 bis 2060 werden im 1 km² Raster für jeweils alle 24 regionalen Klimaprojektionen

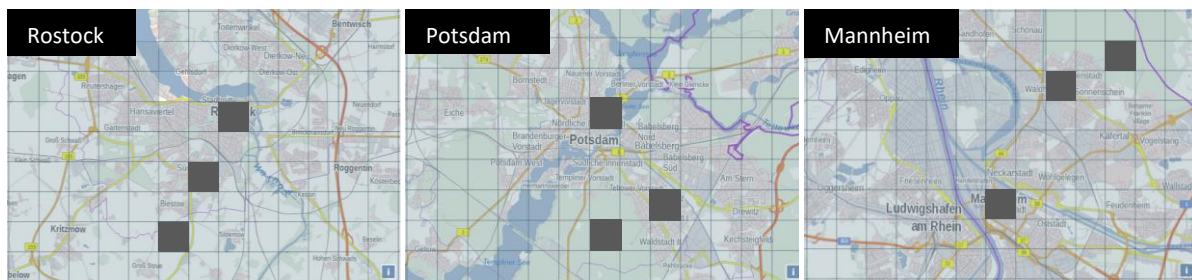
(bestehend aus verschiedenen Klimamodellen und Konzentrationspfaden) die simulierten Jahre von 2031 bis 2060 nach der Anzahl der Tage sortiert, an denen das 90%-Quantil der Tagesmaximaltemperatur überschritten wird. Nach dieser Sortierung wird das Jahr mit dem viertwärmsten Sommerhalbjahr ausgewählt.

3.6.3 Analyse exemplarischer TRY

Um die TRY 2017 des DWD für dieses Forschungsprojekt besser einschätzen zu können, werden nachfolgend die TRY exemplarisch für die Standorte Rostock, Potsdam und Mannheim analysiert. Diese drei Städte wurden ausgewählt, weil sie die drei Sommerklimaregionen nach DIN 4108-2 repräsentieren (Klimaregion A: TRY-Zone 2 entspricht TRY 2011 von Rostock, Klimaregion B: TRY-Zone 4 entspricht TRY 2011 von Potsdam, Klimaregion C: TRY-Zone 12 entspricht TRY 2011s von Mannheim).

Um auch die Unterschiede durch die Landnutzung zu berücksichtigen, werden für die drei Städte jeweils die ortsgenauen TRY für den Innenstadtbereich, einen Vorort sowie für eine unbebaute Fläche in der näheren Umgebung der Stadt analysiert.

Abbildung 30: Exemplarisch ausgewählte Standorte für die Untersuchung der TRY



Quelle: DWD 2020b, IBH

Folgende Parameter werden ausgewertet:

- Mitteltemperatur des Sommerhalbjahres (Mai bis Oktober) in °C
- Anzahl der Sommertage (Tage mit $T_{\max} > 25\text{ °C}$)
- Anzahl der Hitzetage (Tage mit $T_{\max} > 30\text{ °C}$)
- Anzahl tropischer Nächte (Tage mit $T_{\min} > 20\text{ °C}$)
- Gewichtete Kühlgradtage nach Spinoni (Spinoni et al. 2015)
- Globalstrahlung in den Sommermonaten Juni – August in kWh/m²

Die gewichteten Kühlgradtage nach Spinoni ergeben sich dabei durch die Jahressumme folgender Werte (Spinoni et al. 2015):

$$CDD_i = \begin{cases} 0 & T_b \geq T_X \\ \frac{T_X - T_b}{4} & T_M \leq T_b < T_X \\ \frac{T_X - T_b}{2} - \frac{T_b - T_N}{4} & T_N \leq T_b < T_M \\ T_M - T_b & T_b \leq T_N \end{cases} \quad \text{if}$$

with $T_b = 22^\circ\text{C}$

T_b : Schwellenwert der Temperatur (= 22°C)

T_X : Tagesmaximum der Temperatur

T_M : Tagesmittelwert der Temperatur

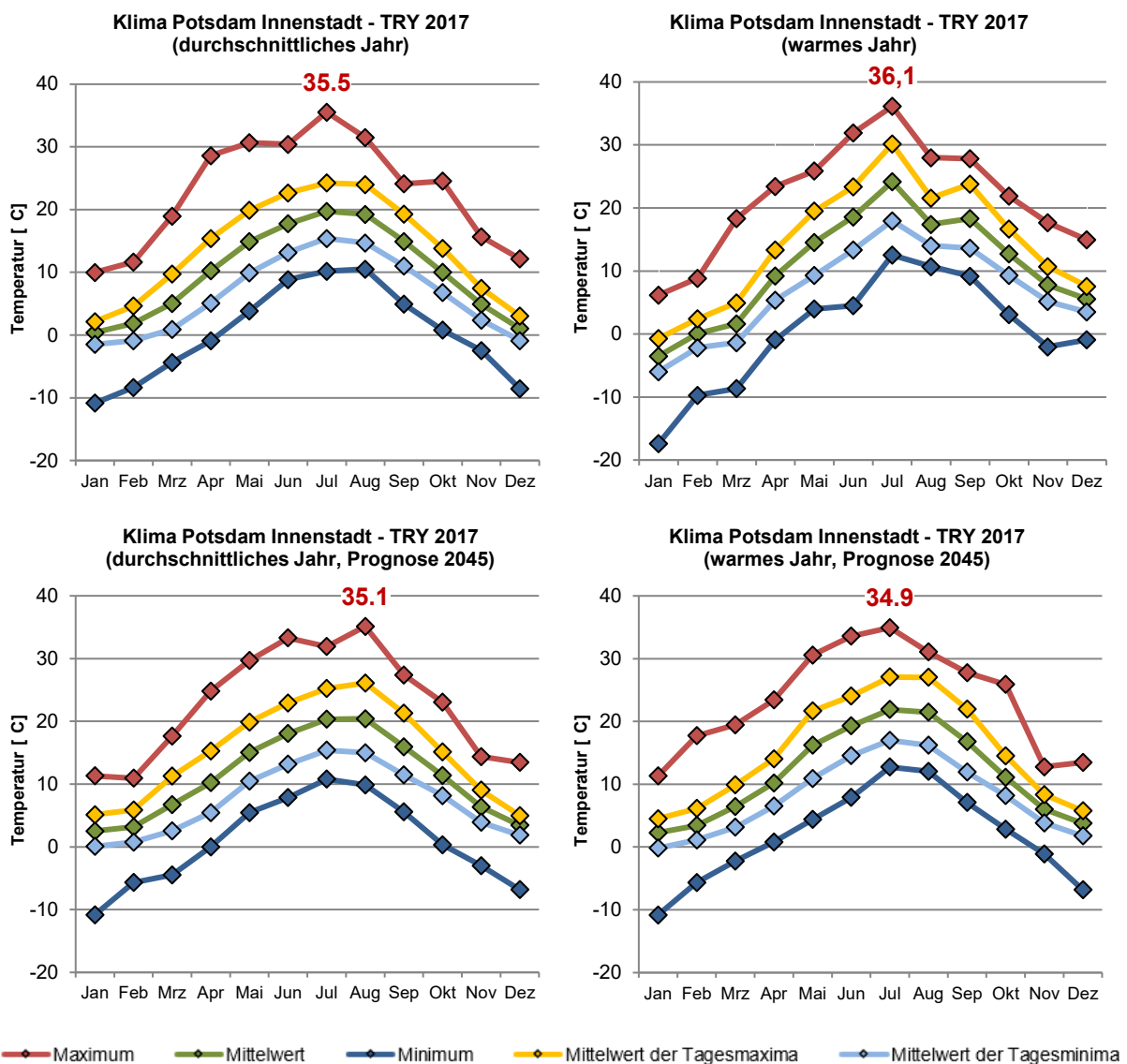
T_N : Tagesminimum der Temperatur

Im Gegensatz zu den Heizgradtagen gibt es keine DIN-Norm, VDI-Richtlinie o.ä., in welcher die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Kühlgradtage beschrieben ist. Das Verfahren nach Spinoni wird aufgrund der darin enthaltenen Gewichtung in Abhängigkeit davon, ob der Schwellenwert nur im Tagesmaximum, im Tagesmittelwert oder sogar im Tagesminimum erreicht wird, für eine Auswertung im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz als sinnvoll eingestuft und deswegen für die Ermittlung der Kühlgradtage verwendet.

Bei der Analyse exemplarischer TRY und Wetterdaten zu beachten!

Die nachfolgend verwendeten TRY- und Wetter-Datensätze bestehen aus gemittelten Stundenwerten und enthalten daher nicht die Maximaltemperaturen der jeweiligen Stunde. Meteorologische Kenngrößen wie „Anzahl der Sommertage“, „Anzahl der Hitzetage“, u.ä. hingegen beziehen sich auf die Auswertung einer kontinuierlichen Messwerterfassung, die diese Extrema enthält. Wichtig ist daher zu beachten, dass die nachfolgend verwendeten Kenngrößen nicht der Definition aus der Meteorologie entsprechen und mit diesen nicht verglichen werden dürfen.

In Abbildung 31 sind einleitend für den Standort der Potsdamer Innenstadt – basierend auf den TRY-Stundenwerten - die monatlichen Höchst-, Mittel- und Minimaltemperaturen der heutigen und zukünftigen Datensätze für durchschnittliche Jahre und für extrem warme Sommerjahre dargestellt. Auffällig ist, dass beim TRY eines heutigen, extrem warmen Sommerjahres die Temperatur im Monat August relativ niedrig ausfällt. Dies kann bei einigen Standorten beobachtet werden, jedoch nicht bei allen. Dies hängt mit der im vorherigen Kapitel beschriebenen Modellierung der TRY für extrem warme Sommerjahre zusammen: Die Wahl des drittwärmsten Jahres aus dem Beobachtungszeitraum 1995 bis 2012 (im Fall für Potsdam das Jahr 2006) entspricht dem spezifischen Temperaturverlauf des betreffenden Jahres. Zudem fällt auf, dass das extrem warme Zukunfts-TRY 2045 den niedrigsten Wert der Maximaltemperaturen aufweist. Dies steht vermutlich im Zusammenhang mit der Rekombination realer Witterungsabschnitte für zukünftige Jahre nach Jahresgang und Streuung der Lufttemperatur aus den simulierten Klimaprojektionen, bei welcher vermutlich die Maximaltemperatur kein Kriterium ist.

Abbildung 31: Monatliche Auswertung der TRY 2017 vom DWD am Beispiel Potsdam Innenstadt

Quelle: (DWD 2020b), eigene Darstellung, IBH

In Abbildung 32 werden die heutigen und zukünftigen TRY anhand der oben aufgeführten Auswertungsparameter (Mitteltemperatur des Sommerhalbjahres vom 1. Mai bis 31. Oktober, Anzahl Sommertage, Anzahl Hitzetage, Anzahl tropischer Nächte, Kühlgradtage und in den Sommermonaten auftretende Globalstrahlung) gegenübergestellt.

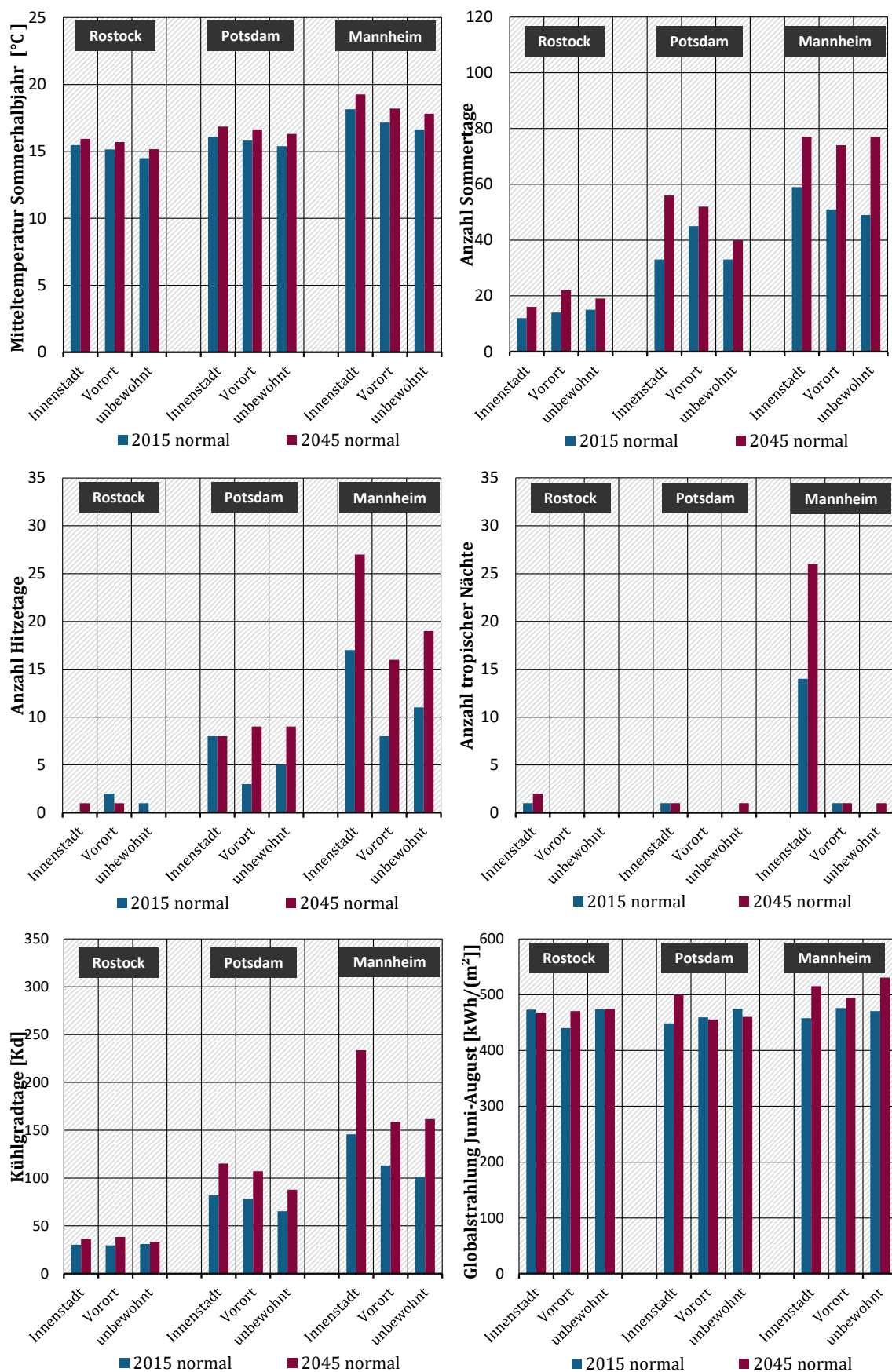
Die Mitteltemperatur im Sommerhalbjahr, die Kühlgradtage und die Anzahl an Sommertagen, Hitzetagen und tropischen Nächten unterscheiden sich klar in ihrer Höhe zwischen den drei Städten, was so zu erwarten war, da diese, wie schon erwähnt, die drei Sommerklimaregionen Deutschlands repräsentieren. Die Mitteltemperatur im Sommerhalbjahr sowie die Kühlgradtage fallen an allen drei Standorten von der Innenstadtlage über den Vorort zur unbebauten Fläche hin etwas ab, was durch den Wärmeinseleffekt plausibel ist.

Abgesehen von der Globalstrahlung (vgl. hierzu Kapitel 2.2) weisen die Parameter beim Zukunftsdatensatz bis auf wenige Ausnahmen einen jeweils höheren Wert auf als beim entsprechenden heutigen Datensatz.

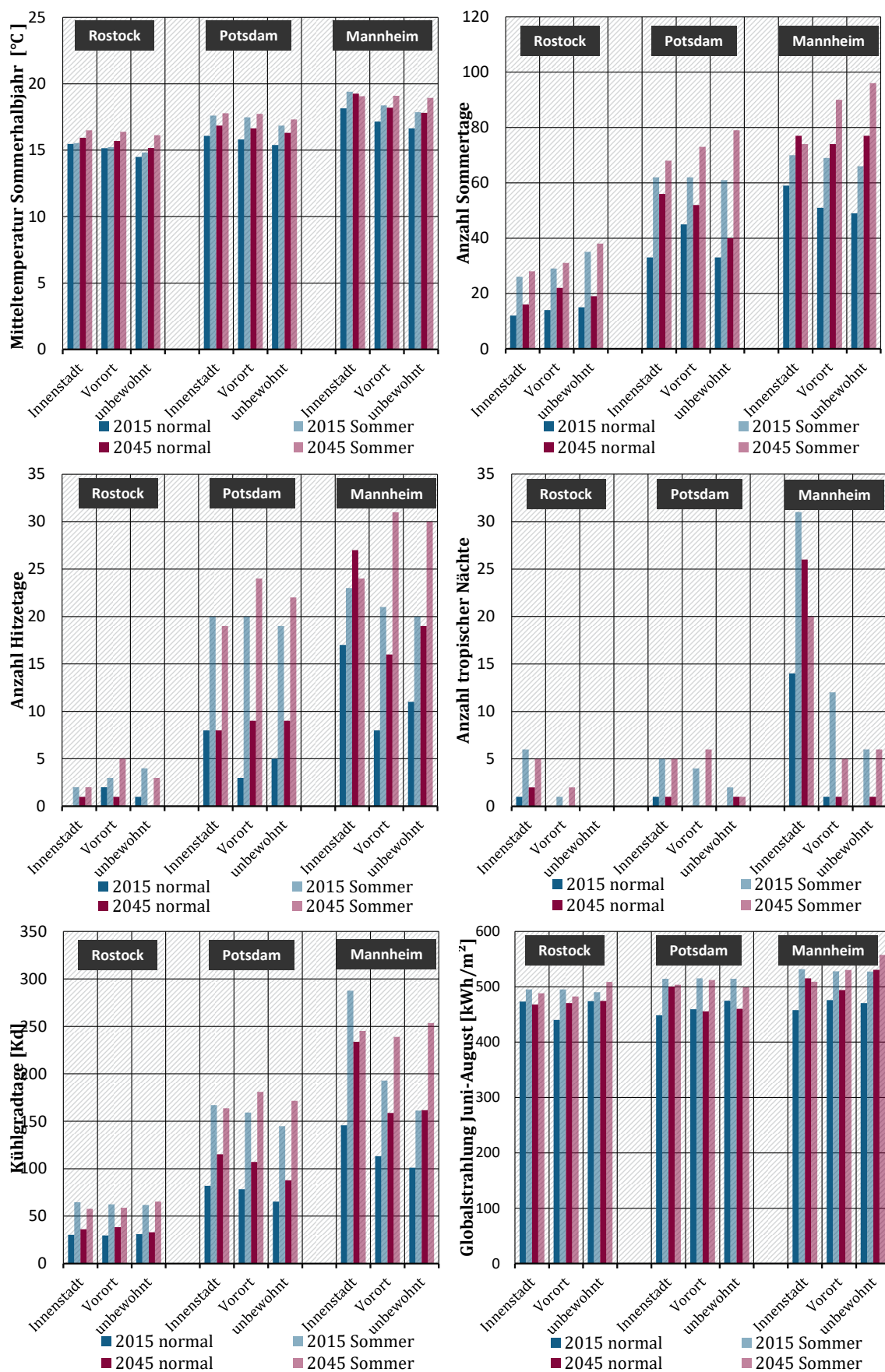
Auffällig ist, dass die Anzahl tropischer Nächte lediglich beim TRY Mannheim Innenstadt, bei welchem auch beim heutigen Datensatz bereits einige tropische Nächte verzeichnet werden, deutlich ansteigt. Bei den anderen Standorten kommen sowohl beim heutigen als auch beim Zukunftsdatensatz kaum tropische Nächte vor. Gemäß Climate Service Center Germany (GERICS 2020) wäre eine Zunahme tropischer Nächte für den entsprechenden Zukunftszeitraum für die jeweiligen Bundesländer von etwa ein bis drei Nächten im 30-jährigen Mittel zu erwarten. Auch, wenn sich die TRY-Stundenmittelwerte nicht mit tropischen Nächten mit hoher zeitlicher Auflösung vergleichen lassen, sollte diese Charakteristik der TRY beachtet werden.

In Abbildung 33 sind die Darstellungen der Auswertungsparameter um die Datensätze für die extrem warmen, sommerfokussierten TRY ergänzt. Größtenteils fallen die Werte für sämtliche Auswertungsparameter bei den sommerfokussierten Jahren höher aus als bei den durchschnittlichen Jahren, mit der Ausnahme vom Standort Mannheim Innenstadt. Verwunderlich ist, dass die Anzahl der Sommertage und der Hitzetage bei den zukünftigen, extrem warmen Jahren von der Innenstadt über den Vorort zur unbewohnten Fläche hin tendenziell zunehmen, entgegen dem Trend der anderen Datensätze.

Abbildung 32: Auswertung der TRY-Datensätze 2015 und 2045



Quelle: (DWD 2020b), eigene Darstellung, IBH

Abbildung 33: Auswertung der TRY-Datensätze für normale und extrem warme Sommerjahre

Quelle: (DWD 2020b), eigene Darstellung, IBH

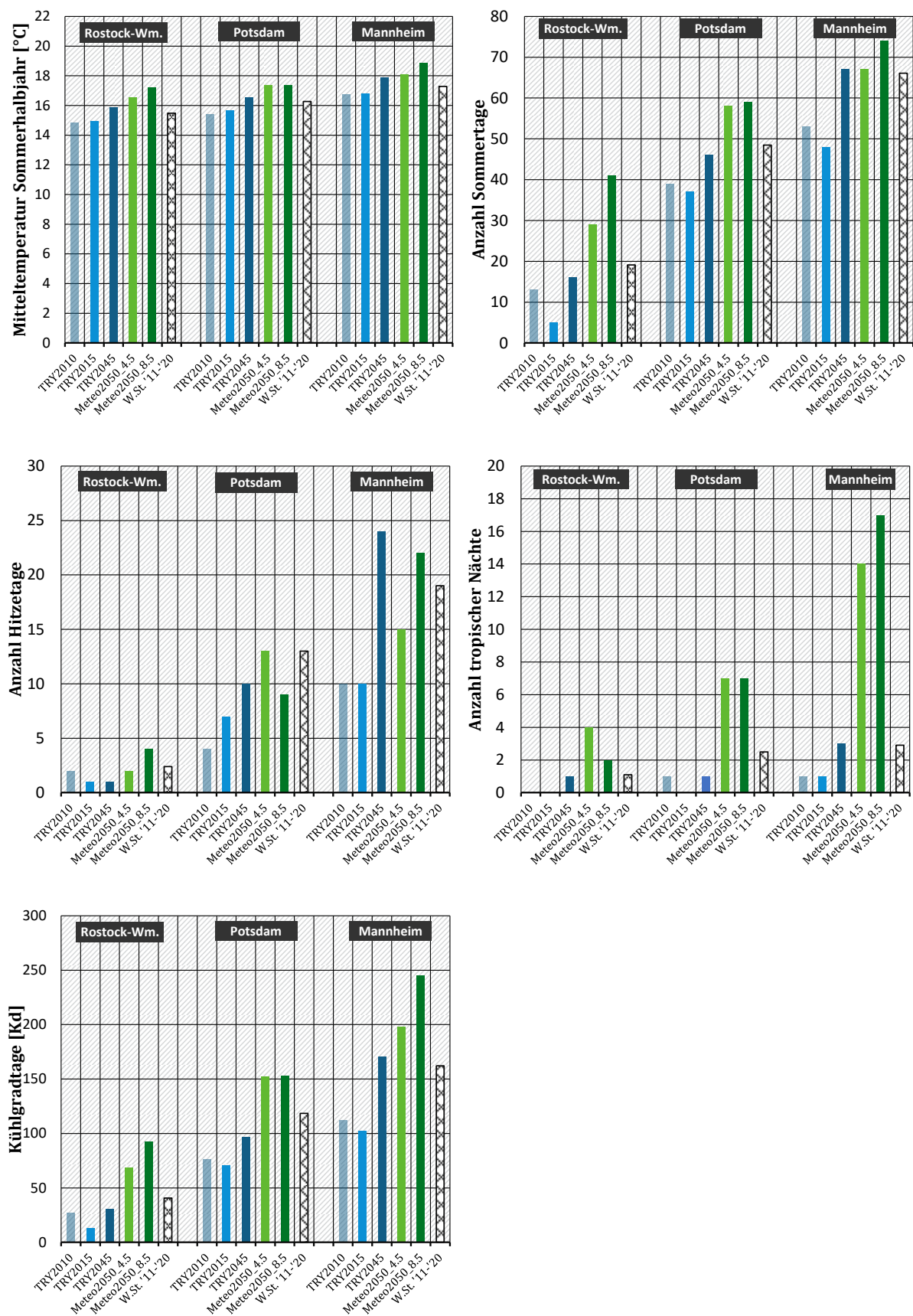
Um die absoluten Werte der Auswertungsparameter besser einordnen zu können, werden in Abbildung 35 die normalen TRY für heutiges und zukünftiges Klima an den DWD-Wetterstation-Standorten in Rostock-Warnemünde, Potsdam und Mannheim (siehe Abbildung 34) dem Durchschnitt der DWD-Wettermessdaten (DWD 2021b) – als Stundenmittelwerte- der verfügbaren letzten zehn Jahre, also von 2011 bis 2020, an den drei Standorten gegenübergestellt. Ergänzend werden in Abbildung 35 zum Vergleich die entsprechenden TRY 2011, auf die die DIN 4108-2:2013 Bezug nimmt, und die Meteonorm-Klimadatensätze (Meteonorm 2021) für 2050 nach den Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 dargestellt.

Abbildung 34: Standorte mit DWD-Wetterstationen für den Vergleich TRY - Wetterdaten



Quelle: (DWD 2020b)

Abbildung 35: TRY-Vergleich mit gemittelten DWD-Messwerten der Jahre 2011-2020



Quelle: (DWD 2020b), (DWD 2021b) eigene Darstellung, IBH

Es wird deutlich, dass gemessen an den Durchschnittswerten der letzten 10 Jahre weder die heutigen und auch weitestgehend nicht die zukünftigen TRY-Datensätze die Anzahl der Hitzetage, der tropischen Nächte sowie die Höhe der Kühlgradtage ausreichend widerspiegeln.

Fazit Analyse exemplarischer TRY

Aus der Auswertung beispielhafter Testreferenzjahre aus dem DWD-Klimaberatungsmodul (DWD 2020b) lassen sich folgende Erkenntnisse ziehen:

- ▶ Die analysierten Kenngrößen, die das Sommerklima charakterisieren, zeigen bis auf wenige Ausnahmen einen ansteigenden Trend vom TRY2015 zum sommerfokussierten TRY2015 weiter zum TRY2045 bis hin zum sommerfokussierten TRY2045 sowie von unbewohnten bis zu Innenstadtbereichen. Diese Trends zeigen demnach hohe Plausibilität. (Beispiele für die angesprochenen Ausnahmen sind: Mannheim Innenstadt TRY2045 ist „wärmer“ als das sommerfokussierte TRY 2045x; bei den TRY Potsdam Innenstadt weist das TRY2015x die höchste Maximaltemperatur auf, das TRY2045x die niedrigste).
- ▶ Im Vergleich zu gemittelten DWD-Wetterdaten der letzten 10 Jahre deuten die ausgewerteten TRY darauf hin, dass die TRY2015 das aktuelle Klima nicht mehr repräsentieren können und die zukünftigen TRY2045, die auf Ensembles für 2031 bis 2060 nach RCP4.5 und RCP8.5 beruhen, die zu vermutenden weiter zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels (Temperaturanstieg, Zunahme an Hitzetagen und tropischen Nächten) unterschätzen bzw. zu wenig berücksichtigen, da diese in vielen Fällen schon von den Mittelwerten der letzten Dekade übertroffen werden. Diese Aussage muss jedoch in einen meteorologischen Kontext gestellt werden: die Auswertung einer Dekade ist zu kurz, da hier natürliche Phänomene, die zu einer Erwärmung beitragen, nicht eliminiert werden können (vgl. Klimanormalperiode).
- ▶ Stellt man letzteren Punkt in Zusammenhang mit der TRY 2017-Erstellungs-Methodik (Basis für TRY sind DWD-Messdaten 1995 bis 2012) und der Aussage, dass die Mitteltemperatur in Deutschland seit 1960 jede Dekade zugenommen hat, so lässt sich erkennen, dass die TRY 2017 einer Aktualisierung bedürfen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts ist es nicht möglich, diese Thematik weiter zu vertiefen. Es werden jedoch folgende Empfehlungen gegeben:

- ▶ Die hinterlegten Klimadaten sind für Ergebnisse von auf Basis der TRY erstellten Untersuchungen (z.B. thermischen Simulationen) entscheidend. Fachplaner sollten daher für die Auswertung und Interpretation von thermischen Simulationen vorab die verwendeten TRY hinsichtlich geeigneter Kenngrößen analysieren.
- ▶ Bei der Aktualisierung der TRY, welche im Rahmen eines schon gestarteten BBSR-Forschungsprojektes geschieht und welche voraussichtlich 2024 zur Verfügung stehen werden, sollten die angesprochenen Punkte diskutiert werden. Es stellt sich die Frage, wie in Zeiten des Klimawandels zeitnah „aktuelle“ TRY zur Verfügung gestellt werden können, die auch die Wettertrends der letzten Dekade berücksichtigen. Des Weiteren sollten bei der TRY-Auswahl zusätzliche Plausibilisierungsschritte eingebaut werden können, um die vereinzelt auftretenden Unstimmigkeiten zu vermeiden.
- ▶ Für die anstehende Anpassung der Vorgaben zum sommerlichen Wärmeschutz sind die Klimawandel-Auswirkungen stärker zu berücksichtigen. Die derzeitige Vorgabe zur Verwendung des Testreferenzjahr-Klimadatensatzes 2011 zeigt diesbezüglich eine zu lange Zeitspanne bei der

Aktualisierung der Berechnungsgrundlagen. Die Wetterdaten, die die Grundlage der 2011-Testreferenzjahre bilden, scheinen nicht mehr geeignet zu sein. Dies kann insbesondere mit dem Hintergrund einer Gebäude-Nutzungszeit von 50 Jahren schwerwiegend sein.

3.7 Fachliteraturauswertung

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine umfangreiche Recherche der Fachliteratur zum sommerlichen Wärmeschutz durchgeführt. Eine Übersicht über ausgewählte Arbeiten, deren Untersuchungsgegenstand, die gewählte Methodik und wesentliche Ergebnisse finden sich in Tabelle .

Tabelle 17: Fachliteraturauswertung

Quelle	(Offermann et al. 2022)	(Radermacher 2019)	(Settembrini et al. 2017)	(Fahrión 2015)
Titel	Nachhaltige Gebäudeklimatisierung in Europa - Konzepte zur Vermeidung von Hitzeinseln und für ein behagliches Raumklima	Potenziale zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeverhaltens von Gebäuden und Bewertung am Beispiel der Sohlplattenkühlung	ClimaBau – Planen angesichts des Klimawandels Energiebedarf und Behaglichkeit heutiger Wohnbauten bis ins Jahr 2100	Sommerlicher Wärmeschutz im Zeichen des Klimawandels – Anpassungsplanung für Bürogebäude
Dokumenttyp	UBA-Forschungsprojekt	Dissertation	BFE-Forschungsbericht (CH)	Dissertation
Untersuchungsgegenstand	Quartiers- und Gebäudekonzepte	Bewertung passiver Kühlsysteme bzgl. sommerlichem Wärmeschutzes nach DIN 4108-2:2013-02, thermischem Komforts nach DIN EN 15251 und der Energieeffizienz	Einfluss des Klimawandels auf den Energiebedarf und die Behaglichkeit von Wohnbauten in der Schweiz bis ins Jahr 2100	Entwicklung Untersuchungsmethodik zur Beurteilung bereits beobachteter und zu erwartender Klimaveränderungen in Bürogebäuden und geeigneter Maßnahmen in Abhängigkeit der Baukonstruktion
Methodik	- TRNSYS Simulationen (Gebäude) - ENVI_MET (Mikroklima)	TRNSYS-Simulation	Simulationen mit IDA ICE	Software Thermal Analysis System (tas)
Modell	Multizonenmodelle	mehrzoniges Gebäudemodell von freistehendem MFH	Wohngebäude (reale Gebäude: zwei Altbauten und zwei Neubauten)	Reale Gebäude: Büro- und Geschäftshaus 1959, Bürogebäude 1974, Bürogebäude 1990er
Varianten	Wohngebäude: EH 55, EH 40, Anlagentechnik Klimadaten Envi-met (auch heiße Jahre), Optimierungsmaßnahmen für Quartiere	- Klimadaten TRY 2011 normales Jahr u. extr. Sommer für Klimaregionen A (TRY-Zone 2 Rostock), B (TRY-Zone 4 Potsdam), C (TRY-Zone 12 Mannheim), (zusätzl. für B TRY-Effekt für Lage: Stadtrand / mittleres Stadtgebiet / eng bebaute Stadt) - Untersuchte Parameter: Taglüftung ($LW\ 0,5\ h^{-1} / 3\ h^{-1}$), Nachtlüftung ($LW\ 0,5\ h^{-1} / 2\ h^{-1} / 5\ h^{-1}$), Passive Kühlung (mit/ohne Passive Kühlung über Sohlplatte), Bauweise, Dämmstandard, Interne Wärmeeinträge (100, 120, 140 Wh/m ² d), Sonnenschutz über Fc-Wert, Geschossanzahl, Erreich-Wärmeleitfähigkeit	- Klimadaten bis zu Szenarios A1B, 2 Standorte (speziell für das Projekt von MeteoSchweiz aufbereitet) - Untersuchte Parameter: Nachtlüftung, Sonnenschutz, Nutzerverhalten, Fenstergröße, -orientierung, Wärmespeicherfähigkeit	- Klimadaten TRY 1986 (für Jahre 1951 bis 1976), TRY 2004 (für Jahre 1961 bis 1990), TRY 2010 (für Jahre 1988 bis 2007), TRY 2035 (für Jahre 2021 bis 2050), Wetterdaten Sommer 2003 (für Jahre 2071 bis 2100)
Auswertung	Überhitzungsstunden, Häufigkeit der Temperaturüberschreitung, PPD nach ISO7730, Thermischer Komfortindikator PET	- Übertemperaturgradstunden - Komfortbewertung anhand Überschreitungshäufigkeiten nach Kategorie II - Gegenüberstellung Simulation und Kennwerteverfahren - Energieeffizienz Sohlplattenkühlung	- Heizwärmebedarf - theoretischer Klimakältebedarf für eine Innenraumtemperatur von maximal 26° C während der Sommerperiode (von 16. April bis 15. Oktober) ermittelt.	- Heizwärmebedarf, Kühlbedarf - Übertemperaturgradstunden - Wirtschaftlichkeit
Ergebnisse	- Optimierungsmaßnahmen zur Verringerung des Hitzeinseleffektes auf Quartiersebene haben e verhältnismäßig geringen positiven Einfluss auf den sommerlichen Innenraumkomfort - meist ist eine Kühlung für die Aufrechterhaltung eines guten sommerlichen Komforts erforderlich	- Die Sohlplattenkühlung zeigt sich als effizientes System, insbesondere im Kombination mit außenliegendem Sonnenschutz, Tag- und Nachtlüftung, Arbeitszahlen Sohlplattenkühlung zwischen 25 und 70. - Beim Vergleich Kennwerteverfahren Simulation nach DIN 4108-2:2013 ist eine deutliche Differenz der Anforderungshöhen zu verzeichnen. - Die Normierung sollte neue bzw. überarbeitete Auslegungs-, Berechnungs- sowie Nachweisverfahren für die passive Kühlung etablieren.	- Bedeutende Auswirkungen des Klimawandels auf den Energiebedarf und die Behaglichkeit in Gebäuden - Heizwärmebedarf sinkt um 20-30%, Klimakältebedarf steigt exponentiell an und wird im Schweizer Mittelland rund die Hälfte des Heizwärmebedarfs betragen. - Behagliche Temperaturen in den Innenräumen nur durch optimale Nutzung des Sonnenschutzes und einer genügenden Nachtauskühlung	- ab Mitte 21.-Jhd. umfangreiche Klimaanpassungsmaßnahmen notwendig, ab 2070 Notwendigkeit, aktiv Wärme zu entziehen - drei Methoden für Wirtschaftlichkeitsberechnung

Quelle	(Schlitzberger 2014) / (Maas, Schlitzberger 2013)	(Bettgenhäuser et al. 2011)	(Höttges, Kempkes 2009)	(Voss et al. 2007)
Titel	Anpassung und Entwicklung von Planungswerkzeugen für den sommerlichen Mindestwärmeschutz und zur Komfortbewertung des Sommerfalls	Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung	Entwicklung einer Bewertungsmethodik für den sommerlichen Wärmeschutz auf der Basis des nach DIN V 18599 rechnerisch ermittelten Nutzkältebedarfs	Energieeinsparung contra Behaglichkeit
Dokumenttyp	Dissertation / BBSR Forschungsprojekt	UBA-Forschungsprojekt	BBR Forschungsprojekt	BBR Forschungsprojekt
Untersuchungsgegenstand	Neufassung der DIN 4108-2:2003: Anwendung des Kennwerteverfahrens und Vergleich mit Simulations-rechnungen, Anpassung an aktuelle klimatische Verhältnisse sowie Formulierung einheitlicher Berechnungsrandbedingungen für	Potentialabschätzung durch Reduzierung des Kühlenergiebedarfs von Gebäudekühlung in Deutschland, Vermeidungstechniken, Wirtschaftlichkeits- und Umweltanalyse	Möglichkeit einer Nutzung des Nutzkälte-Ergebnisses der DIN V 18599-Berechnung für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes	Rechtslage, Komfortbewertung, passive Kühlung, Klimawandel, Wirtschaftlichkeit
Methodik	Simulationen mit Software HAUSer	Simulationen (Simulationssoftware nicht genannt)	Simulationen mit Software HAUSer	Simulationen mit ESP-r (abgeglichen mit TRNSYS)
Modell	Modellräume ausgehend von Prüfraum nach DI EN 13791	Referenzgebäude (Wohn- und Nichtwohngebäuden)	Modellräume	Typgebäude (Büro)
Varianten	- Klimadaten TRY 2011 nach Regionen 1 bis 15 (normales Jahr, sommerfokussiertes Jahr, Zukunftsjahr, Zukunftsjahr sommerfokussiert) - Untersuchte Parameter: Fensterflächenanteile, Bauarten, Wärmeschutzniveaus, Sonnenschutzvorrichtungen, Lüftung,	- Klimavarianten (Standorte Hamburg und Frankfurt jeweils für normales Klima und Extremsommer) - Untersuchte Parameter: Sonnenschutz, Nachtlüftung, adiabate Kühlung, Tischventilatoren	- Untersuchte Parameter: Fensterorientierung, flächenanteil, Bauart, Wärmeschutzniveaus, Sonnenschutz, Nutzung	- Untersuchte Parameter: Ausrichtung, Sonnenschutz, Sonnenschutzverglasung, Nachtlüftung, adiabate Kühlung, u.a.
Auswertung	Auswertung, mit welchem Fc-Wert die jeweilige Konfiguration bei Kennwerteverfahren bzw. Simulation noch eingehalten ist.	Auswertung des Energiebedarfs zur Gebäudekühlung in Deutschland, Maßnahmen zur Begrenzung des Kühlenergiebedarfs, Wirtschaftlichkeitsanalyse	Vergleich Nutzkältebedarf und Übertemperaturstunden nach DIN V 18599 / Simulation / DIN 4108-3	- Vergleichende Analysen von existierenden Gebäuden - Wege zu angenehmen Temperaturen ohne aktive Kühlung - Bedeutung Klimawandel
Ergebnisse	- Aktualisierung und Erweiterung Kennwerte-Verfahren für Neufassung DIN 4108-2: 2013-02 - Festlegung Simulationsrandbedingungen für Neufassung DIN 4108-2: 2013-02	Der Kühlenergiebedarf für NWG ist für das Jahr 2005 mit 15-20 TWh etwa 100-mal höher als derjenige für Wohngebäude. Künftig ist mit einer deutlichen Zunahme der durch Gebäudekühlung erzeugten CO ₂ -Emissionen zu rechnen. Starken Einfluss auf den Kühlenergiebedarf haben Klimadaten und Verglasungsanteil. Der Endenergiebedarf für die Kühlung von hochverglasten Büro-Altbauten mit Vollklimaanlage ist mit 36 kWh/(m ² a) bis zu 98 kWh/(m ² a) zehn- bis zwanzigmal höher als derjenige moderner Bürogebäude, die über eine Betonkernkühlung gekühlt werden. Des Weiteren konnte ein hoher Nutzen von adiabater Kühlung und Tischventilatoren festgestellt werden.	Die Bewertung des sommerlichen Wärmeverhaltens anhand von Kennwerten, die durch thermische Simulation ermittelt wurden, liefert bei Verwendung der energetischen Größe 'Nutzenergie Kälte' sowie der thermischen Größe 'Übertemperaturstunden' äquivalente Ergebnisse.	- Adiabate Kühlung zeigt gute Effekte und führt zur Einhaltung der Komfortkriterien (DIN1945:1994) - durch Erdkollektoren kann die Zuluft um bis zu 10° abgekühlt werden - Sonnenschutzvorrichtung ist unabdingbar - Temperaturanstieg hat entscheidenden Einfluss - Investitionskosten für Kühl- und Lüftungsstrategien unterscheiden sich erheblich

4 Vorgehensweise Parameterstudie

4.1 Ziele

Kernstück dieses Forschungsprojektes ist eine umfangreiche Variantenanalyse.

Ziele der Variantenanalyse sind

- ▶ die Analyse der Sensitivität von einzelnen Parametern (Klimadaten, Raumbeschaffenheit, Nutzungsrandbedingungen, Maßnahmen).
- ▶ die Analyse von wirksamen Maßnahmenpaketen
- ▶ die Einschätzung der Grenzen passiver Maßnahmen
- ▶ die Analyse von Vor- und Nachteilen unterschiedlicher Bewertungsmethoden

Die Vorgehensweise, Methodik und Randbedingungen der Variantenanalyse nachfolgend erläutert.

4.2 Methodik

4.2.1 Aufbau

Die Variantenanalyse setzt sich zusammen aus

- ▶ Basisuntersuchung (Parameterstudie Teil 1)

Methode: thermisch-dynamische Simulation von Musterräumen

Vorgehensweise: Simulation aller Kombinationsmöglichkeiten der Basis-Variantenmatrix

- ▶ Detailuntersuchung (Parameterstudie Teil 2)

Methode: thermisch-dynamische Simulation von Musterräumen

Vorgehensweise: Variation einzelner Parameter basierend auf ausgewählten Vergleichs-Varianten der Basisuntersuchung

- ▶ Methodenvergleich - basierend auf ausgewählten Varianten aus der Parameterstudie

Methoden: Berechnung bzw. Simulation von Musterräumen

Vorgehensweise: Anwendung verschiedener Methoden (z.B. nach DIN 4108-2, nach DIN EN 16798-1, Bestimmung der Kühllast) auf ausgewählte Varianten der Basisuntersuchung

4.2.2 Auswertungsgrößen

Auswertungsgrößen für die Parameterstudie zur Charakterisierung des sommerlichen Wärmeschutzes sind:

► Übertemperaturgradstunden

Wie in den Kapitel 3.5.2.2.4 beschrieben und begründet, erfolgt die Auswertung der Übertemperaturgradstunden nach dem Nationalen Anhang der DIN EN 16798-1. Die Festlegung der Anforderungswerte ist in 3.5.3.2 beschrieben. Ausgewertet werden nur Überschreitungen des Komfortbandes, keine Unterschreitungen.

► Raumtemperaturen




► Energiebedarf

- Energiebedarf Lüftung
- Heizwärmebedarf
- Beleuchtungsstrom
- Kühlenergiebedarf

4.3 Modellierung Musterräume

Als Untersuchungsgegenstand dienen die Gebäudetypen Wohngebäude, Bürogebäude und Schule. Auf Basis einer Vielzahl von ausgewerteten Projekten werden für diese Nutzungen typische Modellräume entworfen. Die Eckdaten hinsichtlich Nettoraumfläche, fassadenbezogenem Fensterflächenanteil (FFA) und grundflächenbezogenem Fensterflächenanteil (f_{wG}) mit den jeweiligen Varianten sind in Tabelle 18 (Wohnräume), Tabelle 19 (Büroräume) und Tabelle 20 (Klassenzimmer) aufgeführt.

Tabelle 18: Raummodelle Wohnen

Wohnen WO	Wohnzimmer (mittlerer FFA)	Eck-Wohnzimmer (mittlerer FFA)	Eck-Wohnzimmer (hoher FFA)
			
NRF	35,1 m ²	35,1 m ²	35,1
FFA	40 %	22 %	40 %
f _{WG}	21 %	21 %	39 %

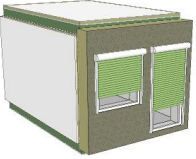
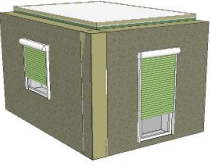
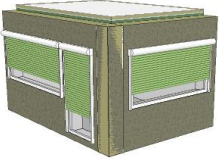
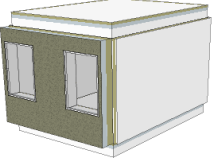
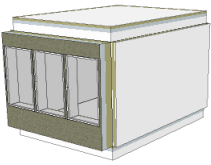
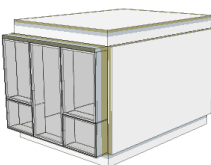
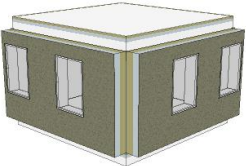
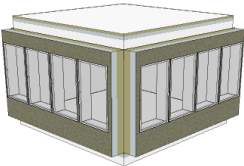
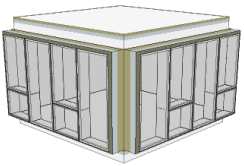
Wohnen KI	Kinderzimmer (mittlerer FFA)	Eck-Kinderzimmer (mittlerer FFA)	Eck-Kinderzimmer (hoher FFA)
			
NRF	12,5 m ²	12,5 m ²	12,5
FFA	40 %	17 %	40 %
f _{WG}	28 %	28 %	66 %

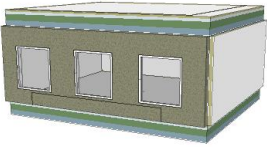
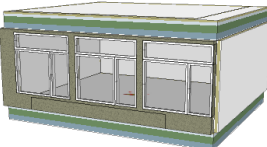
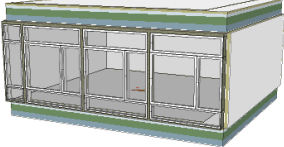
Tabelle 19: Raummodelle Büro

Büro (3-Achser ¹)	Lochfassade (geringer FFA)	Fensterband (mittlerer FFA)	Vollverglasung (hoher FFA)
			
NRF	20,7 m ²	20,7 m ²	20,7 m ²
FFA	31 %	52 %	83 %
f _{WG}	20 %	34 %	54 %

Eck-Büro (4-Achser ¹)	Lochfassade (geringer FFA)	Fensterband (mittlerer FFA)	Vollverglasung (hoher FFA)
			
NRF	27,8 m ²	27,8 m ²	27,8 m ²
FFA	23 %	52 %	80 %
f _{WG}	30 %	67 %	104 %

¹ Die Büro-Raummodelle basieren - wie bei Bürogebäuden üblich - auf einem durchgängigen Achsraster mit einem Achsmaß von 1,35 m. Das Büro ist 3 Achsen breit und wird daher als 3-Achser bezeichnet, das Eck-Büro ist als 4-Achser definiert und demnach 4 Achsen breit. Die Büroräume sind jeweils 4-Achsen tief.

Tabelle 20: Raummodelle Klassenzimmer

Schule	Lochfassade (geringer FFA)	Fensterband (mittlerer FFA)	Vollverglasung (hoher FFA)
			
NRF	65,4 m ²	65,4 m ²	65,4 m ²
FFA	29 %	61 %	82 %
f _{WG}	13 %	28 %	38 %

4.4 Variantenbildung

4.4.1 Kurzbezeichnungen

Berechnungsmethodik	
SIM	Thermische Simulation mit freien Randbedingungen
DIN-SIM	Thermische Simulation DIN 4108-2
DIN-KW	Kennwerteverfahren DIN 4108-2
KOMF	Komfortbewertung nach DIN EN 16798-1 (Kategorie II)
KOMF-NA	Komfortbewertung nach Nationalem Anhang der DIN EN 16798-1 (Kategorie II)
KÜL	Kühllastberechnung
PH	PHPP
Standort/Klima	
M	Mannheim (warmer Standort)
P	Potsdam (mittlerer Standort)
R	Rostock (kühler Standort)
_i	innerstädtisch (Hitzeinseleffekt)
_v	Vorort
_u	unbewohnt
Nutzung/Orientierung	
W	Wohnraum
B	Büroraum
S	Klassenzimmer
_eck	Eckraum
_n	Nordorientierung
_o	Ostorientierung
_s	Südorientierung
_w	Westorientierung
_no	Nord-Ostorientierung
_sw	Süd-Westorientierung

Fensterflächenanteil

FFA_g	geringer Fensterflächenanteil
FFA_m	mittlerer Fensterflächenanteil
FFA_h	hoher Fensterflächenanteil

Bauweise

BW_l	leichte Bauweise
BW_m	mittlere Bauweise
BW_s	schwere Bauweise

Energiestandard

E_alt	Energiestandard Bestand (Altbau)
E_ts	Energiestandard teilsanierter Bestand
E_geg	Energiestandard Neubau (GEG)
E_k40	KfW Energiestandard EH40 / EG40

Maßnahmenpakete sommerlicher Wärmeschutz

MIN	Wenig Vorkehrung
STD	Normale Vorkehrung
MAX	Viel Vorkehrung

Maßnahmen

alSo	außenliegender Sonnenschutz
SSV	Sonnenschutzverglasung
NL_f	erhöhte Nachtlüftung über Fensterlüftung
NL_ff	hohe Nachtlüftung über Fensterlüftung
NL_m	erhöhte mechanische Nachtlüftung über RLТ
NL_mm	hohe mechanische Nachtlüftung über RLТ
AD_m	Adiabate Kühlung über Abluftbefeuchtung
GEO	Geothermie (Grundwasser/Erdreich) s. zusätzliche Maßnahmenpakete

Zusätzliche Maßnahmenpakete - Energiebedarf (s. Kapitel 5.4)

OPT	Viel Vorkehrung (MAX) mit energetischer Optimierung
KKM	Wenig Vorkehrung (MIN) mit Kühlung über Kompressionskältemaschine
GEO	Wenig Vorkehrung (MIN) mit Kühlung über Geothermie

4.4.2 Variantenauswahl

Nachfolgend wird detailliert die Vorgehensweise bei der Parameterstudie, die sich aus Basis- und Detailuntersuchung (=Parameterstudie) zusammensetzt, beschrieben.

4.4.2.1 Klimadaten

Durch die Verfügbarkeit ortsgenauer Klimadaten und unterschiedlicher Testreferenzjahre ist die Auswahl komplex.

► Standortauswahl

Analog der Vorgehensweise in Kapitel 3.6.3 erfolgt eine Festlegung auf die klimatisch sehr unterschiedlichen Standorte Rostock, Potsdam und Mannheim. Um die Variantenanzahl der Basisuntersuchung zu begrenzen, wird hier nur die Vorort-Lage betrachtet, die hinsichtlich der klimatischen Verhältnisse zwischen den unbewohnten und urbanen Extremen liegt und für Neubauten repräsentativ sein kann. Unbewohnte und innerstädtische Lage werden in der Detailuntersuchung betrachtet. Tabelle 21 fasst die Standortauswahl unter Angabe der Kurzbezeichnungen zusammen.

Tabelle 21: Standorte für Basis- und Detailuntersuchung

Standort	
R_v	Rostock (kühler Standort) - Vorort
P_v	Potsdam (mittlerer Standort) - Vorort
M_v	Mannheim (warmer Standort) - Vorort
R_u	Rostock (kühler Standort) - unbewohnt
R_i	Rostock (kühler Standort) - innerstädtisch
P_u	Potsdam (mittlerer Standort) - unbewohnt
P_i	Potsdam (mittlerer Standort) - innerstädtisch
M_u	Mannheim (warmer Standort) - unbewohnt
M_i	Mannheim (warmer Standort) - innerstädtisch

Schwarze Schrift: Basisuntersuchung

Graue Schrift: Detailuntersuchung

► Testreferenzjahr-Auswahl

Ziel der Auswahl ist es, geeignete Klimadaten auszuwählen, die einen durchschnittlich warmen Sommer einen extrem warmen Sommer für heutiges und zukünftigen Sommer (Mitte des 21. Jh.) abbilden.

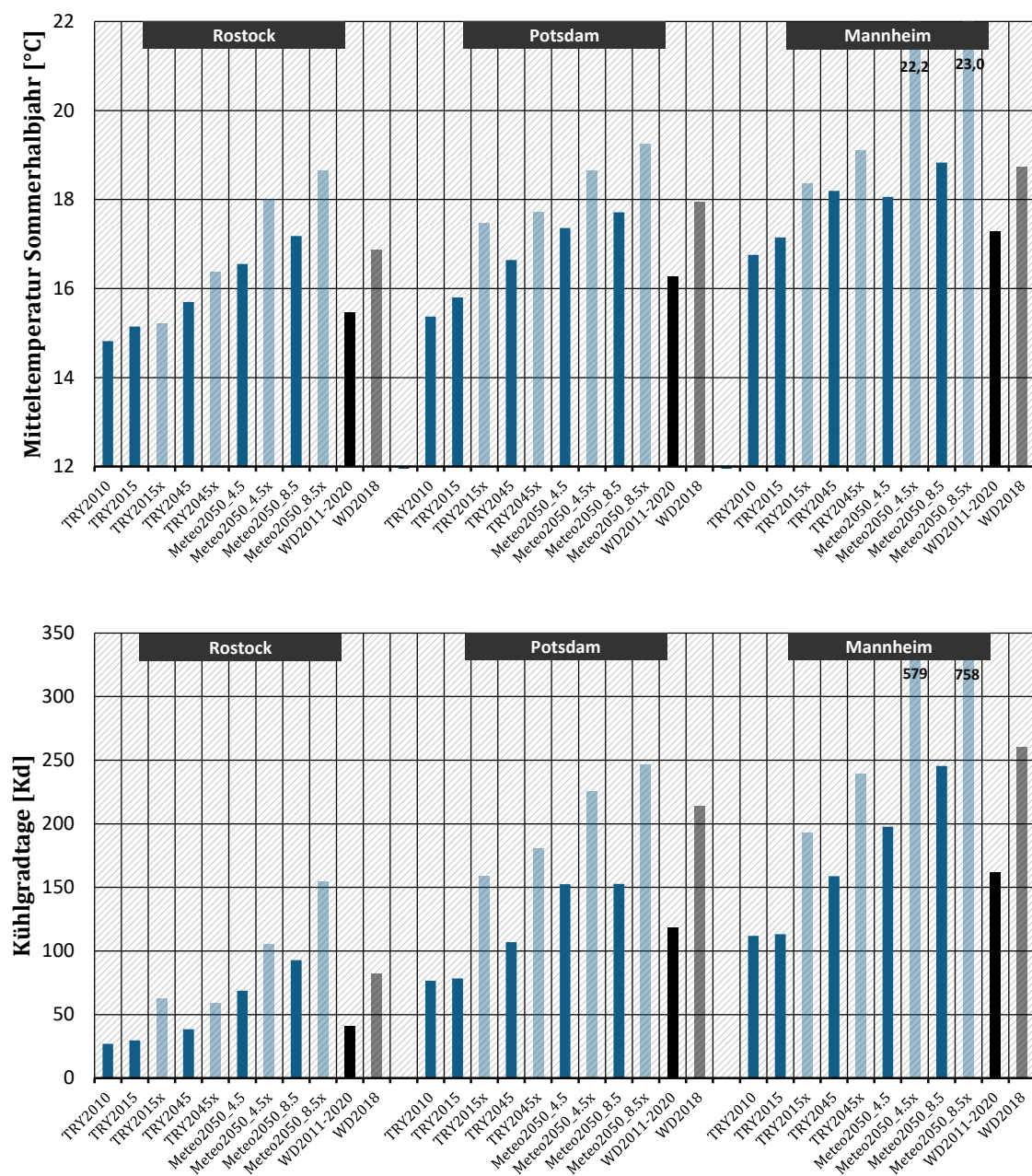
Tabelle 22 gibt eine Übersicht über die bezugnehmend auf Kapitel 3.6 zur Verfügung stehenden Klimadaten und Wetterdaten.

Tabelle 22: Zur Verfügung stehende Klimadaten und Wetterdaten

Klimadaten	
TRY2010	Normbezug DIN 4108-2 (aus Testreferenzjahr-Datensatz 2011)
TRY2015	heutiges Jahr (aus Testreferenzjahr-Datensatz 2017)
TRY2015x	heutiges Jahr - sommerfokussiert (aus Testreferenzjahr-Datensatz 2017)
TRY2045	Zukunftsjahr (aus Testreferenzjahr-Datensatz 2017)
TRY2045x	Zukunftsjahr - sommerfokussiert (aus Testreferenzjahr-Datensatz 2017)
Meteo2050_4.5	Meteonorm-Zukunftsjahr für RCP 4.5
Meteo2050_4.5x	Meteonorm-Zukunftsjahr für RCP 4.5 - sommerfokussiert
Meteo2050_8.5	Meteonorm-Zukunftsjahr für RCP 8.5
Meteo2050_8.5x	Meteonorm-Zukunftsjahr für RCP 8.5 - sommerfokussiert
Wetterdaten	
Mess-Daten 2011-2020	DWD-Wetterdaten von Wetterstationen, gemittelt
Mess-Daten 2018	DWD-Wetterdaten von Wetterstationen

Um die oben aufgeführten Klimadaten besser einzuschätzen zu können, erfolgt in Abbildung 36 eine grafische Aufbereitung für die Parameter Mitteltemperatur Sommerhalbjahr und Kühlgradtage. Bei den DWD-TRY und Meteonorm-Klimadatensätzen wird die Vorort-Lage verwendet, die DWD-Wetterdaten beziehen sich auf den Standort der Wetterstation. Damit der Unterschied zwischen normalen (durchschnittlichen) Jahren und extrem warmen Jahren deutlich wird, sind letztere in helleren Farben dargestellt: sommerfokussierte Klimadatensätze in hellblau und die Wetterdaten des extrem warmen Jahres 2018 in hellgrau.

Abbildung 36: TRY, Klima- und Wetterdaten im Vergleich



Transparente Balken: extrem warmes Jahr (sommerfokussiert)

Im Vergleich zu den Messdaten zeigt sich, wie schon in Kapitel 3.6.3 beschrieben, dass die TRY 2010, 2015 und TRY 2015x nicht mehr geeignet sind, derzeitiges Wetter zu repräsentieren.

Daher wird in Tabelle 23 folgende Auswahl getroffen.

Tabelle 23: Ausgewählte Klimadaten

Verwendung	Auswahl TRY
Normbezug DIN 4108-2	TRY2010 ⁹
Heutiges/zukünftiges Durchschnittsklima	TRY2045
Heutiges/zukünftiges Jahr mit extrem warmem Sommer	TRY2045x
Heutiges Jahr mit extrem warmem Sommer (Wetterdaten)	WD2018
Extrem warmes Zukunftsjahr RCP 8.5	Meteo2050_8.5x

W.St. 2018: DWD-Wetterdaten 2018 (aufbereitet als Input Simulation) – nur verfügbar für Wetterstationen

Schwarze Schrift: Basisuntersuchung; graue Schrift: Detailuntersuchung

Ob die TRY2045 und TRY2045x tendenziell schon eher heutiges Klima abbilden oder auch noch geeignet sein werden die Periode 2031 bis 2060 abzubilden, kann nicht beurteilt werden. Um ausgewählten Klimadaten jedoch einschätzen zu können, werden aussagekräftige Kennwerte in Tabelle 24 bereitgestellt.

Tabelle 24: Kennwerte der ausgewählten Klimadaten

Klimadaten - Ort	Mitteltemperatur Sommerhalbjahr [°C]	Anzahl Sommer-tage	Anzahl Hitze-tage	Anzahl tropischer Nächte	Kühl-gradtage [Kd]	Global-strahlung [kWh/m²a]
TRY10 - Rostock	14,8	13	2	0	27,0	1.048
TRY10 - Potsdam	15,4	39	4	1	76,6	1.072
TRY10 - Mannheim	16,6	53	10	1	112,0	1.089
TRY45 – Rostock_v	15,7	22	1	0	38,4	1.071
TRY45 - Potsdam_v	16,6	52	9	0	107,1	1.100
TRY45 - Mannheim_v	18,2	74	16	1	158,8	1.158
TRY45x - Rostock_v	16,4	31	5	2	58,8	1.092
TRY45x - Potsdam_v	17,7	73	24	6	180,9	1.110
TRY45x - Mannheim_v	19,1	90	31	5	238,2	1.162
WD18 - Rostock	16,9	36	6	6	82,1	1.192
WD18 - Potsdam	17,9	82	28	8	213,9	1.209
WD18 - Mannheim	18,7	100	30	5	260,6	1.257
Meteo50_8.5x - Rostock	18,7	55	15	12	154,7	1.110
Meteo50_8.5x – Potsdam	19,3	84	27	16	246,4	1.107
Meteo50_8.5x - Mannheim	23,0	137	64	67	757,5	1.176

Schwarze Schrift: Basisuntersuchung; graue Schrift: Detailuntersuchung

⁹ Nachfolgend wird aus Platzgründen auch teilweise eine verkürzte Form verwendet: TRY10 anstatt TRY2010, TRY45 anstatt TRY2045, TRY45x anstatt TRY2045x, WD18 anstatt WD2018 und Meteo50 anstatt Meteo2050.

In der Detailuntersuchung soll mit dem Meteonorm-Klimadatensatz für ein extrem warmes Zukunftsjahr 2050 und dem höchsten der repräsentativen Konzentrationspfade RCP 8.5 ein Worst-Case-Szenario untersucht werden, das hoffentlich nicht realistisch ist, aber aufzeigen soll, wie unterschiedliche Maßnahmenpakete auf extremes Klima reagieren.

Aufbereitung der Wetterdaten für die thermische Simulation

Die für die Simulationen verwendeten Wetterdatensätze von 2018 setzen sich aus den entsprechenden gemessenen Wetterdaten Außenlufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, direkte Normalstrahlung und diffuse Horizontalstrahlung zusammen, welche im Climate Data Center des DWD zur Verfügung stehen (DWD 2021b). An einzelnen Stunden weisen die Messdaten Lücken auf, welche durch Übernahme der Vortageswerte der entsprechenden Uhrzeit oder Mittelwertbildung geschlossen wurden.

4.4.2.2 Maßnahmenpakete

Auf Basis langjähriger Praxiserfahrung für die ausgewählten Gebäudetypen werden Maßnahmenpakete für den sommerlichen Wärmeschutz festgelegt. Hierbei werden die sommerlichen Wärmeschutz-Fälle

- ▶ Minimal (MIN) mit wenig Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz
- ▶ Standard (STD) mit einem durchschnittlichen Maßnahmenpaket zum sommerlichen Wärmeschutz
- ▶ Maximum (MAX) mit vielen Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz

unterschieden. Die Maßnahmenpakete werden an die Nutzung angepasst festgelegt und sind Tabelle 25 zu entnehmen. In Klammern sind die Kurzbezeichnungen der jeweiligen Variante angegeben.

Tabelle 25: Maßnahmenpakete

Maßnahmenpaket	Bauliche Maßnahme	Passive Kühlung
MIN Wohnen (W-MIN)	-	Erhöhte Nachtlüftung (NL_f)
STD Wohnen (W-STD)	Rollladen (alSo)	Erhöhte Nachtlüftung (NL_f)
MAX Wohnen (W-MAX)	Screen (alSo)	Hohe Nachtlüftung (NL_ff)
MIN Büro(B-MIN)	Jalousie (alSo)	-
STD Büro (B-STD)	Jalousie (alSo)	Erhöhte Nachtlüftung (NL_f)
MAX Büro (B-MAX)	Jalousie (alSo) + Sonnenschutzglas (SSV)	Adiabate Kühlung (AD_m) + mechanische Nachtlüftung (NL_m)
MIN Schule (S-MIN)	Jalousie (alSo)	-
STD Schule (S-STD)	Jalousie (alSo)	Erhöhte Nachtlüftung (NL_m)
MAX Schule (S-MAX)	Jalousie (alSo) + Sonnenschutzglas (SSV)	Adiabate Kühlung (AD_m) + mechanische Nachtlüftung (NL_m)

4.4.2.3 Energiestandard

Für die Basisuntersuchung wird ein Energiestandard für Neubauten nach Gebäudeenergiegesetz (GEG) zugrunde gelegt. In der Detailuntersuchung wird der Einfluss des Energiestandards über die Varianten „teilsanierter Bestand“ und einem hocheffizienten KfW 40-Standard analysiert. Die Varianten für den Energiestandard sind in Tabelle 26 aufgeführt.

Tabelle 26: Energiestandard

Energiestandard	
E_geg	Energiestandard Neubau (GEG)
E_alt	Energiestandard Bestand (Altbau)
E_ts	Energiestandard teilsanierter Bestand
E_k40	KfW Energiestandard EH40 / EG 40

Schwarze Schrift: Basisuntersuchung

Graue Schrift: Detailuntersuchung

4.4.2.4 Bauweise

Auch die Bauweise der Basisvariante wird an eine typische Gebäudeausführung entsprechend der Nutzung festgelegt. Wohngebäude als Massivbau haben eine schwere Bauweise, wohingegen Bürogebäude durch abgehängte Decken, Trockenbau-Innenwände o.ä. oft nur eine leichte Bauweise aufweisen. Für Klassenräume ergibt sich i.d.R. eine mittlere Bauweise. Da alle Gebäudetypen auch als Holzbau ausgeführt werden können, wird dies in der Detailuntersuchung berücksichtigt. Die Bauweise hat vor allem bei Varianten mit passiver Kühlung Einfluss, so dass diesbezügliche Varianten für die Detailuntersuchung ausgewählt werden (vgl. Tabelle 27).

Tabelle 27: Bauweise

Bauweise - Wohnen	
BW_s	schwere Bauweise
BW_l	leichte Bauweise
BW_m	mittlere Bauweise
Bauweise - Büro	
BW_l	leichte Bauweise
BW_m	mittlere Bauweise
BW_s	schwere Bauweise
Bauweise - Schule	
BW_m	mittlere Bauweise
BW_l	leichte Bauweise
BW_s	schwere Bauweise

Schwarze Schrift: Basisuntersuchung

Graue Schrift: Detailuntersuchung

4.4.2.5 Matrix

Eine Übersicht über die Basis- und Detailuntersuchung gibt Tabelle 28.

Tabelle 28: Übersicht Parameterstudie

Parameter						nutzungsspezifisch			
Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmen (-pakete)	Energie-standard		Raum	Bauweise	Fassade
Basisuntersuchung	Mannheim (Vorort)	TRY2010	Nord	Minimum	Neubau (GEG)	Wohnen	Wohnzimmer Eck-Wohnz. Kinderzimmer Eck-Kinderz.	schwer	Lochfassade
			Süd						
	Potsdam (Vorort)	TRY2045	West	Standard		Büro	2-P-Büroraum	leicht	Lochfassade Fensterband Vollverglasung
			Ost				3-P-Büroeckraum		
	Rostock (Vorort)	WD2018	Süd-West	Maximum		Schule	Klassenzimmer	mittel	Lochfassade Fensterband Vollverglasung
			Nord-Ost						
	TRY2045x								

Varierte Parameter								
Detailuntersuchung		Mannheim (unbewohnt / innerstädtisch)	Meteo2050 _8.5x		teil-sanierter Bestand	Wohnen	leicht	Nutzerverhalten
						mittel	Lage im Gebäude	
		Potsdam (unbewohnt / innerstädtisch)				Büro	mittel	Wechselwirkung mit aktiver Kühlung
						schwer		
		Rostock (unbewohnt / innerstädtisch)				Schule	leicht	Randbedingungen
							schwer	

4.5 Randbedingungen Simulation

Die wesentlichen Randbedingungen der Simulation sind in Tabelle 29 für die Wohnräume, in Tabelle 30 für die Büroräume und in Tabelle 31 für die Klassenzimmer zusammengestellt. Die Abminderung der solaren Einträge durch Sonnenschutzsysteme wird jeweils sonnenstandsabhängig berücksichtigt (detailliertes Fenstermodell). Die sich jeweils ergebende Bauweise ist Tabelle 27 zu entnehmen.

Tabelle 29: Randbedingungen - Wohnräume

	MIN	STD	MAX
Raumgröße	Kinderzimmer 12,5 m ² und Wohnzimmer 35,1 m ² , lichte Höhe 2,5 m		
Bauteile	Außenwand Mauerwerk (U-Wert 0,28 W/m²K) Aufbau: Gipsputz - 36,5 cm Hochlochziegel - Zementputz Innenwand Leichtbau 2,5 cm Gipskarton - 8 cm Dämmung - 2,5 cm Gipskarton Stahlbeton-Decke mit Fußbodenaufbau Gipsputz - 20 cm Stahlbeton - 2 cm Trittschalldämmung - 6 cm Zementestrich - Parkett		
Fenster	Fenster 2-Scheiben Wärmeschutzverglasung (WSV) g-Wert 0,62; U-Wert 1,3 W/m ² K, Rahmenanteil 20%		
Sonnenschutz	ohne Sonnenschutz	Rollladen 3/4 geschlossen, strahlungsabhängig (Nord 200 W/m ² , sonst 300 W/m ²)	Screen komplett geschlossen, strahlungsabhängig (Nord 200 W/m ² , sonst 300 W/m ²)
Interne Lasten	100 Wh/m ² d		
Taglüftung	Mech. Abluftanlage konstant ($n = 0,14 \text{ h}^{-1}$) + Fensterlüftung (6-23 Uhr Erhöhung des Luftwechsels auf $n = 3 \text{ h}^{-1}$ wenn Raumtemperatur > 23 °C und > Außenlufttemperatur)		
Nachtlüftung	Erhöhte Nachtlüftung über Fenster (23 - 6 Uhr Erhöhung des Luftwechsels auf $n = 2 \text{ h}^{-1}$, wenn Raumtemperatur > 23 °C)		Hohe Nachtlüftung über Fenster (23 - 6 Uhr Erhöhung des Luftwechsels auf $n = 5 \text{ h}^{-1}$ wenn Raumtemperatur > 23 °C)
Infiltration	Konstant 0,07 h ⁻¹ (entsprechend DIN 18599-2:2018-09 Gl. 64 mit $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ und gemäßigter Abschirmung $e = 0,07$)		
Kühlung	-		
Heizung	T _{soll} 20 °C (ideale Heizung)		

Tabelle 30: Randbedingungen - Büroräume

	MIN	STD	MAX
Raumgröße	20,7 m ² 3-Achser und 27,8 m ² 4-Achser, lichte Höhe 3,0 m		
Bauteile	Außenwand Stahlbeton (U-Wert 0,28 W/m²K) Gipsputz - 20 cm Stahlbeton - 14 cm Mineralwolle Innenwand Leichtbau 2,5 cm Gipskarton - 10 cm Dämmung - 2,5 cm Gipskarton Stahlbeton-Decke (abgehängt) mit Fußbodenaufbau 1,25 cm Gipskarton - 10 cm Luftschicht - 25 cm Stahlbeton - 10 cm Luftschicht - 3 cm Hohlraumbodenplatte		
Fenster	2-fach WSV (g-Wert 0,62; Uw-Wert 1,3 W/m ² K), Rahmenanteil 20%		2-fach SSV (g-Wert 0,38; U-Wert 1,3 W/m ² K), Rahmenanteil 20%
Sonnenschutz	Lamellenraffstore 45 ° strahlungsabhängig (Nord 150 W/m ² , sonst 200 W/m ²)		
Nutzungszeit	Montag bis Freitag 7 - 18 Uhr		
Interne Lasten	Durchschnittlich 144 Wh/m²d , Verteilung wochentags 7 – 18 Uhr: 2-Personen-Büro bzw. 3-Personen-Büro: 1,2 met je Personen bei je 8h-Anwesenheit verteilt auf Nutzungszeit, 5,1 W/m ² Arbeitshilfen 7 W/m ² Beleuchtung, wenn < 500 lx		
Taglüftung	Fensterlüftung (während Nutzung $n = 1,33 \text{ h}^{-1}$; Erhöhung des Luftwechsels auf $n = 3 \text{ h}^{-1}$, wenn Raumtemperatur > 23 °C und > Außenlufttemperatur)		Lüftung über RLT-Anlage mit Adiabatik (während Nutzung $n = 1,33 \text{ h}^{-1}$; Zuluft-vent. 960 Pa, Abluft 750 Pa zzgl. 50 Pa für AD, WRG $\eta = 75 \%$, indirekte Verdunstungskühlung, wenn Außenlufttemp. > 23 °C) + Fensterlüftung (Zusätzlicher Luftwechsel $n = 1,66 \text{ h}^{-1}$ wenn Raumtemperatur > 23 °C und > Außenlufttemperatur)
Nachtlüftung	Keine Nachtlüftung	Erhöhte Nachtlüftung über Fenster (18 -7 Uhr Luftwechsel $n = 2 \text{ h}^{-1}$ wenn Raumtemperatur > 21,5 °C und > Außenlufttemperatur)	Erhöhte Nachtlüftung über RLT (18 -7 Uhr Luftwechsel $n = 2 \text{ h}^{-1}$ wenn Raumtemperatur > 21,5 °C und > Außenlufttemp., Zuluft-Temperaturerhöhung mit 100% der Zuluftventilator-Abwärme berücksichtigt)
Infiltration	Konstant 0,07 h ⁻¹ (entsprechend DIN 18599-2:2018-09 Gl. 64 mit $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ und gemäßigter Abschirmung $e = 0,07$)		
Kühlung	-		
Heizung	T _{soll} 21 °C (ideale Heizung)		

Tabelle 31: Randbedingungen - Klassenzimmer

	MIN	STD	MAX
Raumgröße	65,4 m², lichte Höhe 3,0 m		
Bauteile	Außenwand Stahlbeton (U-Wert 0,28 W/m²K) Gipsputz - 20 cm Stahlbeton - 14 cm Mineralwolle Innenwand Leichtbau 2,5 cm Gipskarton - 10 cm Dämmung - 2,5 cm Gipskarton Stahlbeton-Decke (abgehängt) mit Fußbodenaufbau 1,25 cm Gipskarton - 10 cm Luftschicht - 25 cm Stahlbeton – 7 cm Estrich		
Fenster	2-fach WSV (g-Wert 0,62; U-Wert 1,3 W/m²K), Rahmenanteil 20%	2-fach SSV (g-Wert 0,38; U-Wert 1,3 W/m²K), Rahmenanteil 20%	
Sonnenschutz	Lamellenraffstore 45 ° strahlungsabhängig (Nord 150 W/m², sonst 200 W/m²)		
Nutzungszeit	Montag bis Freitag 7:30 – 15:30 Uhr außerhalb Ferienzeit Ferienzeit ¹⁰ : Winter 5.2.-16.2., Ostern 26.3.-4.4., Pfingsten 11.5. + 18.5.-22.5., Sommer 9.7.-18.8., Herbst 8.10.-13.10. und 1.11.-2.11., Weihnachten 24.12.-5.1.		
Interne Lasten	Durchschnittlich ca. 270 Wh/m²d , Verteilung wochentags 7:30 – 15:30 Uhr: 30 Personen je 1,2 met mit Anwesenheit nach Belegungsplan (=vorm. 2 x 15-Minuten-Pause mit 50 % Belegung und von 13:00-14:00 Mittagspause ohne Belegung), 250 W an Arbeitshilfen im Klassenzimmer nach Belegungsplan 6 W/m² Beleuchtung, wenn < 300 lx		
Taglüftung	Lüftung über RLT-Anlage (während Nutzung mit n = 4,6 h ⁻¹) Zuluftvent. 960 Pa, Abluft 750 Pa, WRG η = 75 %, Zuluft-Temperaturerhöhung durch Ventilator-Abwärme) + Fensterlüftung (zusätzlicher Luftwechsel n = 3 h ⁻¹ wenn Raumtemperatur > 23 °C und > Außenlufttemperatur)	Lüftung über RLT-Anlage mit Adiabatik (abluftseitiger Druckverlust zzgl. 50 Pa für AD, indirekte Verdunstungskühlung AD, wenn Außenlufttemp. > 23 °C, ansonsten wie MIN/STD)	
Nachtlüftung	Keine Nachtlüftung	Nachtlüftung über RLT (18 -7 Uhr Luftwechsel n = 4,6 h ⁻¹ wenn Raumtemperatur > 21,5 °C und > Außenlufttemp., Zuluft-Temperaturerhöhung durch Zuluftventilator-Abwärme)	
Infiltration	Konstant 0,07 h ⁻¹ (entsprechend DIN 18599-2:2018-09 Gl. 65 mit n ₅₀ = 1 h ⁻¹ und gemäßigter Abschirmung e = 0,07)		
Kühlung	-		
Heizung	T _{soll} 21 °C (ideale Heizung)		

Insbesondere die Simulationsrandbedingungen für das Klassenzimmer lassen- obwohl praxisnah gewählt- einen großen Spielraum zu. Aus diesem Grund werden in der Detailuntersuchung in Kapitel 5.3.6 zwei gegebenenfalls einflussreiche Randbedingungen (Raumnutzung während Ferienzeit, keine Möglichkeit zur zusätzlichen Fensteröffnung) in deren Auswirkungen auf die Ergebnisse untersucht.

¹⁰ Die angesetzten Ferienzeiten entsprechen den Ferien des Landes Mecklenburg-Vorpommerns im Jahr 2018. Auf Basis einer Analyse der Ferienzeiten im Jahr 2018 wurde festgestellt, dass die Ferienzeiten des Landes Mecklenburg-Vorpommerns ein im Vergleich durchschnittliches Schuljahr in der Anzahl von Ferientagen und deren Verteilung abbilden.

5 Ergebnisse Parameterstudie

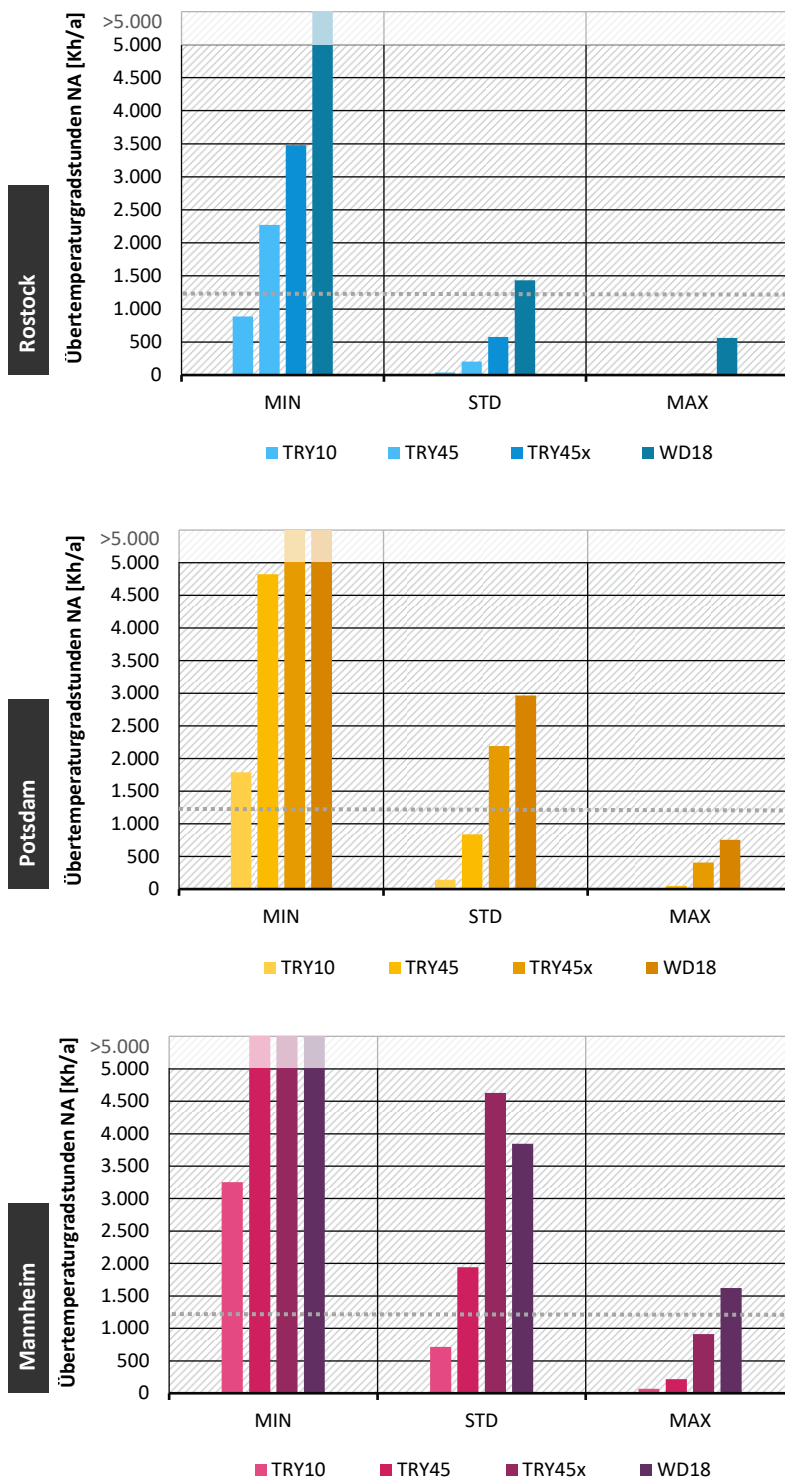
Wie in den Kapitel 3.5.2.2.4 begründet und beschrieben, erfolgt die Auswertung der Übertemperaturgradstunden nach dem Nationalen Anhang der DIN EN 16798-1:2022-03. Die Festlegung des Anforderungswertes findet sich in Kapitel 3.5.3 bzw. Tabelle 16.

5.1 Basisuntersuchung

Die Auswertung der thermischen Simulationen erfolgt in Kapitel 5.1.1 anhand von Diagrammen, welche die Übertemperaturgradstunden-Auswertung für die Variantenmatrix am Beispiel der westorientierten Räume zeigt, in Kapitel 5.1.2 über eine statische Auswertung aller durchgeführten Simulationen und in Kapitel 5.1.3 eine Auswertung der operativen Raumtemperaturen für ausgewählte Beispiele. Anschließend werden in Kapitel 5.1.4 die Erkenntnisse der Basisuntersuchung verwendet, um aufgestellte Hypothesen zu prüfen und zu verifizieren bzw. zu widerlegen.

5.1.1 Variantenübersicht

In den nachfolgenden Diagrammen wird eine Übersicht über die Ergebnisse am Beispiel der Übertemperaturgradstunden-Auswertung der westorientierten Räume gegeben. Bei Wohnnutzung wären mit den Simulation-Randbedingungen nach DIN 4108-2 bei 1.200 Kh/a zulässig, nach der hier vorgestellten Methodik 7 % der Nutzungszeit mit einer Abweichung um 2 K bzw. 1.226 Kh/a. Ergebnisse mit über 5.000 Kh/a, d.h. mehr als dem Vierfachen der zugelassenen ÜTGS, werden in den Ergebnis-Diagrammen nicht mehr dargestellt, da diese Räume so nicht bewohnbar wären und Abhilfe geschaffen werden würde. Abbildung 37 zeigt die Ergebnisse für das Wohnzimmer.

Abbildung 37: Übertemperaturgradstunden Wohnzimmer (westorientiert)

Da Übertemperaturgradstunden über 5.000 Kh/a wegen zu hoher Unbehaglichkeit keinen realistischen Fall abbilden, wird die absolute Höhe in diesen Fällen nicht dargestellt.

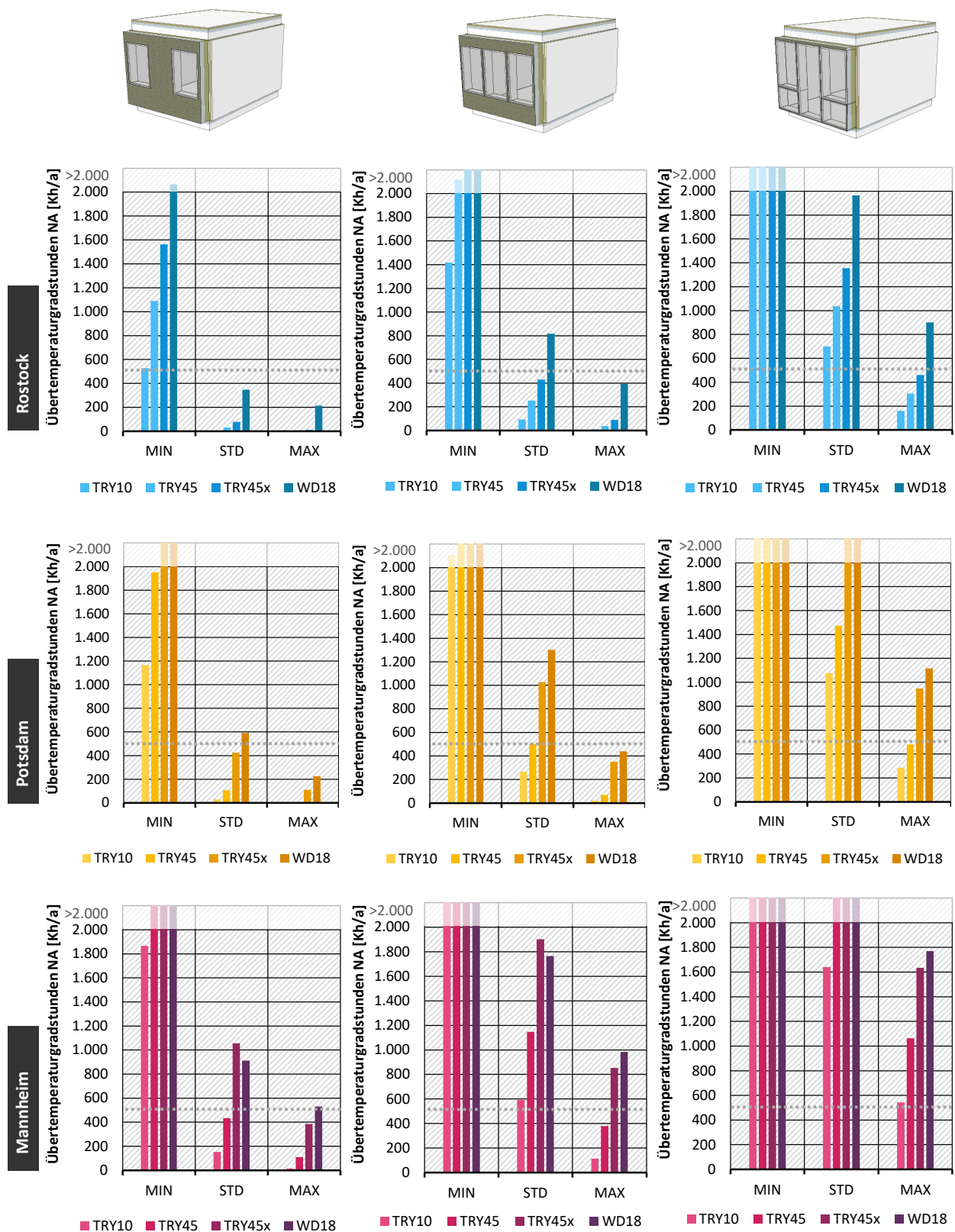
Quelle: eigene Darstellung, IBH

In Abbildung 38 sind die Ergebnisse für das 2-Personen-Büro mit Westorientierung zu sehen. Nach der vorgestellten Methodik liegt der Anforderungswert bei den Nichtwohngebäude bei ≤ 9 % der Nutzungszeit Abweichung um 2 K bzw. bei der zugrunde gelegten Büro-Nutzungszeit 517 Kh/a. Analog den Wohnraum-Diagrammen werden nun ÜTGS-Ergebnisse über 2.000 Kh/a, d.h. einer Überschreitung um das knapp Vierfache, nicht mehr dargestellt, da in diesen Räumen nicht mehr gearbeitet werden könnte und Gegenmaßnahmen ergriffen würden.

Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse für das Klassenzimmer mit Westorientierung. Bei der zugrunde gelegten Klassenraum-Nutzungszeit ergibt sich ein Anforderungswert von 217 Kh/a. Analog den Büro-Diagrammen werden daher ÜTGS-Ergebnisse über 800 Kh/a, nicht mehr dargestellt.

Da eine der wärmsten Phase aufgrund der langen Schulferien im Sommer außerhalb der Nutzungsphase liegt und daher nicht berücksichtigt wird, wird in der Detailuntersuchung ein Klassenzimmer simuliert und ausgewertet, das auch in den Ferien genutzt wird (s. Kapitel 5.3.6).

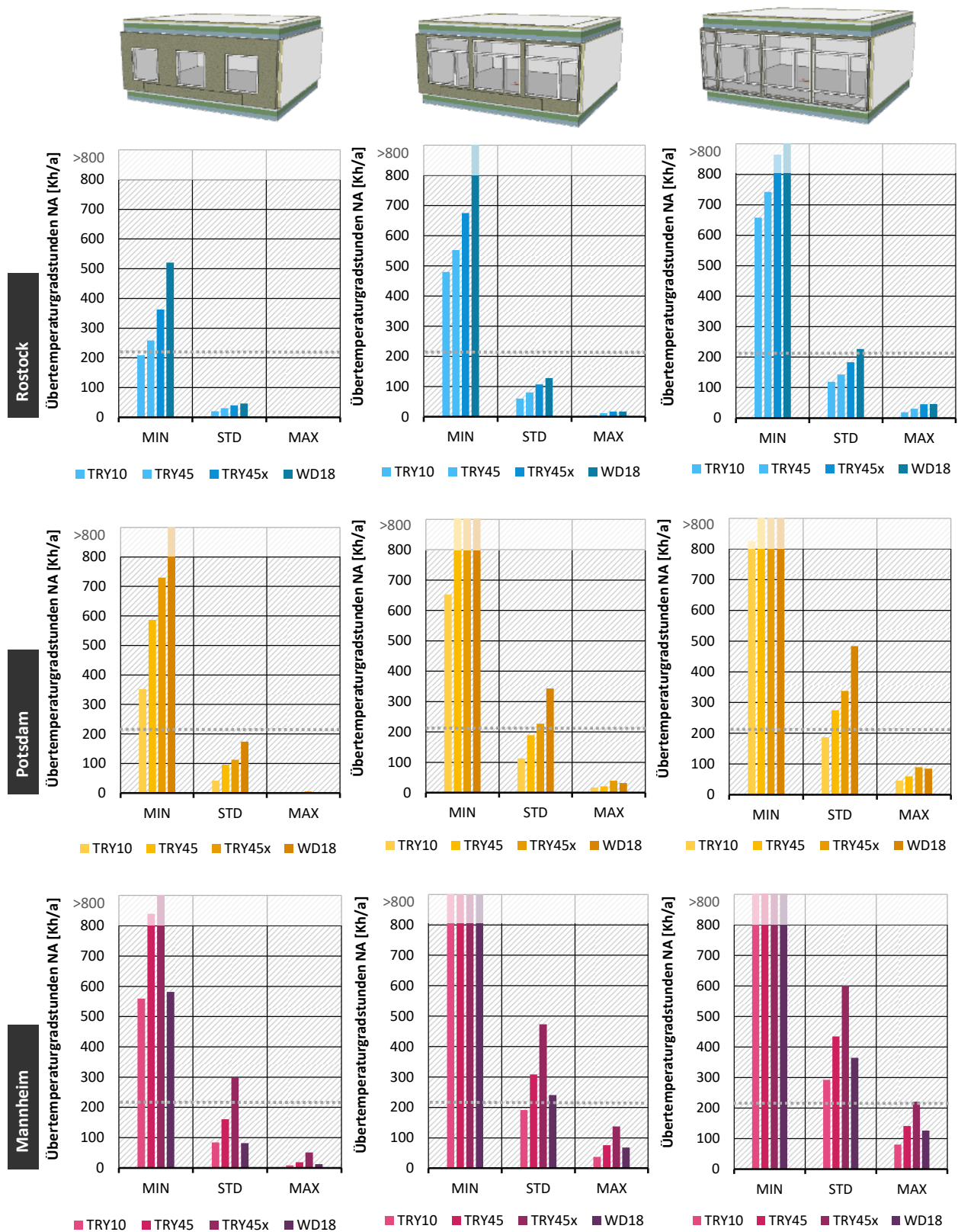
Abbildung 38: Übertemperaturgradstunden 2-Personen Büro (westorientiert)



Da Übertemperaturgradstunden über 2.000 Kh/a wegen zu hoher Unbehaglichkeit keinen realistischen Fall abbilden, wird die absolute Höhe in diesen Fällen nicht ausgewertet.

Quelle: eigene Darstellung, IBH

Abbildung 39: Übertemperaturgradstunden Klassenzimmer (westorientiert)



Da Übertemperaturgradstunden über 800 Kh/a wegen zu hoher Unbehaglichkeit keinen realistischen Fall abbilden, wird die absolute Höhe in diesen Fällen nicht ausgewertet.

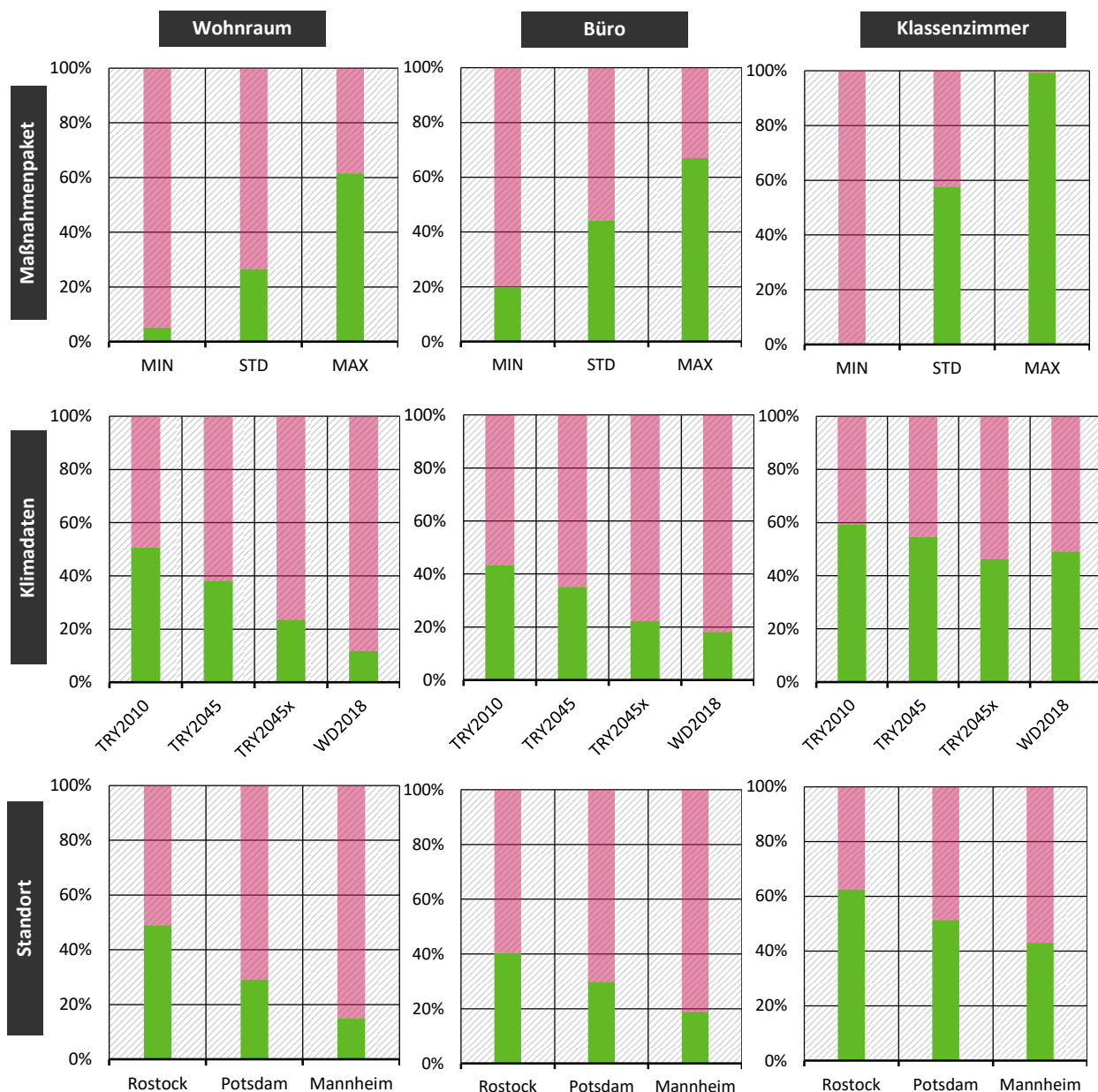
Quelle: eigene Darstellung, IBH

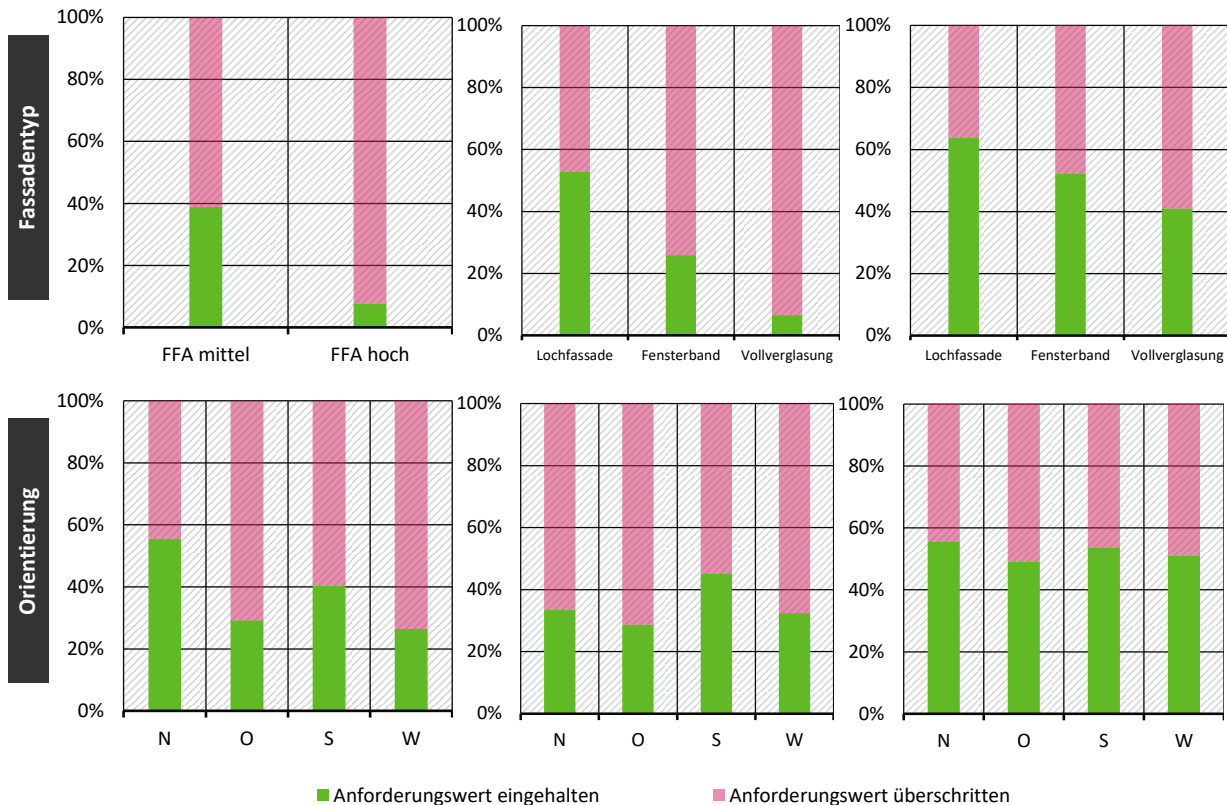
5.1.2 Statistische Auswertung

Um die Vielzahl der Simulationen inklusive aller Orientierungen und auch Ecksituationen auszuwerten, wird der Datensatz deskriptiv analysiert. Für jede Simulation wird als Ergebnis festgehalten, ob der ÜTGS-Anforderungswert eingehalten oder überschritten ist. Die Festlegung des Anforderungswerts ist in 3.5.3 beschrieben. Abbildung 40 zeigt die Ergebnisse untergliedert nach Wohnraum, Büroraum und Klassenzimmer für die Auswertung der Maßnahmenpakete, Klimadaten, Standorte, Fassadentypen und Orientierungen.

Insgesamte Anzahl an ausgewerteten Simulationen ist 1692, aufgegliedert in 576 für Wohnen, 684 für Büro und 432 für das Klassenzimmer.

Abbildung 40: Prozentuale Einhaltung und Überschreitung des Anforderungswerts





Quelle: eigene Darstellung, IBH

Für die Auswertung zu beachten ist, dass sämtliche Variationen der Randbedingungen im Datensatz enthalten sind. So fließen z.B. beim Wohnen und Büro auch Eckraum-Situationen mit sehr hohem Fensterflächenanteil mit ein (nicht jedoch beim Klassenzimmer).

Basierend auf der statistischen Auswertung zeigt sich, dass das gewählte Maßnahmenpaket, die Klimadaten, der Standort und der Fassadentyp hohen Einfluss darauf haben, ob eine Variante den Anforderungswert einhält oder überschreitet.

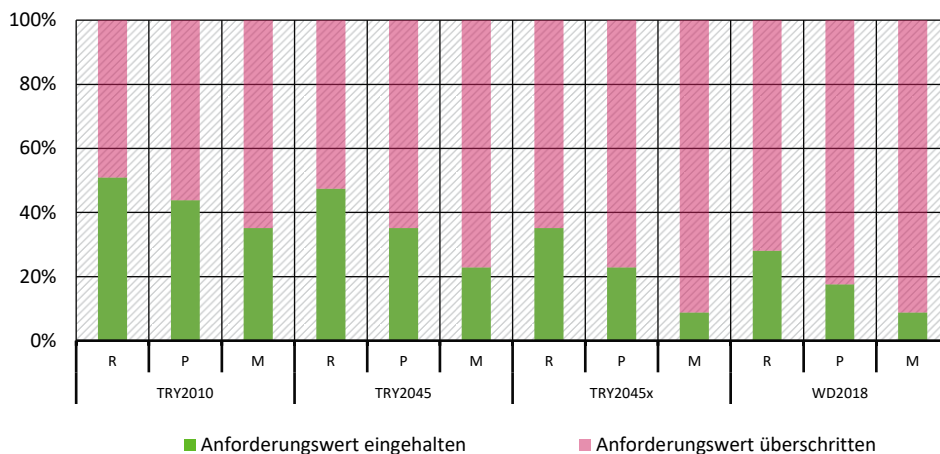
Die Orientierung, bei deren Auswertung in Abbildung 40 als Besonderheit zu beachten ist, dass die Ecksituationen nicht mit ausgewertet werden, hat einen etwas geringeren Einfluss. Beim Wohnen und beim Klassenzimmer sind die Nord- gefolgt von der Südausrichtung am günstigsten, wohingegen beim Büroraum die Süd- gefolgt von der Nordausrichtung am günstigsten ist.

Dieser Effekt hängt vermutlich mit der Tatsache zusammen, dass auch diffuse Strahlung - wie sie bei der Nordausrichtung überwiegt - zur Erwärmung des Raumes beiträgt, und auch an der in der Simulation hinterlegten Steuerung des außenliegenden Sonnenschutzes, welche in Anlehnung an die Vorgaben der DIN4108-2 festgelegt ist. Die Nord-Jalousie schließt in Büro und Schule schon bei 150 W/m^2 solarer Einstrahlung auf die Fassadenaußenfläche und die der anderen Ausrichtungen bei 200 W/m^2 . Dennoch sind die Nord-Jalousien aufgrund der geringeren Strahlungsintensitäten deutlich seltener geschlossen als die der anderen Ausrichtungen. Beim Wohnen ist der Unterschied beim Prozentsatz der eingehaltenen Varianten zwischen Nord- und anderen Ausrichtungen noch etwas größer, wobei beim Wohnen der außenliegende Sonnenschutz im Norden bei 200 W/m^2 und bei den anderen Ausrichtungen erst bei 300 W/m^2 geschlossen wird. Außerdem gehen in die Auswertung der Orientierungen beim Wohnen auch die MIN-Varianten mit ein, die keinen Sonnenschutz aufweisen, wodurch es durch die Sonnenschutzsteuerung zu keiner Bevorteilung der Ausrichtungen mit direkter Sonnenstrahlung kommt.

Beim Wohnen ist die Ost- etwas besser als die Westausrichtung. Beim Büro und der Schule ist die West- etwas günstiger als die Ostausrichtung. Letzteres hängt mit der Auswertung der ÜTGS nur für die Nutzungszeit zusammen, die beim Klassenzimmer schon um 15:30 Uhr, beim Büro um 18:00 Uhr endet, so dass spätere Übertemperaturgradstunden nicht in die Auswertung einfließen.

Ergänzend werden in Abbildung 41 die Büro-Simulationen gleichzeitig nach Klimadaten und Standorten ausgewertet. Der Einfluss der Klimadaten ist deutlich zu erkennen und liegt zwischen einem eingehaltenen Anforderungswert von mehr als der Hälfte aller Varianten beim Standort Rostock mit TRY2010 und für Mannheim in Verbindung mit dem TRY2045x oder den Wetterdaten 2018 bei weniger als einem Zehntel.

Abbildung 41: Einhaltung des Anforderungswertes in Abhängigkeit der Klimadaten (Büro)

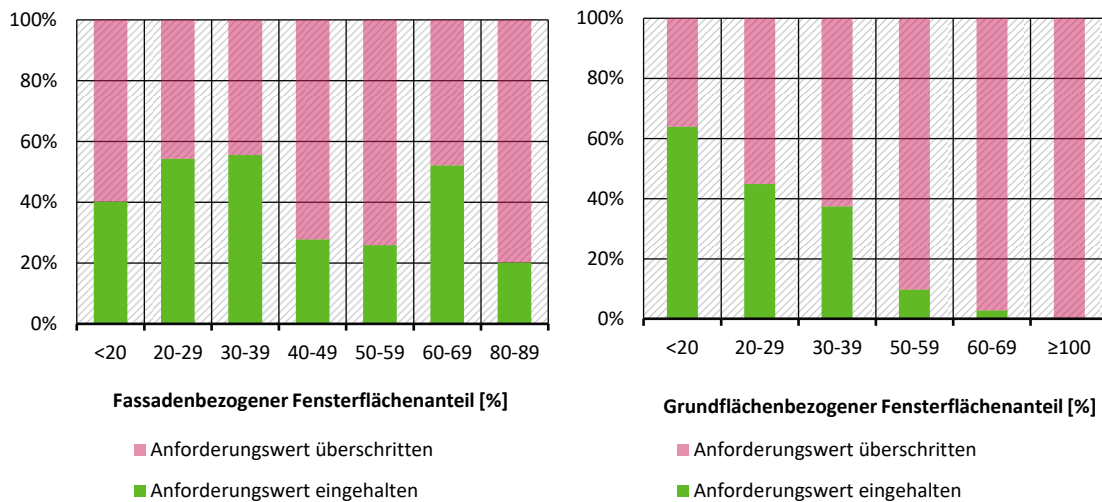


Quelle: eigene Darstellung, IBH

In Abbildung 42 wird nochmal der große Einfluss des Fensterflächenanteils – ausgewertet für alle Simulationen - gezeigt. Die Simulationen werden hierbei Fensterflächenanteil-Bereichen in 10 %-Schritten zugeordnet. Bereiche, die nicht aufgeführt werden, kamen bei den Raummodellen (vgl. Tabelle 18 bis Tabelle 20) nicht vor.

Abbildung 42: Einhaltung des Anforderungswertes in Abhängigkeit des grundflächenbezogenen und fassadenbezogenen Fensterflächenanteils

Auswertung nach grundflächenbezogenen (links) und fassadenbezogenen (rechts) Fensterflächenanteils aller Simulationsergebnisse



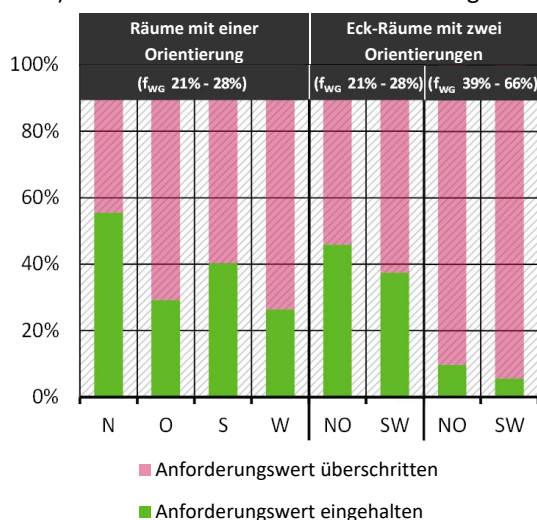
Quelle: eigene Darstellung, IBH

Der Zusammenhang zwischen der Einhaltung des Anforderungswertes und dem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil zeigt sich äußerst deutlich, wohingegen dies für den fassadenbezogenen Fensterflächenanteil nicht der Fall ist. Der grundflächenbezogene Fensterflächenanteil ist daher für den sommerlichen Wärmeschutz das geeignete Planungskriterium.

In der DIN 4108-2 (Kapitel 4.3.2) steht einleitend, dass Räume mit nach zwei oder mehr Richtungen orientierten Fensterflächen – insbesondere bei Südost- oder Südwestorientierungen – ungünstiger hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes als bei einseitig orientierten Fensterflächen sind. Mit nachfolgender Auswertung soll eingeschätzt werden, ob sich diese Aussage auf den i.d.R. erhöhten grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil von Eckräumen bezieht oder auch bei gleichem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil gilt. Mit diesem Hintergrund wird die Einhaltung des Anforderungswertes für die Eckräume beim Wohnen (s. Abbildung 43) und beim Büro (s. Abbildung 44) analysiert.

Abbildung 43: Einhaltung des Anforderungswertes in Abhängigkeit der Orientierung (Wohnen)

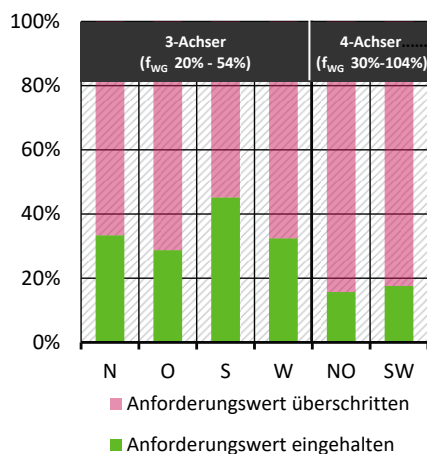
Vergleich der Orientierungen inklusive Eckräume - getrennt nach Eckräumen mit gleichem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil (f_{WG} 21 - 28 %) und mit gleichem fassadenbezogenen Fensterflächenanteil (f_{WG} 39 - 66 %) wie die Räume mit einer Orientierung



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Der Anteil der Eckräume, die den Anforderungswert einhalten, liegt bei gleichem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil zwischen den Anteilen der jeweiligen Räume mit nur einer Orientierung, d.h. der Nord-Ost-Eckraum liegt zwischen den Nord- und den Osträumen, der Süd-West-Eckraum zwischen den Süd- und den Westräumen. Tendenziell liegen die Anteile der Eckräume etwas über den Mittelwert der entsprechenden Räume mit einer Orientierung. Dies könnte mit einer höheren Infiltration aufgrund der verdoppelten Außenflächen in Verbindung stehen. Eckräume mit gleichem fassadenbezogenen (und damit deutlich höherem grundflächenbezogenen) Fensterflächenanteil haben größere Fensterflächen, so dass nur noch wenige Varianten den Anforderungswert einhalten.

Beim Büro wurde das Eckbüro praxisnah als 4-Achser (vgl. Tabelle 19) und deutlich erhöhtem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil modelliert. In Abbildung 44 ist zu erkennen, dass die prozentuale Einhaltung bei den Eckräumen sowohl bei Nord-Ost, als auch bei Süd-West-Orientierung deutlich abnimmt.

Abbildung 44: Einhaltung des Anforderungswertes in Abhängigkeit der Orientierung (Büro)

Quelle: eigene Darstellung, IBH

Daraus lässt sich ableiten, dass der Hinweis der DIN 4108-2, dass Räume mit nach zwei oder mehr Richtungen orientierten Fensterflächen ungünstiger sind, auf den in der Regel höheren Fensterflächenanteil von Eckräumen bezieht.

Eine abschließende Regressionsanalyse der in Abbildung 40 dargestellten Parameter (Maßnahmenpaket, Klimadaten, Standort, Fassadentyp und Orientierung) zeigt, dass jeder Parameter einen signifikanten Einfluss hat. Folgende Parameter sind besonders relevant:

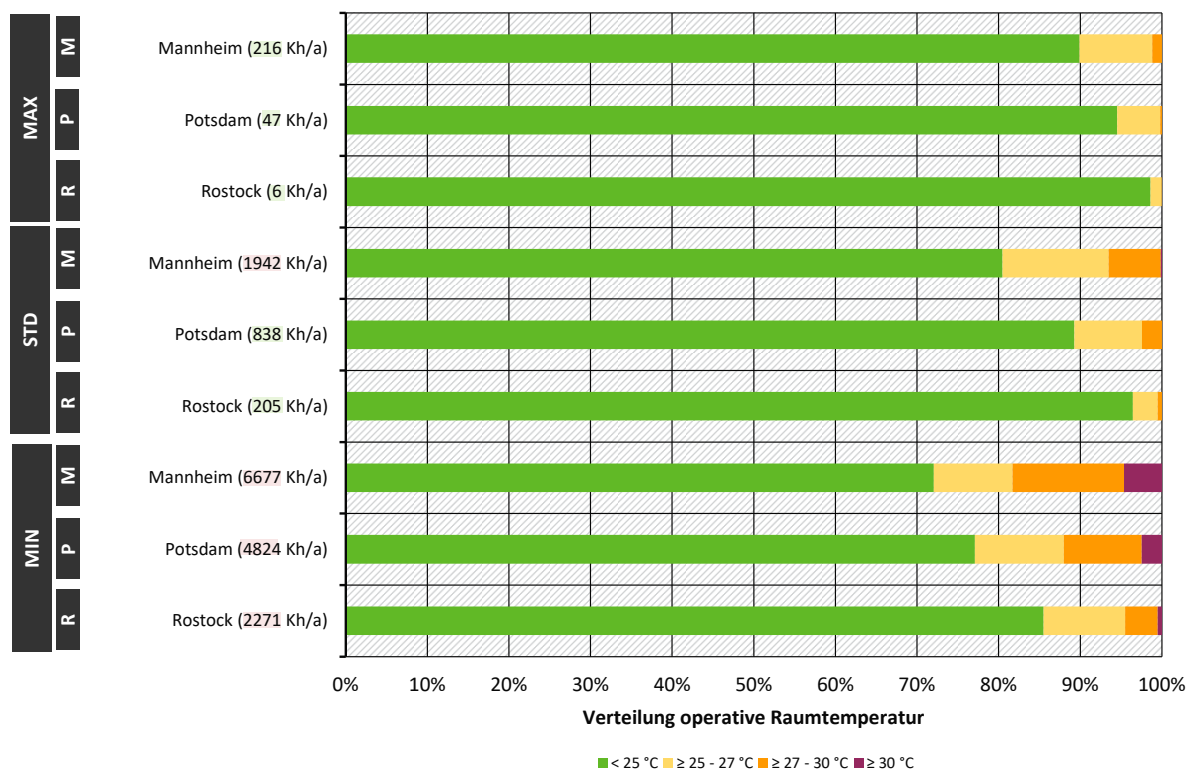
- ▶ Bei allen untersuchten Nutzungstypen hat das Maßnahmenpaket den größten Einfluss.
- ▶ Beim Wohnen und beim Büro ist der zweitwichtigste Parameter der Fassadentyp, bei der Schule der Standort.
- ▶ Bei der Schule haben die Klimadaten, der Fassadentyp und Orientierung zwar einen erkennbaren Einfluss, dieser ist aber im Vergleich zum Maßnahmenpaket gering.
- ▶ Beim Wohnen ist der Einfluss der Parameter im Vergleich zu den anderen beiden Nutzungstypen gleichmäßiger verteilt. Nach dem Maßnahmenpaket haben Fassadentyp, Standort und Klimadatenatz nahezu den gleichen Einfluss.

Die hohe Relevanz der Maßnahmenpakete bedeutet im Umkehrschluss, dass mit passiven Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz auch bei steigenden Temperaturen durch den Klimawandel viel für „Kühle Gebäude im Sommer“ getan werden kann.

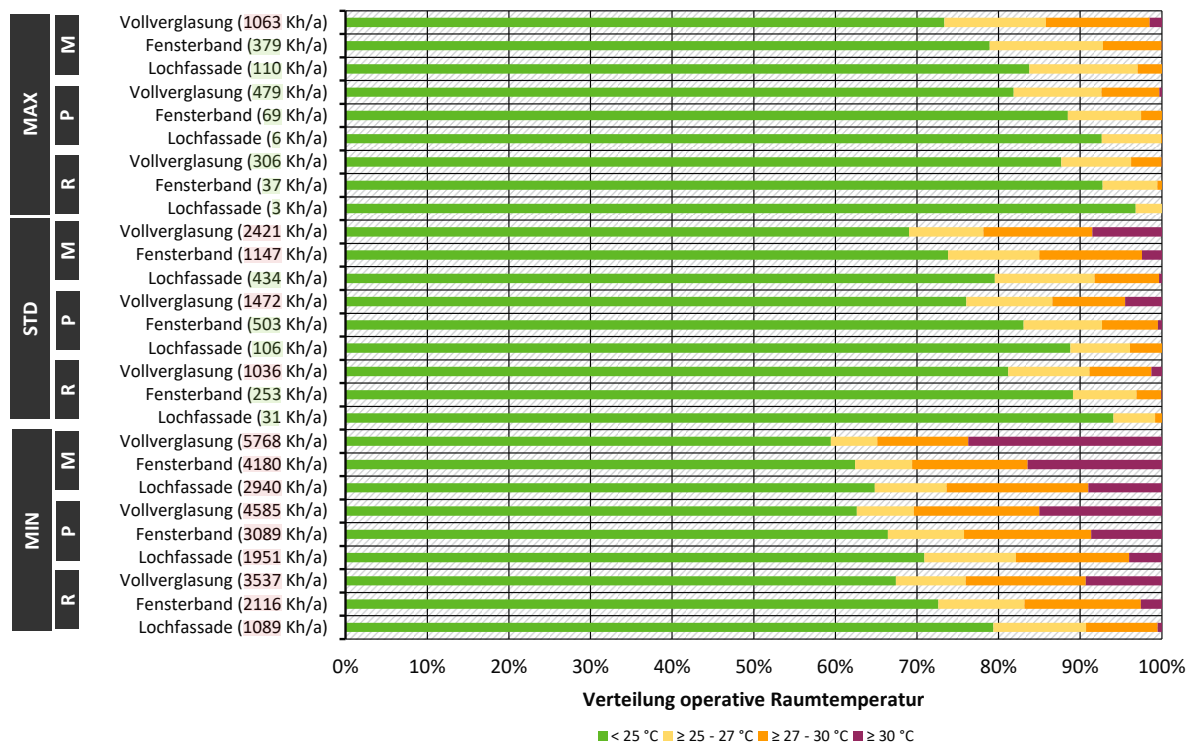
5.1.3 Auswertung der operativen Raumtemperatur

Ergänzt werden soll die Ergebnis-Darstellung durch eine möglichst anschauliche Auswertung (vgl. Kapitel 3.5.2.2.2). Hierbei wird die Verteilung der operativen Raumtemperaturen eines Jahres in die Temperaturbereiche kleiner 25° C; 25° C bis kleiner 27° C, 27° C bis kleiner 30° C und größer gleich 30° eingeteilt und entsprechend farblich markiert. Zusätzlich werden nach der Standortangabe bzw. Angabe des Fassadentyps noch die Übertemperaturgradstunden analog Kapitel 5.1.1 angegeben, welche grünlich markiert sind, wenn der Anforderungswert eingehalten ist, bzw. rötlich, wenn dieser überschritten ist.

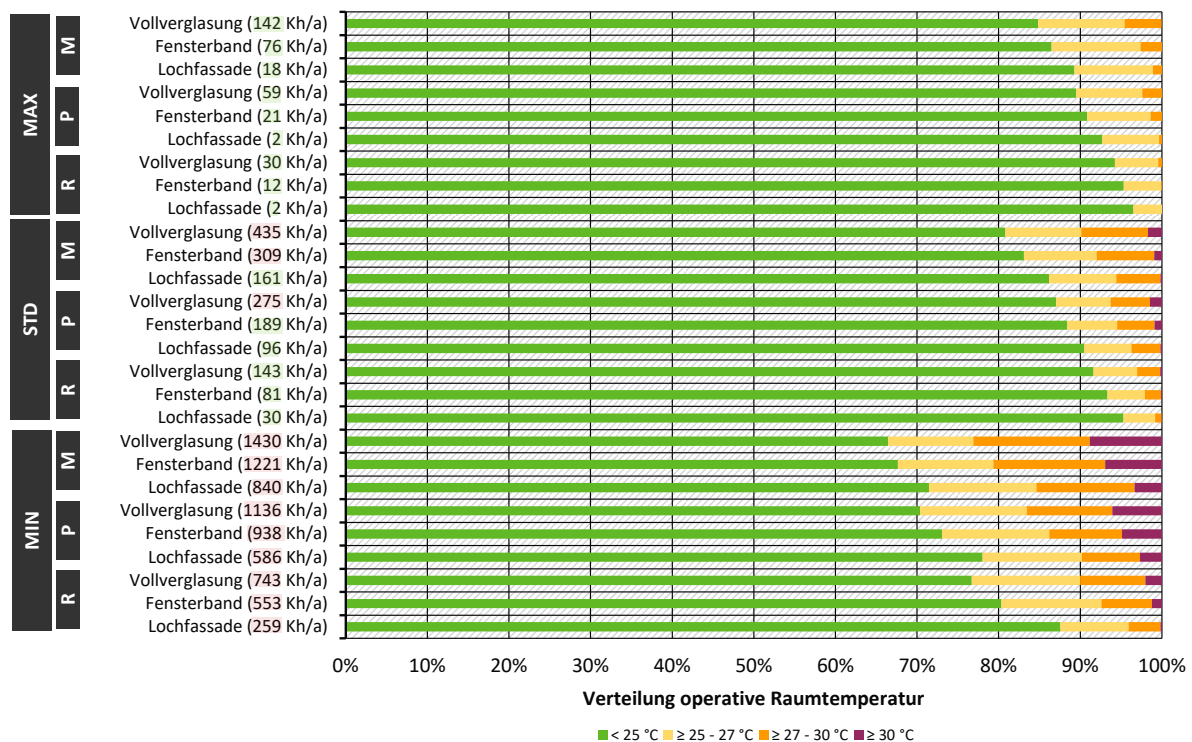
Die entsprechenden Darstellungen sind in Abbildung 45 für das Wohnzimmer, in Abbildung 46 für das 2 Personen-Büro und in Abbildung 47 für das Klassenzimmer – jeweils für das TRY2045 und für Westausrichtung - zu finden. Sobald es Raumtemperaturen über 30° C gibt, sind auch die ÜTGs nahe dem Anforderungswert bzw. überschreiten diesen. Der Unterschied zwischen den Maßnahmenpaketen ist besonders beim Büro und Klassenzimmer deutlich zu erkennen.

Abbildung 45: Bereiche operativer Raumtemperaturen Wohnzimmer- TRY2045 (westorientiert)

Quelle: eigene Darstellung, IBH

Abbildung 46: Bereiche operativer Raumtemperaturen Büro - TRY2045 (westorientiert)

Quelle: eigene Darstellung, IBH

Abbildung 47: Bereiche operativer Raumtemperaturen Klassenzimmer - TRY2045 (westorientiert)

Quelle: eigene Darstellung, IBH

5.1.4 Aufstellung und Prüfung von Hypothesen

Zur Feststellung von wichtigen Erkenntnissen aus der Basisuntersuchung erfolgt nachfolgend eine Prüfung von Hypothesen zum Einfluss von Klimadaten, Maßnahmenpaketen, und Raumbeschaffenheit. Es wird darauf hingewiesen, dass die Untersuchung der Hypothesen und die Formulierung von Aussagen auf die Bandbreite des beschriebenen Untersuchungsgegenstandes beschränkt sind.

5.1.4.1 Klimadaten

Wie in Kapitel 4.4.2.1 beschrieben, werden in der Basisuntersuchung die Klimadaten TRY2010, TRY2045, TRY2045x, Wetterdaten 2018 untersucht.

Die erste Hypothese zu den Klimadaten lautet:

- **K1. Passive Maßnahmen allein werden in den nächsten Dekaden aufgrund des Klimawandels nicht ausreichen, um behagliche Raumtemperaturen zu ermöglichen.**

Um diese Hypothese zu untersuchen, werden bei Abbildung 37, Abbildung 38 und Abbildung 39 die Zukunfts-TRY 2045x betrachtet. Bei der Auswertung mit je nach Standort angepassten Bezugstemperaturen können in Wohn-, Büro- und Klassenräumen mit dem MAX-Maßnahmenpaket auch bei den Klimadaten TRY2045x meist die Anforderungen unterschritten werden. Überschreitungen gibt es beim Büro mit Fensterband und Vollverglasung, wobei die Überschreitungen bei der Vollverglasung deutlich höher sind als beim Fensterband sowie eine beim vollverglasten Klassenzimmer für Mannheim.

Bei den Wetterdaten des extrem warmen Sommers 2018 kommt es zu deutlich mehr Überschreitungen als bei den TRY2045x. Eine Ausnahme bilden hier die Wetterdaten 2018 von Mannheim, die beim Klassenzimmer und beim Büro mit Standard-Maßnahmenpaket zu

niedrigeren Übertemperaturgradstunden führen als die TRY2045x, was mit den Nutzungsrandbedingungen zusammenzuhängen scheint.

An den WD 2018 wird ersichtlich, dass extrem warme Sommer mit hohen Übertemperaturgradstunden und entsprechend hohen Raumtemperaturen schon heute auftreten können.

K1. Hypothese teilweise widerlegt - Aussage neu formuliert:

Auch in den nächsten Dekaden können passive Maßnahmen in Kombination (Maßnahmenpaket MAX) ausreichen, um behagliche Raumtemperaturen zu ermöglichen. Dies gilt jedoch nicht bei hohen grundflächenbezogenen Fensterflächenanteilen.

Die zweite Hypothese zu den Klimadaten lautet:

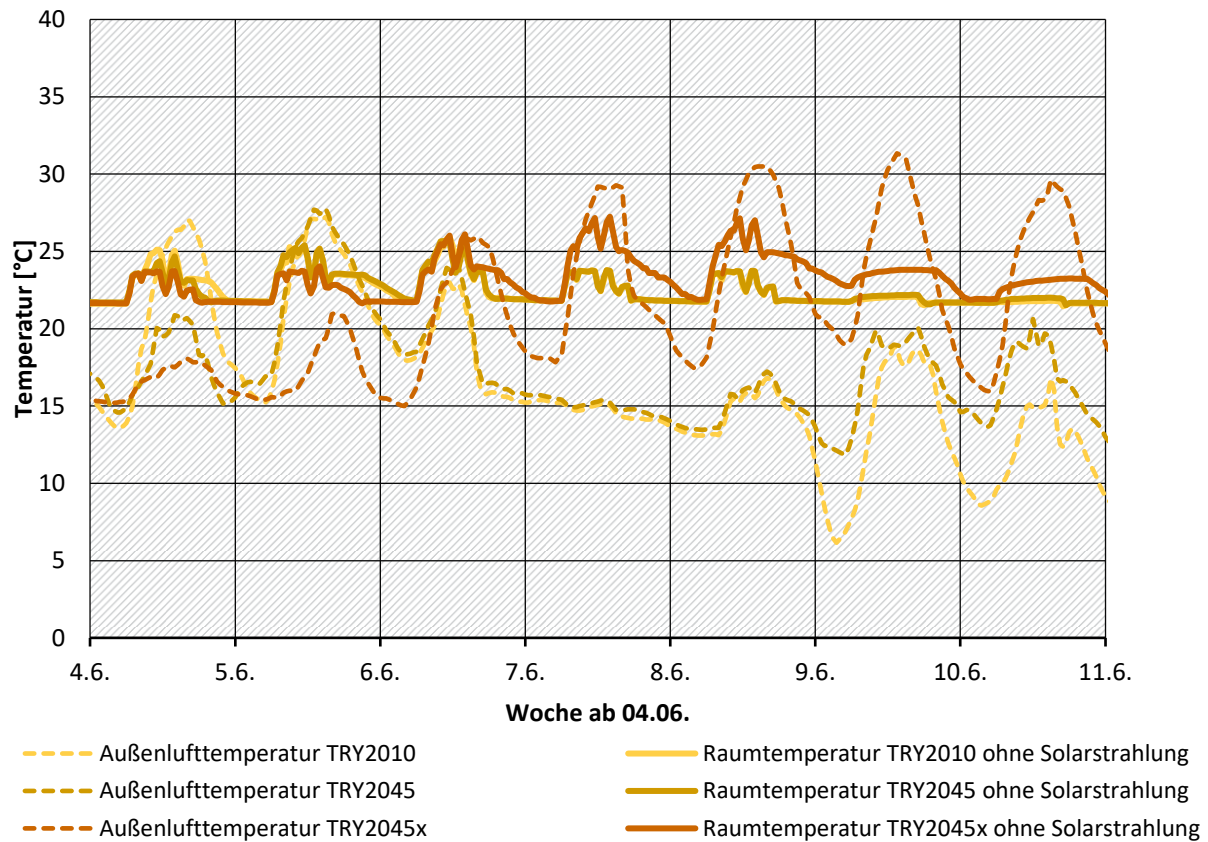
► **K2. Steigende Außenlufttemperaturen führen zu steigenden Raumtemperaturen.**

Dass steigende Außenlufttemperaturen zu steigenden Raumtemperaturen führen, könnte aus den Diagrammen der vorherigen Kapitel abgeleitet werden. Mit den ansteigenden Außenlufttemperaturen vom TRY2010, über das TRY2045 bis zum TRY2045x steigen auch die Übertemperaturgradstunden stark an. Es ist aber nicht eindeutig, da auch die Einstrahlung zu Erwärmung führt. Der direkte Zusammenhang wird daher über zwei zusätzliche Simulationen untersucht, bei denen zwei Musterräume ohne Fenster simuliert werden. In Abbildung 48 ist das Klassenzimmer (Variante MAX-Potsdam) und in Abbildung 49 das Wohnzimmer (Variante MIN-Potsdam) zu sehen. Jeweils wird die Außenlufttemperatur und die resultierende Raumtemperatur im Verlauf einer Woche dargestellt.

Für die Interpretation ist zu beachten, dass die Außenlufttemperaturen einer Woche der verschiedenen TRY nicht direkt miteinander verglichen werden dürfen (!), weil die Verteilung von wärmeren und kälteren Wochen im Jahr bei jedem TRY anders ist. Dennoch lässt sich mit den beiden Grafiken der Zusammenhang zwischen Außenlufttemperatur und Raumtemperatur, der durch Transmission und Luftwechsel entsteht, gut veranschaulichen.

Abbildung 48: Temperaturverlauf Klassenzimmer mit MAX-Maßnahmenpaket in Potsdam (west-orientiert) - ohne Fenster

Um den Einfluss der Solarstrahlung auf die Raumtemperatur auszuklammern, wurde der Musterraum ohne transparente Flächen simuliert.

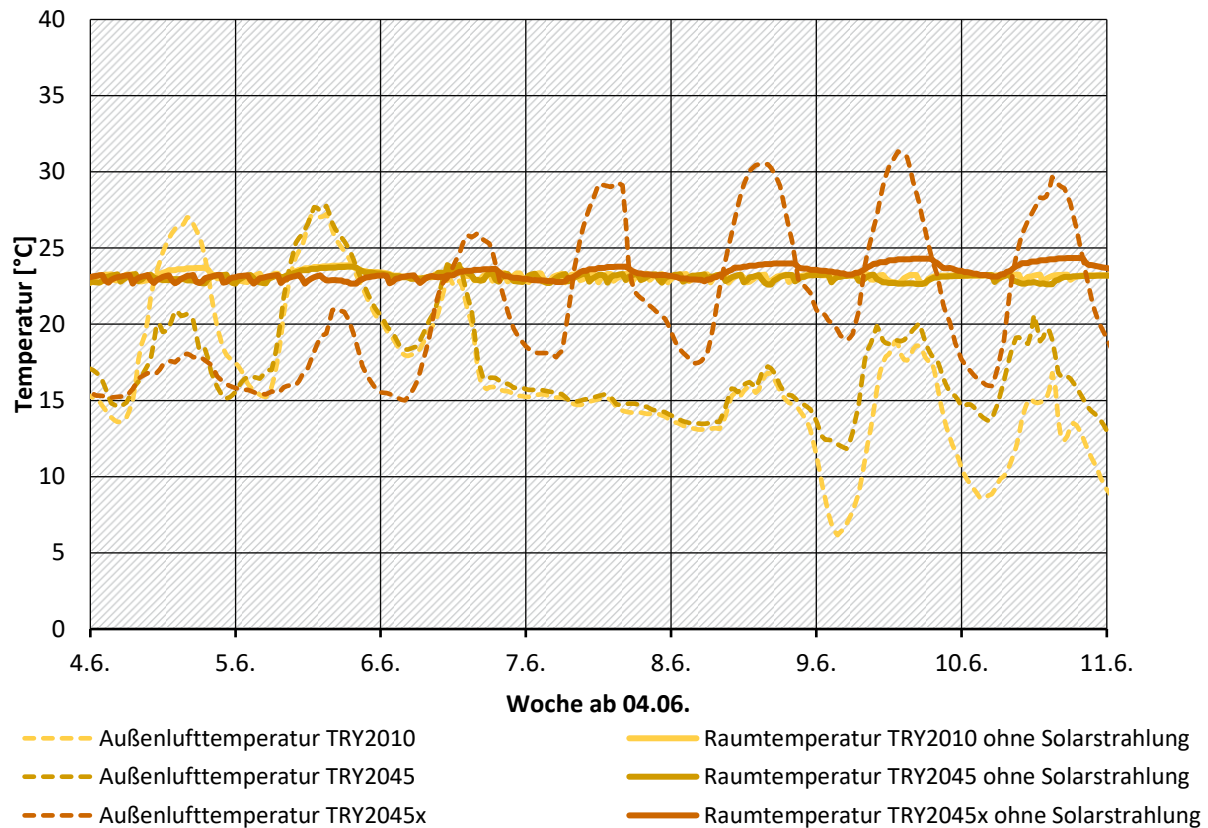


Quelle: eigene Darstellung, IBH

Im Diagramm sind die Außenlufttemperaturen von drei verschiedenen Testreferenzjahren sowie die sich ergebenden Raumtemperaturen dargestellt. In den ersten beiden Tagen der Beispielwoche sind die Außentemperaturen von TRY2010 und TRY2045 sowie die zugehörigen Raumtemperaturen (gelb und ocker) höher als vom TRY2045x (rotbraun). Ab dem 6.6. kehrt sich die Reihenfolge der Außenlufttemperaturen um, ab dem 7.6. auch die der Raumtemperaturen entsprechend. Der Unterschied in der Außenlufttemperatur wird in kleinerer Größenordnung auf die Raumtemperatur übertragen. Hierfür spielen weitere Randbedingungen, wie Luftwechsel, interne Lasten und Speichermassen, eine große Rolle.

Abbildung 49: Temperaturverlauf Wohnzimmer mit MIN-Maßnahmenpaket in Potsdam (westorientiert) - ohne Fenster

Um den Einfluss der Solarstrahlung auf die Raumtemperatur auszuklammern, wurde der Musterraum ohne transparente Flächen simuliert.



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Die hohen Außentemperaturen zeigen im Wohnzimmer in derselben Woche deutlich weniger Auswirkungen auf die Raumtemperaturen, was mit der schweren Bauweise zusammenhängt. Dennoch ist am 5.6. beim TRY2045 und ab dem 8.6. beim TRY2045x der Einfluss der Außenlufttemperatur auf die Raumtemperatur erkennbar.

K2. Hypothese bestätigt - Aussage konkretisiert:

Steigende Außenlufttemperaturen führen zu steigenden Raumtemperaturen. Die Randbedingungen Luftwechsel, interne Lasten und Speichermassen spielen eine entscheidende Rolle, wie stark sie sich auswirken.

5.1.4.2 Maßnahmenpakete

In Kapitel 4.4.2.2 sind die untersuchten Maßnahmenpakete zum sommerlichen Wärmeschutz, nämlich Minimal (MIN) mit wenig baulicher Vorkehrung (wie sie im Bestand vorliegen könnte), Standard (STD) mit normaler, durchschnittlicher baulicher Vorkehrung und Maximum (MAX) mit viel baulicher Vorkehrung beschrieben.

Die erste Hypothese zu den Maßnahmenpaketen lautet:

- **M1. Mit nur wenig Vorkehrung zum sommerlichen Wärmeschutz (MIN-Maßnahmenpaket) wird es zukünftig im Sommer unbehaglich hohe Raumtemperaturen geben.**

Aus Abbildung 37 bis Abbildung 39 kann aufgrund der hohen Zahl an Übertemperaturgradstunden der Varianten mit MIN-Maßnahmenpaket bei Verwendung der Zukunfts-TRY und auch den wenige eingehaltenen Fällen beim MIN-Paket in Abbildung 40 abgeleitet werden, dass bei diesen unbehaglich hohe Raumtemperaturen auftreten. Trotz deutlich niedrigerer ÜTGs bei Verwendung der TRY2010 werden jedoch auch bei diesen die nach DIN4108-2 abgeleiteten zulässigen ÜTGs - bis auf wenige Ausnahmen beim Standort Rostock - überschritten. Es ist auch ersichtlich, dass bei einigen Varianten insbesondere mit hohem Fensterflächenanteil auch das STD-Maßnahmenpaket die ÜTGs nicht ausreichend begrenzen kann.

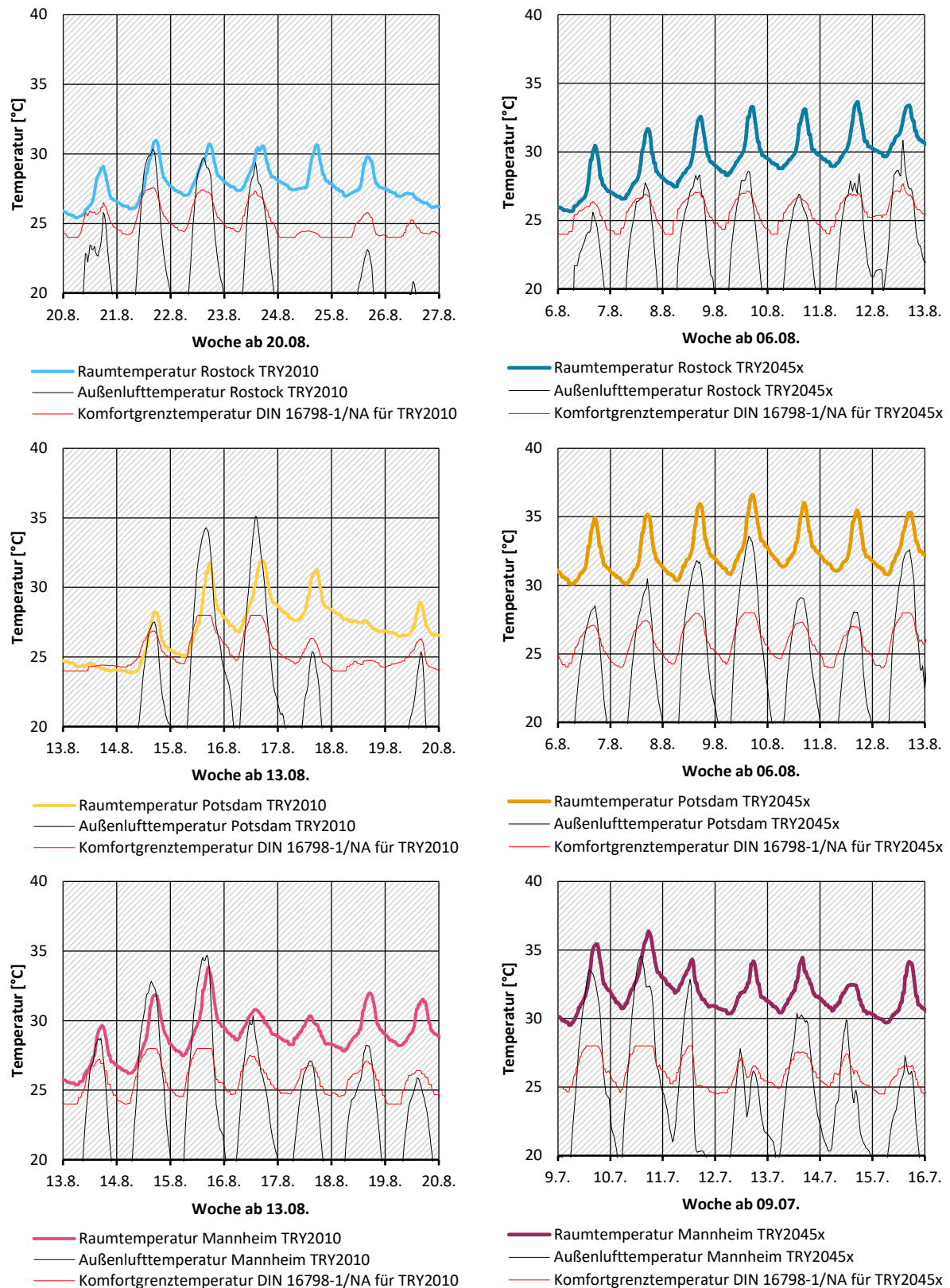
Um die Zusammenhänge zu veranschaulichen, werden in Abbildung 50 für die jeweils wärmste Woche des TRY2010 und des TRY2045x für Rostock, Potsdam und Mannheim die Außenlufttemperatur mit den resultierenden Raumtemperaturen für das Wohnzimmer mit MIN-Maßnahmenpaket dargestellt. Zusätzlich sind die Komfort-Grenztemperaturen nach dem Entwurf des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 eingezeichnet, um einen Anhaltspunkt zu haben, wo die Grenze für behagliche Raumtemperaturen liegt.

In Abbildung 51 sind ergänzend für eben diese wärmsten Wochen die Verläufe für das 2-Personen-Büro mit Lochfassade dargestellt.

Die zukünftigen Raumtemperaturen (TRY45x) beim MIN-Maßnahmenpaket können selbst in Rostock sehr hoch sein - sogar über 30 °C, wie die Auswertung der wärmsten Woche des TRY45x fürs Wohnzimmer und fürs Büro zeigt. Diese liegen jeweils deutlich über der Komfort-grenztemperatur des Nationalen Anhangs (rote Linie) und in vielen Fällen sogar über der Außentemperatur (schwarze Linie). Aber: früher (TRY2010) lag die Raumtemperatur zwar näher an der Komfortgrenztemperatur, wurde da aber auch schon in der wärmsten Woche überschritten. Ein ähnliches Bild ergibt sich für Potsdam und Mannheim, nur sind die Kurven um einige Grad nach oben verschoben. Teilweise erreichen oder überschreiten die Raumtemperaturen sogar 35° C.

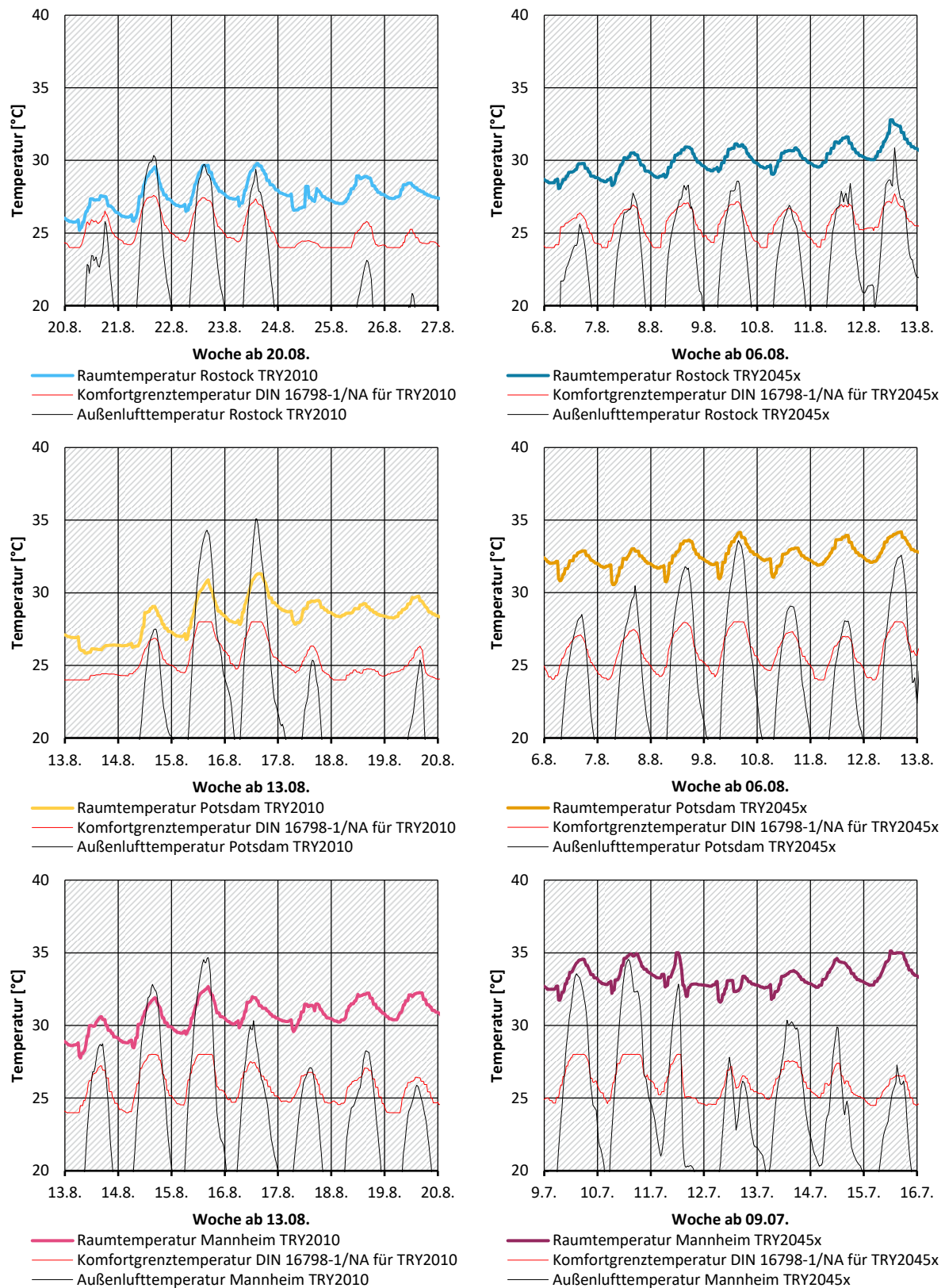
Beim Büro wird die Variante Lochfassade gezeigt, bei Fensterband oder Vollverglasung wären die Raumtemperaturen noch deutlich höher.

Abbildung 50: Raumtemperaturen der wärmsten Woche - früher (links) und zukünftig (rechts) - Wohnzimmer mit MIN-Maßnahmenpaket (westorientiert)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Abbildung 51: Raumtemperaturen der wärmsten Woche - früher (links) und zukünftig (rechts) - Büro Lochfassade mit MIN-Maßnahmenpaket (westorientiert)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Die deutlich unbehaglichen Raumtemperaturen beim MIN-Maßnahmenpaket sind, dargestellt für die jeweils wärmste Woche des TRY2045x, für alle Standorte klar erkennbar.

M1. Hypothese bestätigt:

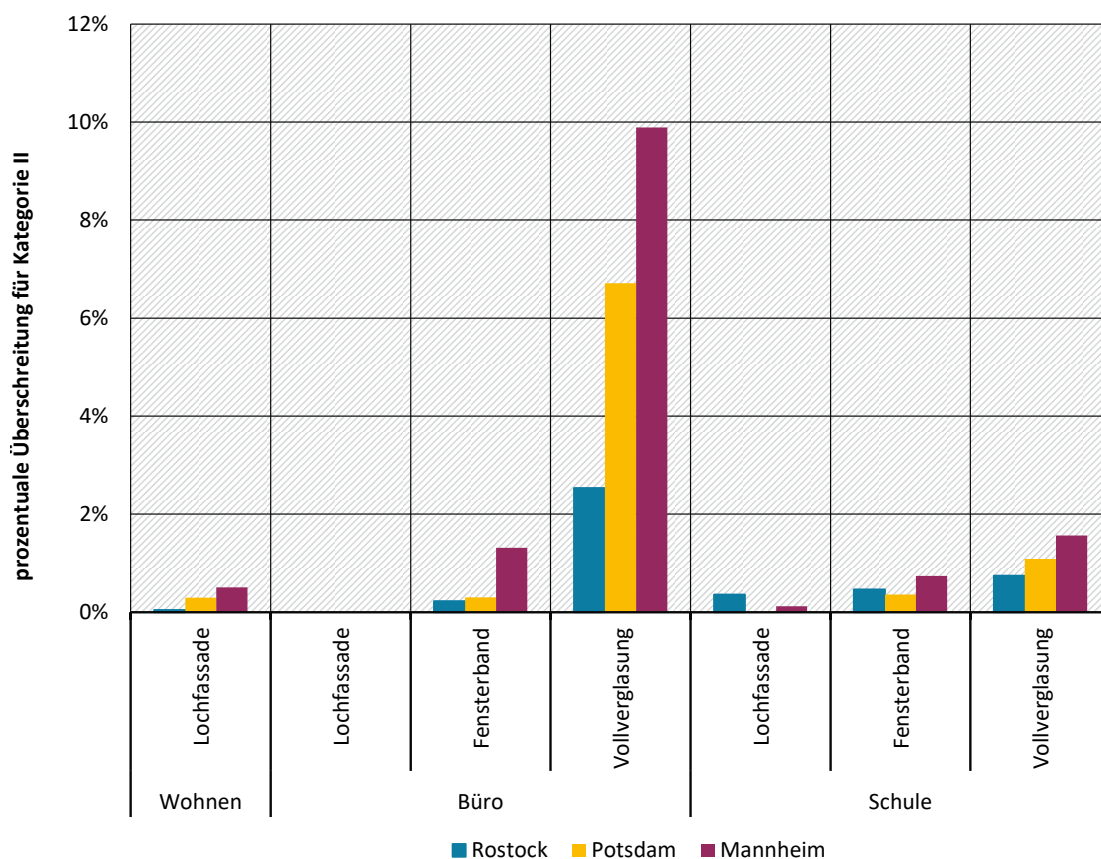
Mit nur wenig Vorkehrung zum sommerlichen Wärmeschutz (MIN-Maßnahmenpaket) wird es zukünftig im Sommer unbehaglich hohe Raumtemperaturen geben.

Die zweite Hypothese zu den Maßnahmenpaketen lautet:

- **M2. Auch bei Einsatz vieler passiver Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz (MAX-Maßnahmenpaket) ist zukünftig mit unbehaglich hohen Raumtemperaturen zu rechnen.**

Um diese Hypothese zu untersuchen, wird in Abbildung 52 die Überschreitungshäufigkeit der Komfort-Kategorie II nach DIN EN 16798-1 im Wohnzimmer, 2-Personen-Büro und Klassenzimmer jeweils mit Westorientierung für die Variante mit MAX-Maßnahmenpaket und TRY2045x gezeigt.

Abbildung 52: Überschreitungshäufigkeit der Kategorie II nach DIN EN 16798-1 für das MAX-Maßnahmenpaket und TRY2045x (westorientiert)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Beim MAX-Maßnahmenpaket gibt es wenig Überschreitung der Komfortgrenze, aber Überschreitungen kommen dennoch bei fast allen Varianten vor. Beim vollverglasten Büroraum ergibt sich eine hohe Überschreitung, die für Potsdam und Mannheim über der zulässigen Abweichung von

5 % liegt. Ausnahme bildet das Büro mit Lochfassade, bei dem es keine Überschreitung gibt und somit die Hypothese nicht bestätigt.

M2. Hypothese teilweise bestätigt und konkretisiert:

Bei Einsatz vieler passiver Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz (MAX-Maßnahmenpaket) können auch zukünftig behagliche Raumtemperaturen erreicht werden. Ob dies gelingt, hängt von den Randbedingungen, insbesondere dem Verglasungsanteil ab.

Die dritte Hypothese zu den Maßnahmenpaketen lautet:

- **M3. Passive Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz können sowohl bei heutigem als auch bei zukünftigem Klima die Überhitzung von Innenräumen stark reduzieren.**

Die Wirksamkeit der jeweiligen (passiven) Maßnahmenpakete ist deutlich an der Reduktion der Übertemperaturgradstunden bei allen TRY erkennbar (s. Abbildung 37 bis Abbildung 39). Erwartungsgemäß ist die deutliche Reduktion von MIN- auf das STD-Maßnahmenpaket, erstaunlich ist die nochmalige deutliche Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes bei Steigerung der Maßnahmen vom STD- auf das MAX-Maßnahmenpaket.

M3. Hypothese bestätigt:

Passive Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz können sowohl bei heutigem als auch bei zukünftigem Klima die Überhitzung von Innenräumen stark reduzieren.

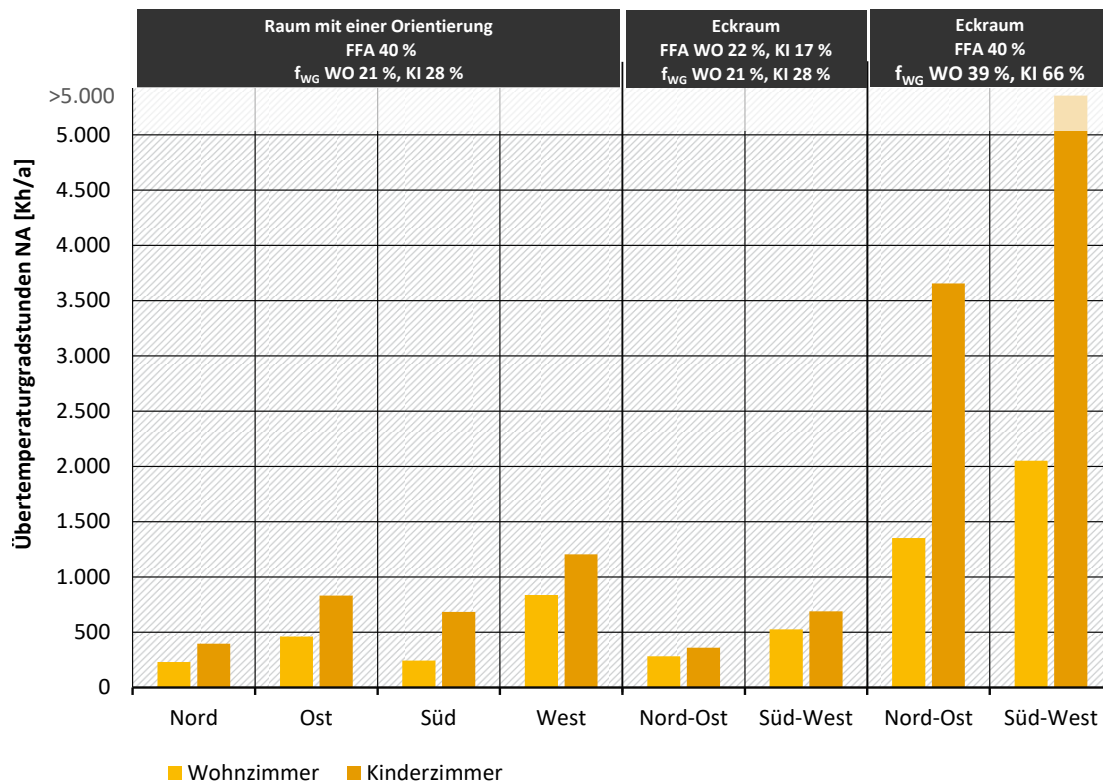
5.1.4.3 Raumbeschaffenheit

Unter Raumbeschaffenheit wird die Geometrie, lichte Raumhöhe, Fensterflächen, Raumorientierung und die Speichermassen zusammengefasst. Untersuchungen zum Einfluss von Speichermassen sind Bestandteil der Detailuntersuchung Kapitel 5.3.3.

Die erste Hypothese zur Raumbeschaffenheit lautet:

- **R1. Bei der Raumbeschaffenheit sind vorwiegend der Anteil und die Orientierung der Fensterflächen relevant – die Geometrie spielt eine untergeordnete Rolle.**

Untersucht werden soll die Hypothese anhand des Vergleichs von Wohn- und Kinderzimmer. In Abbildung 53 sind die ÜTGS in Abhängigkeit der Orientierung für die Klimadaten Potsdam TRY2045 dargestellt. Bei den Modellzimmern wurden für Wohnzimmer (WO) und Kinderzimmer (KI) die gleichen fassadenbezogenen Fensterflächenanteile von 40 % zugrunde gelegt, woraus sich aufgrund der unterschiedlichen Raumtiefen unterschiedliche grundflächenbezogene Fensterflächenanteile für Wohn- und Kinderzimmer ergeben. Bei der Ecksituation wird einmal der Raum mit den gleichen Fenstern wie beim Raum mit nur einer Orientierung – jedoch an zwei Fassaden angeordnet - betrachtet und einmal mit gleichbleibendem fassadenbezogenem Fensterflächenanteil, was aufgrund der hinzukommenden Fassadenfläche die Fensterfläche stark erhöht (vgl. Kapitel 4.3).

Abbildung 53: Übertemperaturgradstunden Wohn- und Kinderzimmer für Potsdam, STD-Maßnahmenpaket und TRY2045

Quelle: eigene Darstellung, IBH

An den Räumen mit einer Orientierung, die für Nord-, Ost-, Süd- und West-Ausrichtung dargestellt sind, ist der Einfluss der Orientierung erkennbar, wobei die Nordausrichtung die geringsten, die Westausrichtung die höchsten ÜTGS aufweist.

Der Vergleich der beiden Eckräume mit jeweils gleicher Orientierung zeigt einen deutlichen Anstieg der ÜTGS bei größerer Fensterfläche. Es ist davon auszugehen, dass die durchweg höheren Übertemperaturgradstunden trotz gleichem fassadenbezogenen Fensteranteil des kleineren Kinderzimmers aufgrund des höheren grundflächenbezogenen Fensterflächenanteils entstehen. Bei gleichbleibendem fassadenbezogenen Fensterflächenanteil wirkt sich somit die Raumgeometrie mit Veränderung der Raumtiefe indirekt über die damit verbundene Veränderung des grundflächenbezogenen Fensterflächenanteils auf das Innenraumklima aus. Dies ist auch bei den Eckräumen von Wohn- und Kinderzimmer so, bei denen das Wohnzimmer einen minimal höheren fassadenbezogenen (FFA WO 22%, KI 17%), jedoch geringeren grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil aufweist als das entsprechende Kinderzimmer mit gleichen Orientierungen (f_{WG} WO 21%, KI 28%). Auch hier deuten die höheren ÜTGS der Kinderzimmer auf die Relevanz des grundflächenbezogenen Fensterflächenanteils hin.

Auch die statistischen Auswertungen von Fassadentyp und Orientierung in Abbildung 34 sowie die Auswertung nach grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil in Abbildung 38 machen diese Zusammenhänge ersichtlich.

Der grundflächen-, nicht der fassadenbezogene, Fensterflächenanteil hat demnach großen Einfluss, aber auch die Orientierung ist wesentlich.

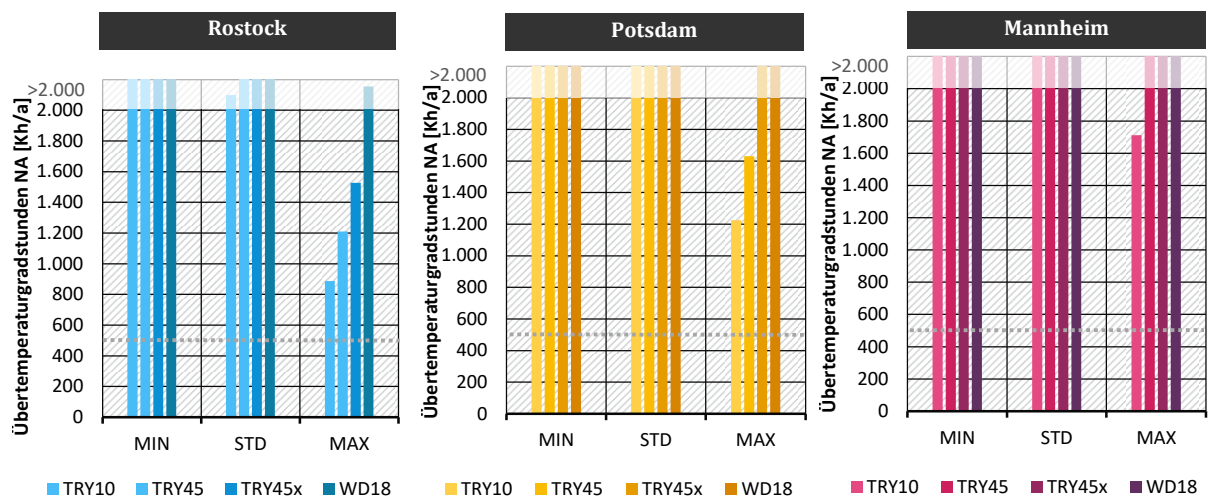
R1. Hypothese konnte nicht überprüft werden, dafür kann konkretisiert werden:

Bei der Raumbeschaffenheit sind der grundflächenbezogene Fensterflächenanteil und die Fensterorientierung relevant.

- **R2. Bei sehr hohem Verglasungsanteil werden passive Maßnahmen in Zukunft nicht mehr ausreichen, um behagliche Raumtemperaturen zu erreichen.**

Wie in Abbildung 38 für das Büro mit Vollverglasung (f_{WG} 54 %) bei den TRY2045x zu sehen ist, reicht das MAX-Maßnahmenpaket für behagliche Raumtemperaturen in Potsdam und Mannheim nicht mehr und in Rostock nur knapp aus. Noch dramatischer wird die Situation im vollverglaste Eckbüro mit einem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil von 104 % bei allen Standorten (s. Abbildung 54). Hier werden bei den zukünftigen Klimadaten die 517 Kh/a um eine Vielfaches überschritten.

Abbildung 54: Übertemperaturgradstunden 3-Personen-Eckbüro mit Vollverglasung (südwestorientiert)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Bei der Schule (s. Abbildung 39) schaut die Situation anders aus: durch das große Klassenzimmer und dem trotz Vollverglasung nicht allzu hohen grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil (f_{WG} 38 %) liegen die ÜTGS beim MAX-Maßnahmenpaket – mit einer Ausnahme für Mannheim TRY2045x - unter der eingezeichneten Anforderungswert-Linie. Ein weiterer Grund, warum der Klassenraum besser als das Büro abschneidet, sind die Sommerferien in der heißesten Zeit, die außerhalb der Nutzungszeit liegend nicht einbezogen werden.

R2. Hypothese teilweise widerlegt, daher neu formuliert:

Fast immer werden bei sehr hohem Verglasungsanteil passive Maßnahmen in Zukunft nicht mehr ausreichen, um behagliche Raumtemperaturen zu erreichen. Es kann aber Fälle mit tiefen Räumen (und entsprechend niedrigem grundflächenbezogener Fensterflächenanteil) und günstigen Nutzungsrandbedingungen geben, wo dies weiterhin möglich ist.

Weitere Zusammenhänge zu Speichermassen, Nutzungsrandbedingungen und Wechselwirkungen werden in der Detailuntersuchung (s. Kapitel 5.3) untersucht.

5.2 Exkurs – Nutzungseinfluss

Immer wieder wird auf den hohen Einfluss des Nutzungsverhaltens auf die sich im Sommer einstellenden Raumtemperaturen hingewiesen. Es wird vermutet, dass das Nutzungsverhalten einen weitaus größeren Einfluss haben könnte als die ausgewählten Varianten der Basis- und Detailuntersuchung. Um diesen Einfluss besser einschätzen zu können, werden in diesem Exkurs die Auswirkungen unterschiedlichen Nutzungsverhaltens über thermische Simulationen analysiert.

5.2.1 Randbedingungen

Der Nutzungseinfluss ist in Wohngebäuden wohl am bedeutendsten. Im Vergleich zu diesen ist in Bürogebäuden und Schulen der Nutzungseinfluss durch das Nutzungsprofil und gegebenenfalls durch den Einsatz von RLT-Anlagen und automatisiertem Sonnenschutz in Verbindung mit Gebäudeleitetchnik eingeschränkt. Untersucht werden soll daher der Einfluss des Lüftungsverhaltens, der Bedienung des außenliegenden Sonnenschutzes und der Höhe von internen Lasten in Wohngebäuden.

Auf Basis des in Kapitel 4.3 definierten Wohnzimmers mit 35 m² Wohnfläche und einer Lochfassade mit einem zweiflügligen Fenster (4 m²) und einer Fenstertür (3,5 m²), entsprechend einem fassaden-bezogenen Fensterflächenanteil von 40 % bzw. einem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil von 21 %, werden thermisch-dynamische Simulationen durchgeführt.

Folgende Randbedingungen werden für die Untersuchung festgelegt:

- ▶ West-Ausrichtung
- ▶ Klimadaten TRY2045, Wetterdaten des extrem warmen Sommerhalbjahrs 2018 jeweils für Rostock, Potsdam und Mannheim
- ▶ Energiestandard nach GEG, mittlere Bauweise
- ▶ Vereinfachung: Ansatz der Anwesenheit Wochenende wie Werktag

Ausgewertet werden die Übertemperaturgradstunden in diesem Exkurs für das Sommerhalbjahr 1. Mai - 30. September. Die Übertemperaturgradstunden werden analog den vorangegangenen Kapiteln nach dem Komfortband des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 ausgewertet.

5.2.2 Variantenbildung

Für jeden Untersuchungsparameter wird derselbe Basisfall zugrunde gelegt, wie er in Kapitel 4.5 Simulationsrandbedingungen beschrieben ist. Diese Vorgehensweise wird gewählt, um einen Vergleich zu ermöglichen und um die für die Hauptuntersuchung gewählten Randbedingungen einschätzen zu können. Abweichend zur Hauptuntersuchung werden die Tag- und Nachtlüftungsvarianten nicht mit konstanten Luftwechseln gerechnet, sondern mit den sich durch Druck- und Temperaturdifferenzen einstellenden Luftwechsel bei entsprechender Öffnung der Fenster.

5.2.2.1 Taglüftung

Als Taglüftung wird nachfolgend das Lüftungsverhalten zwischen 6 und 23 Uhr verstanden.

Basisfall: Betrieb einer Abluftanlage mit konstantem Luftwechsel von 0,14 h⁻¹ und zusätzlicher freier Lüftung mit 3-fachem Luftwechsel, sobald die operative Raumtemperatur über 23 °C ansteigt und gleichzeitig über der Außenlufttemperatur liegt.

Folgende Varianten werden bei der Taglüftung untersucht:

Typ Familie: Tagsüber anwesend

- (T1) „Viel-Lüfter“ (Frischluftfanatiker): Fenstertür offen, wenn die Außenlufttemperatur über 18 °C steigt.
- (T2) Sinnvolles „temperaturabhängiges Lüften“: Fenstertür ist geöffnet, sobald die operative Raumtemperatur über 23 °C ansteigt und gleichzeitig über der Außenlufttemperatur liegt.
- (T3) „Kipp-Lüfter“: Fenstertür gekippt (immer offen, unabhängig von Raumtemperatur).

Typ „Berufstätig“: Tagsüber zwischen 8 und 18 Uhr abwesend

- (T4) „Wenig-Lüfter“: Während der Abwesenheit (8-18 Uhr) sind die Fenster geschlossen. Bei Anwesenheit wird die Fenstertür alle 2 Stunden für 10 min geöffnet.

Bei allen Taglüftungsvarianten beginnt um 23 Uhr die Basisfall-Nachtlüftung (s.u.).

5.2.2.2 Nachtlüftung

Als Nachtlüftung wird nachfolgend das Lüftungsverhalten zwischen 23 und 6 Uhr verstanden.

Basisfall: Sobald die operative Raumtemperatur über 23 °C ansteigt, erfolgt eine Nachtlüftung mit 2-fachem Luftwechsel. Ansonsten sorgt eine Abluftanlage für einen konstanten Luftwechsel von 0,14 h⁻¹ (=Luftvolumenstrom zum Feuchteschutz).

Folgende Varianten werden bei der Nachtlüftung untersucht:

- (N1) „Viel-Lüfter“ (Frischluftfanatiker): Fenstertür offen (immer offen, unabhängig von Raumtemperatur)
- (N2) „Kipp-Lüfter“: Fenstertür gekippt (immer gekippt, unabhängig von Raumtemperatur)
- (N3) „Wenig-Lüfter“: um 23 Uhr einmaliges 10-Minuten-Stoßlüften mit offener Fenstertür (ansonsten Abluftbetrieb mit konstantem Luftwechsel von 0,14 h⁻¹).

5.2.2.3 Sonnenschutz

Es wird von einem außenliegenden Sonnenschutz in Form von Rollläden ausgegangen. Als Randbedingung wird ferner festgelegt, dass die Rollläden ganz offen (0 % geschlossen), bei Abwesenheit ganz geschlossen (100 % geschlossen) oder bei Anwesenheit drei viertel geschlossen (75 % geschlossen) sein können.

Basisfall: Rollläden wird strahlungsabhängig zu 3/4 geschlossen, wenn die Einstrahlung auf die Fenster größer oder gleich 300 W/m² beträgt. Bei einer Einstrahlung kleiner 300 W/m² ist der Rollläden hochgefahren.

Folgende Varianten werden untersucht:

Typ Familie: Tagsüber anwesend

- (S1) „SoSchu+ (anwesend)“ Häufige Benutzung des Sonnenschutzes: bei über 22 °C operative Raumtemperatur werden die Rollläden zu 75 % geschlossen.

- (S2) „SoSchu- (anwesend)“ Seltene Benutzung des Sonnenschutzes: die Rollläden werden bei direkter Sonneneinstrahlung geschlossen, wenn die operative Raumtemperatur gleichzeitig über 26 °C steigt.

Typ „Berufstätig“: Tagsüber zwischen 8 und 18 Uhr abwesend

- (S3) „SoSchu++ (abwesend)“ Geschlossener Sonnenschutz während Abwesenheit: Rollläden bei Abwesenheit zu 100 % geschlossen, danach zu 75 % geschlossen.
- (S4) „SoSchu-- (abwesend)“ Offener Sonnenschutz während Abwesenheit: Rollläden immer offen bei An- und Abwesenheit.

5.2.2.4 Interne Lasten

Der Basisfall wird entsprechend der DIN 4108-2, Kapitel 8.4.2 für Wohngebäude mit konstant 100 Wh/m²d (= 4,2 W/m²) festgelegt.

Folgende Varianten werden untersucht:

Tagsüber anwesend

- (I1) „Hohe Lasten“ (Homeoffice, Computerspiele, Kochlast mittags, Wasch- und Spülmaschine etc.)
Für diese Variante werden interne Lasten von 200 Wh/m²d, entsprechend 8,3 W/m² konstant über die 24 h angesetzt. (Dieser Wert entspräche im Mittel z.B. einer 100 m² Wohnung, die von 5 Personen (Ø 70 W; 18 h/d anwesend) bewohnt wird, und einen jährlichen Stromverbrauch von 5.000 kWh aufweist)

Tagsüber abwesend

- (I2) „Geringe Lasten“ (abends mäßig Unterhaltungselektronik; energieeffiziente Geräte)
Für diese Variante werden interne Lasten von 50 Wh/m²d, entsprechend 2,1 W/m² konstant über die 24 h angesetzt. (Dieser Wert entspräche z.B. einer 100 m² Wohnung, die von 2 Personen (Ø 85 W; 12 h/d anwesend) bewohnt wird, und einen jährlichen Stromverbrauch von 1.100 kWh aufweist).

5.2.3 Ergebnisse

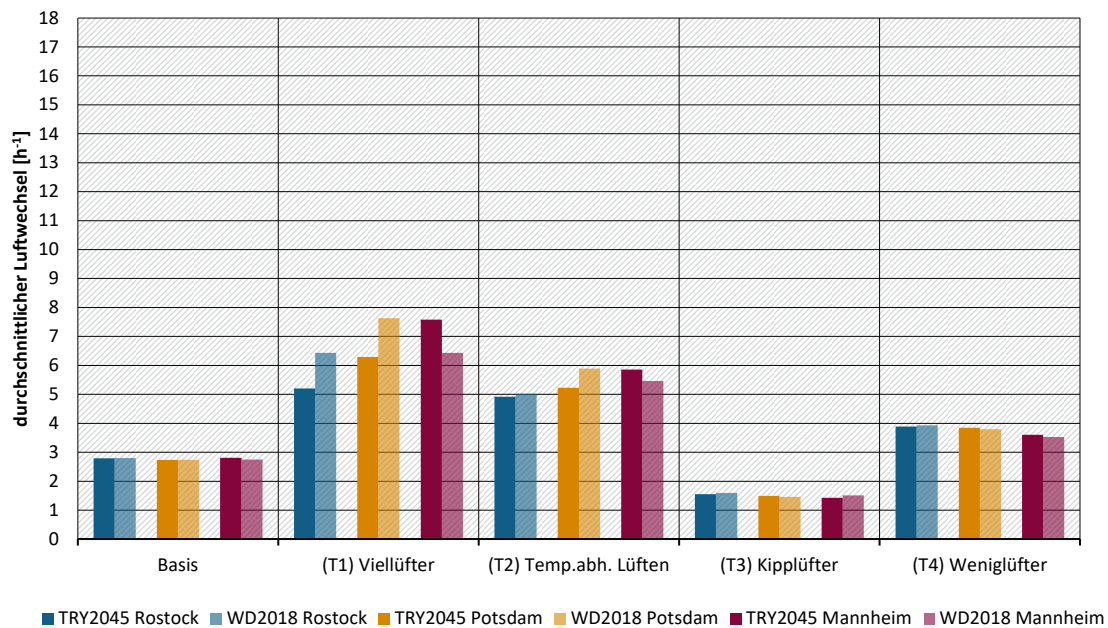
In einem ersten Schritt sollen die sich einstellenden Luftwechsel für die Lüftungsvarianten ausgewertet werden. Darauf aufbauend werden die sich ergebenden Übertemperaturgradstunden für alle Nutzungsverhalten-Varianten miteinander und mit dem Basisfall verglichen.

Die Auswirkungen des Nutzungsverhaltens auf den Luftwechsel und auf die Übertemperaturgradstunden werden für den Zeitraum Sommerhalbjahr (1. Mai bis 30. September) für die festgelegten Varianten ausgewertet.

5.2.3.1 Taglüftung

5.2.3.1.1 Auswirkungen auf den Luftwechsel

Nachfolgend ist der sich ergebende durchschnittliche Luftwechsel für die Taglüftung-Varianten dargestellt, wobei nur der Luftwechsel während der Taglüftung (zwischen 6 und 23 Uhr) in die Auswertung einfließt.

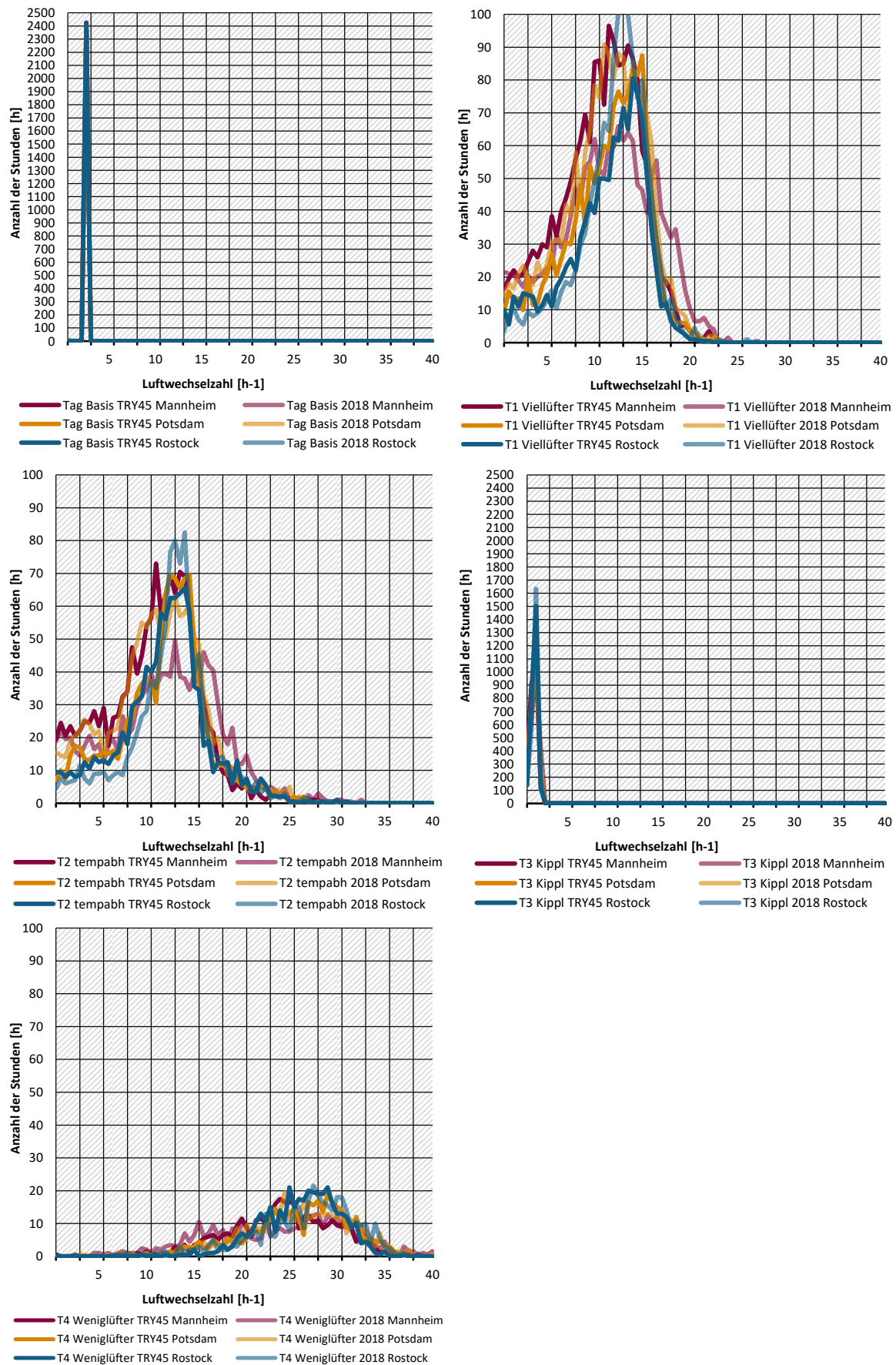
Abbildung 55: Durchschnittlicher Tag-Luftwechsel

Quelle: eigene Darstellung, IBH

Der durchschnittliche Luftwechsel liegt bei der Basisvariante bei $2,8 \text{ h}^{-1}$, wobei die Klimadaten kaum Einfluss zeigen. Bei (T1) „Viel-Lüfter“ liegt der durchschnittliche Luftwechsel gemittelt bei $6,7 \text{ h}^{-1}$ mit durchschnittlichen Werten je nach Klimadatengrundlage zwischen $5,2$ und $7,6 \text{ h}^{-1}$. Ein etwas geringerer, aber dennoch hoher durchschnittlicher Luftwechsel stellt sich bei der Variante (T2) „Sinnvolles temperaturabhängiges Lüften“ über die Klimadaten gemittelt mit $5,4 \text{ h}^{-1}$ ein. Durch das Stoßlüften morgens und abends beim (T4) „Wenig-Lüfter“ ist der durchschnittliche Luftwechsel mit gemittelt $3,8 \text{ h}^{-1}$ deutlich höher als beim (T3) „Kipp-Lüfter“ mit $1,5 \text{ h}^{-1}$.

In Abbildung 56 wird der Luftwechsel noch genauer analysiert. Zunächst wird die Häufigkeitsverteilung der sich einstellenden Luftwechsel analysiert. Bei der Skala für die Häufigkeitsverteilung (Anzahl der Stunden) ist zu beachten, dass diese je nach Ergebnis in zwei unterschiedlichen Größenordnungen dargestellt wird, nämlich mit maximal 100 h oder mit maximal 2.500 h.

Abbildung 56: Häufigkeitsverteilung Tag-Luftwechsel



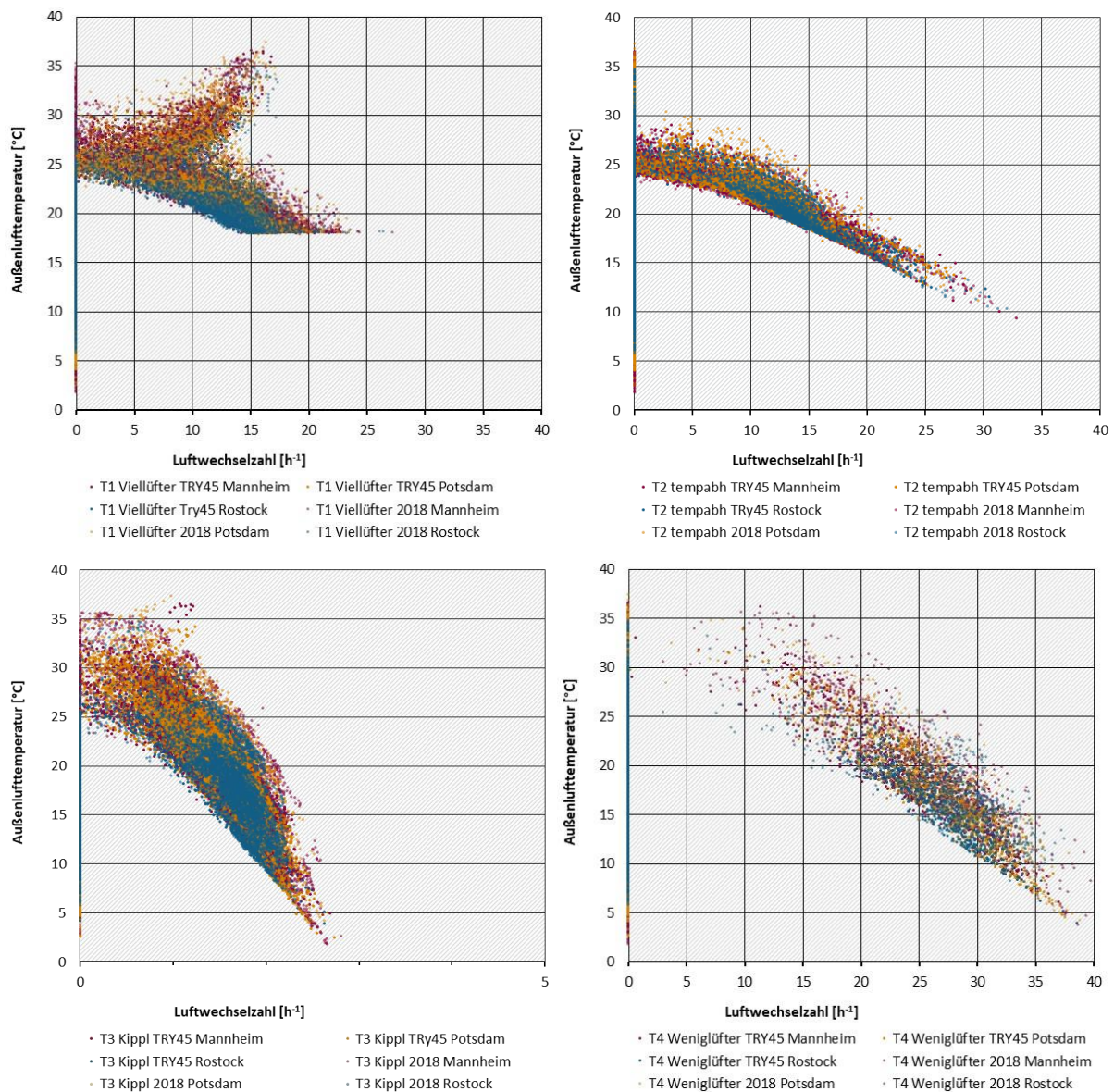
Quelle: eigene Darstellung, IBH

Vergleicht man die Varianten T3 und T4 wird schnell erkennbar, warum der gemittelte Luftwechsel beim T4 höher liegt: die Luftwechselraten liegen beim Lüften mit 15 bis 35 h⁻¹ am höchsten. Durch das wenige Lüften sind die Temperaturunterschiede zwischen Raum- und Außenlufttemperatur deutlich größer, so dass sich die hohen Luftwechsel - allerdings bei geringer Häufigkeit - ergeben.

Die Vereinfachung beim Basisfall mit einem angenommenen 3-fachem Luftwechsel, sobald die operative Raumtemperatur über 23 °C steigt, führt zu dem Peak bei der Luftwechselzahl 3 h⁻¹. Ebenso ergeben sich bei der Variante (T3) „Kipp-Lüfter“ durch die niedrigen Luftwechsel ähnliche Kurvenverläufe für die variierten Klimadaten. Hierbei sind die Luftwechselraten für den Standort Rostock am höchsten. Bei allen anderen Taglüftungsvarianten lassen sich die Einflüsse der Klimadaten deutlich erkennen.

Anschließend wird noch der Zusammenhang zwischen Luftwechsel und Außentemperatur grafisch dargestellt (s. Abbildung 57).

Abbildung 57: Luftwechsel und Außentemperatur beim Tag-Luftwechsel



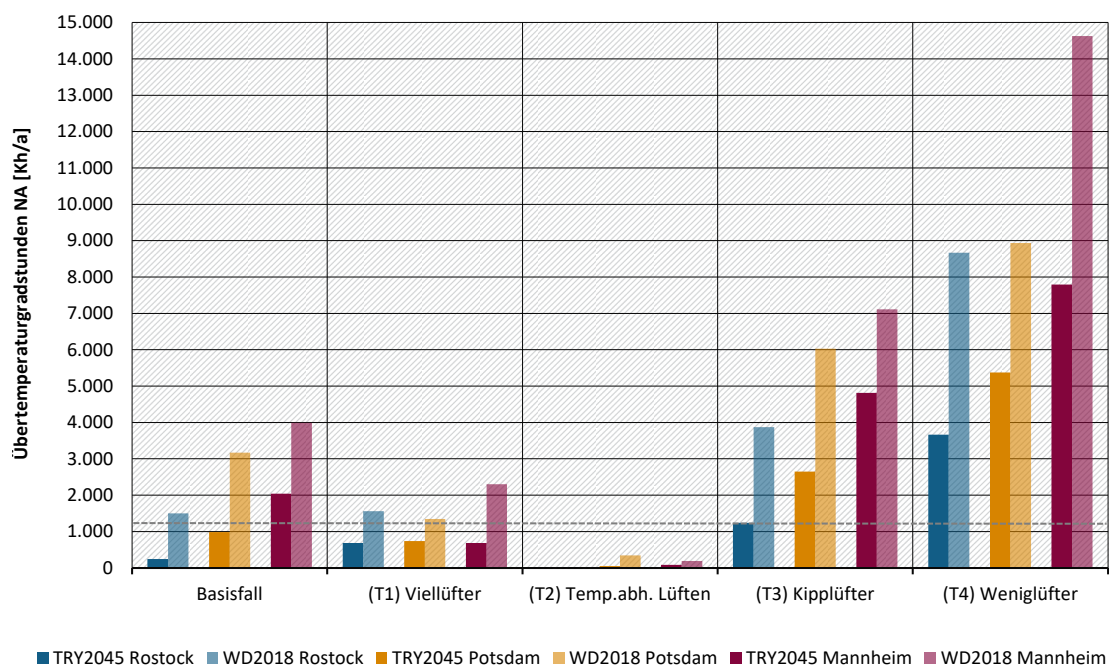
Quelle: eigene Darstellung, IBH

Augenfällig ist beim T1 „Viel-Lüfter“, dass das Fenster geöffnet wird, wenn die Temperatur über 18 °C steigt. Auch ist zu erkennen, dass der Luftwechsel ansteigt, wenn die Außentemperatur von der Raumtemperatur abweicht, und zwar in beide Richtungen, egal ob einige Grad wärmer oder kälter. Bei den anderen Varianten zeigen die Punktwolken einen deutlichen Zusammenhang zwischen steigendem Luftwechsel bei sinkender Außentemperatur. Dies ist auch bei der Kipplüftungsvariante T3 mit deutlich geringeren Luftwechselzahlen der Fall (Änderung der Luftwechsel-Achsenkala beachten).

5.2.3.1.2 Auswirkungen auf die Übertemperaturgradstunden

In Abbildung 58 sind die Ergebnisse der Auswertung der Übertemperaturgradstunden für die Taglüftungsvarianten grafisch dargestellt. Zur Orientierung ist der Wohngebäude-Anforderungswert von 1.226 kh/a (vgl. Tabelle 16) als gestrichelte Linie eingezeichnet.

Abbildung 58: Übertemperaturgradstunden der Taglüftungsvarianten



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Erkennbar ist, dass die Klimadaten, aber auch das Taglüftungsverhalten für die Übertemperaturgradstunden bedeutend sind. Am besten schneidet die Variante T2 mit sinnvollem temperaturabhängigen Lüften ab. Obwohl der Viellüfter einen höheren Luftwechsel erreicht, bringt dieser dadurch auch zu warme Außenluft ein, was sich im Vergleich zu T2 negativ auswirkt. Was bei der Auswertung der Übertemperaturgradstunden nicht eingeht, ist allerdings der warme Luftzug (Luftgeschwindigkeit), der für das Behaglichkeitsempfinden relevant ist und in eine Komfortbewertung (vgl. Kapitel 5.4.2.1) positiv einfließen würde.

Obwohl der durchschnittliche Luftwechsel bei T4 höher liegt, ergeben sich deutlich höhere Übertemperaturgradstunden als für T3. Ursache ist in den Speichermassen zu sehen, die beim Weniglüfter T4 aufgrund der kurzen Lüftungsdauer nicht thermisch entladen werden können.

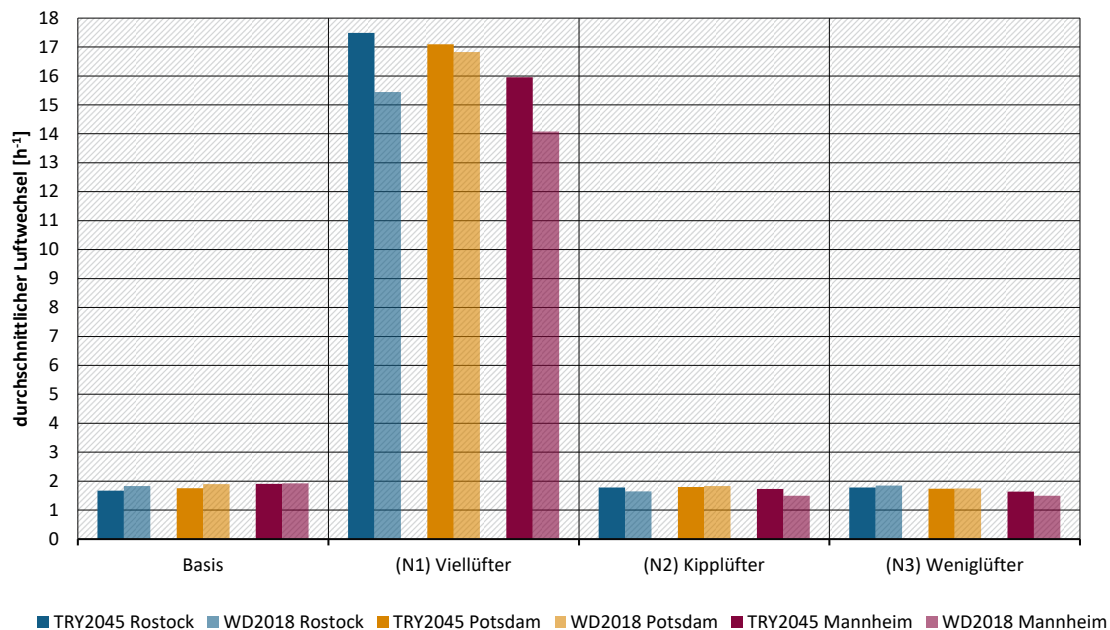
5.2.3.2 Nachtlüftung

Zunächst werden wiederum die Einflüsse des Nutzungsverhaltens auf den sich einstellenden Luftwechsel und anschließend die Übertemperaturgradstunden für die definierten Varianten ausgewertet. Hierbei wird nur der Nachtlüfungszeitraum zwischen 23 und 6 Uhr betrachtet.

5.2.3.2.1 Auswirkungen auf den Luftwechsel

In Abbildung 59 wird der berechnete durchschnittliche nächtliche Luftwechsel dargestellt.

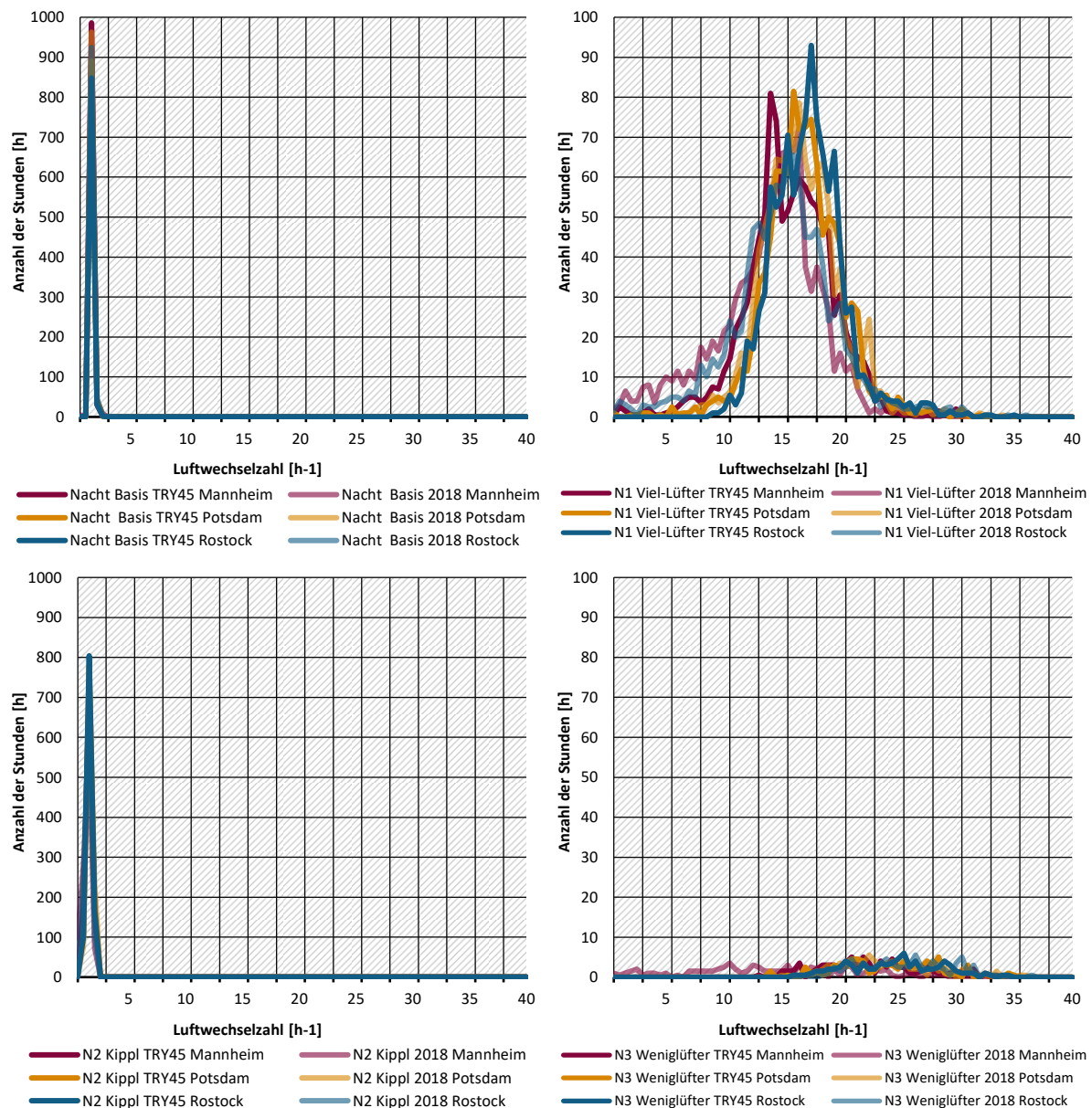
Abbildung 59: Durchschnittlicher Nacht-Luftwechsel



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Es zeigt sich, dass der Luftwechsel für den Basisfall und die Varianten (N2) „Kipp-Lüfter“ und (N3) „Wenig-Lüfter“ sehr ähnlich ist: über die Klimavarianten gemittelt ergeben sich durchschnittliche Luftwechsel von $1,8 \text{ h}^{-1}$ (Basis), für N2 von $1,7 \text{ h}^{-1}$ bzw. für N3 von $1,6 \text{ h}^{-1}$. Beim (N1) „Viel-Lüfter“ hingegen ergibt sich gemittelt ein sehr hoher Luftwechsel von $16,2 \text{ h}^{-1}$. Aufgrund der niedrigeren nächtlichen Außenlufttemperaturen liegt dieser mehr als doppelt so hoch wie bei der entsprechenden Taglüftungsvariante. Auch ist der Einfluss der unterschiedlichen Klimadaten bei der Variante N1 mit einem durchschnittlichen Luftwechsel von $17,5 \text{ h}^{-1}$ (TRY2045 Rostock) und $14,1 \text{ h}^{-1}$ (WD2018 Mannheim) bemerkenswert.

In den Diagrammen der Abbildung 60 wird wiederum die Häufigkeitsverteilung der Luftwechselzahlen dargestellt (Achtung: die Skala der Anzahl der Stunden ist mit maximal 100 bzw. 1.000 unterschiedlich).

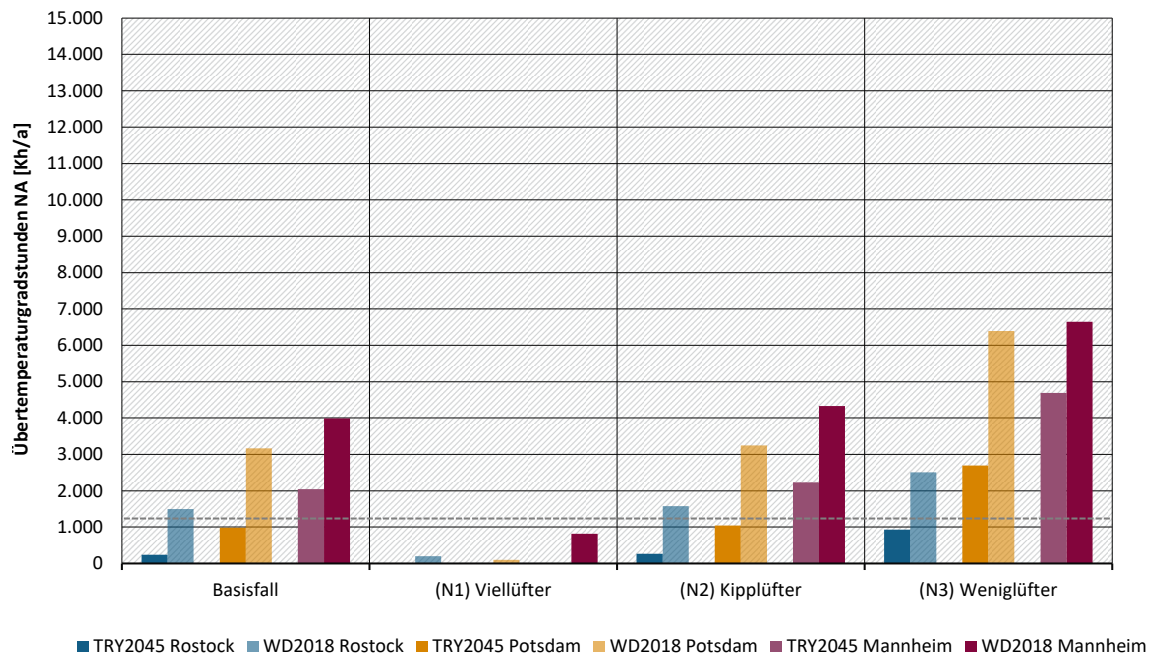
Abbildung 60: Häufigkeitsverteilung Nacht-Luftwechsel

Quelle: eigene Darstellung, IBH

Während bei den Varianten mit konstanten bzw. niedrigen Luftwechseln der Einfluss der Klimadaten weniger gut zu erkennen ist, ist dieser bei der Variante N1 „Viel-Lüfter“ augenscheinlich.

5.2.3.2.2 Auswirkungen auf die Übertemperaturgradstunden

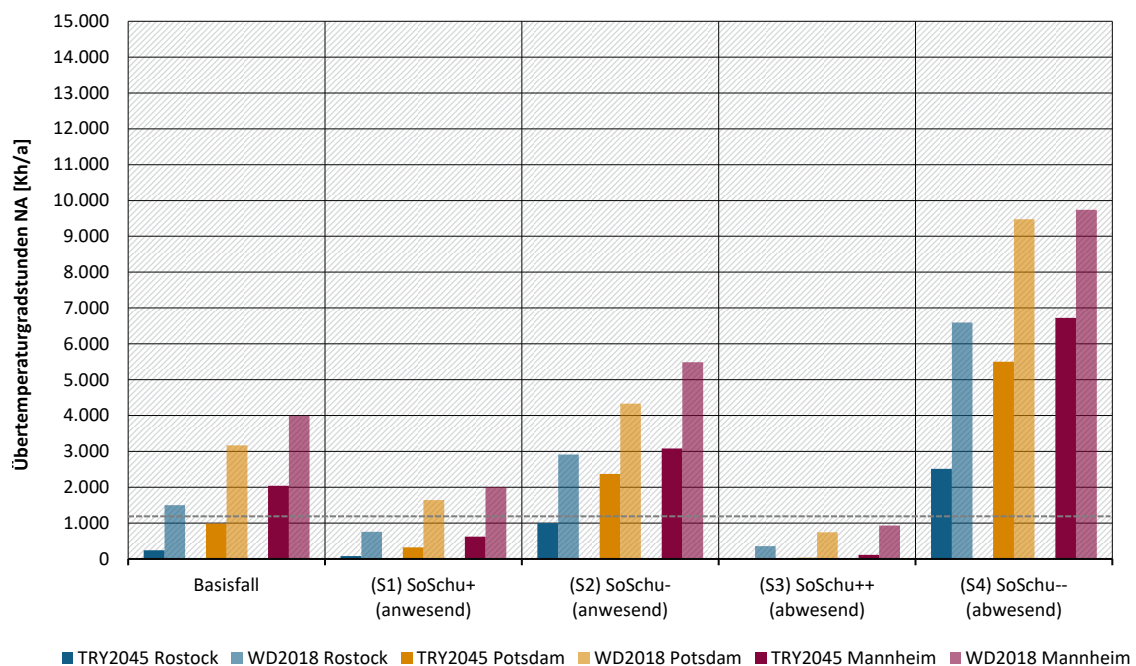
Wie sich die unterschiedlichen Luftwechselzahlen je nach Variante auf die Übertemperaturgradstunden auswirken, lässt sich Abbildung 61 entnehmen. Bei der Variante N2 Kipplüfter ergeben sich Übertemperaturgradstunden in ähnlicher Größenordnung wie beim Basisfall, wohingegen sich diese bei einer Nachtlüftung mit geöffneter Fenstertür (N1) deutlich absenken lassen. Die höchsten Werte ergeben sich für den Fall mit nachts geschlossenen Fenstern.

Abbildung 61: Übertemperaturgradstunden der Nachtlüftungsvarianten

Quelle: eigene Darstellung, IBH

5.2.3.3 Sonnenschutz

Die Auswertung der Übertemperaturgradstunden für die Sonnenschutz-Varianten sind Abbildung 62 zu entnehmen. Verändert wurde nur der Sonnenschutz und nicht gleichzeitig die Auswirkung von An- bzw. Abwesenheit auf die internen Lasten. Wird der Sonnenschutz wenig (S4) oder selten (S2) benutzt, hat dies sehr hohen Einfluss auf den Anstieg der Übertemperaturgradstunden. Durch sinnvolle Bedienung wie bei den Varianten S1 und S3 lassen sich die Wärmeeinträge im Vergleich zum Basisfall nochmal deutlich absenken.

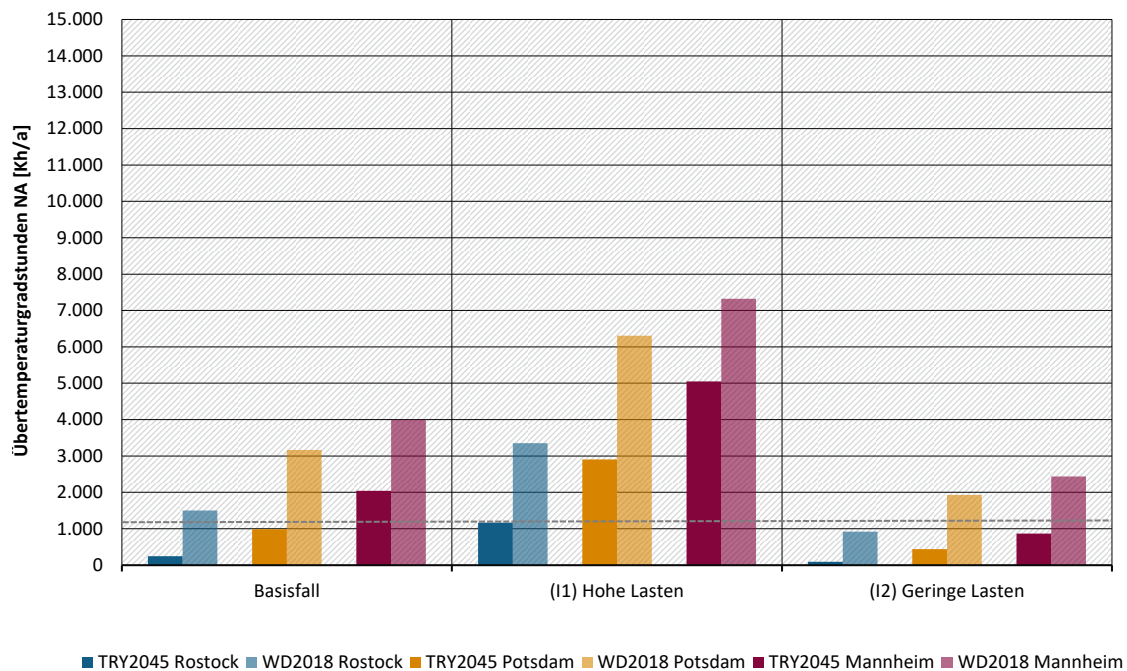
Abbildung 62: Übertemperaturgradstunden der Sonnenschutzvarianten

Quelle: eigene Darstellung, IBH

5.2.3.4 Interne Lasten

Abbildung 63 sind die Ergebnisse der thermischen Simulationen für die Varianten der internen Lasten dargestellt. Wie zu vermuten war, haben auch die internen Lasten wichtigen Einfluss auf die Übertemperaturgradstunden, wobei sich die Halbierung der internen Lasten (I2) im Vergleich zum Basisfall weniger stark auswirkt als bei einer Verdoppelung (I1).

Abbildung 63: Übertemperaturgradstunden der Internen-Last-Varianten



Quelle: eigene Darstellung, IBH

5.2.4 Fazit

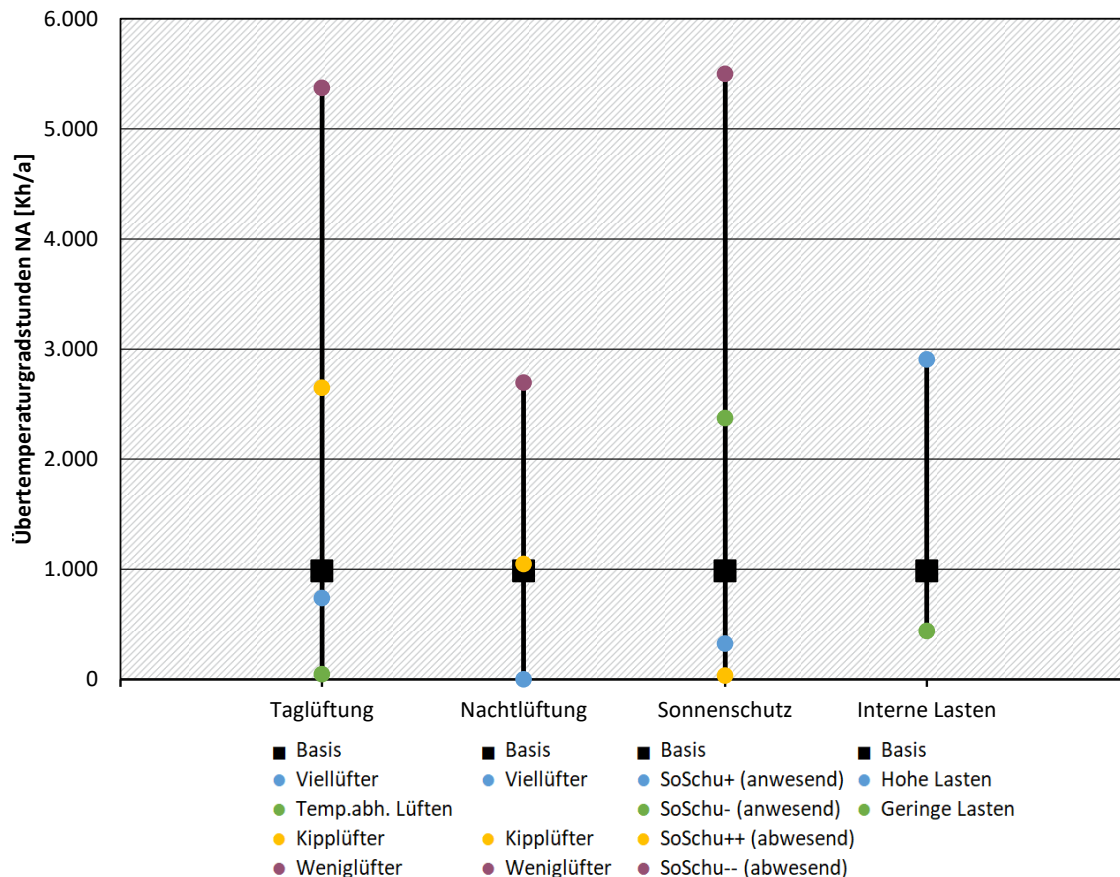
Wie zu erwarten, hat das Lüftungsverhalten große Auswirkungen auf den sich einstellenden Luftwechsel, welcher für die Varianten über das Sommerhalbjahr gemittelt und in Abhängigkeit der Klimadaten in dieser Untersuchung zwischen $1,4$ und $7,6 \text{ h}^{-1}$ (Taglüftungsvarianten) und $1,0$ und $17,5 \text{ h}^{-1}$ (Nachtlüftungsvarianten) liegt. Bei der Auswertung der Übertemperaturgradstunden für die Lüftungsvarianten zeigt sich jedoch, dass der Luftwechsel allein nicht ausschlaggebend für die sich einstellenden Raumtemperaturen ist. So ergeben sich für die Variante T4 (Weniglüfter) mit einem gemittelten Luftwechsel von $3,8 \text{ h}^{-1}$ mehr Übertemperaturgradstunden als für die Variante T3 (Kipplüfter) mit einem gemittelten Luftwechsel von $1,5 \text{ h}^{-1}$. Ursache hierfür ist die kurze Lüftungszeit, die mit 10-minütigem Stoßlüften beim T4 nicht ausreicht, die Speichermassen auszukühlen.

Durch die Festlegung auf konstante Luftwechsel beim Basisfall wird der Einfluss der Klimadaten auf die Luftwechselzahlen stark reduziert. Die Klimadaten fließen allerdings durch die Grenztemperaturen, bei denen ein erhöhter Luftwechsel angesetzt wird, ein. Bei der Auswertung der Übertemperaturgradstunden lässt sich der Effekt eines verminderten Einflusses der Klimadaten nicht mehr erkennen.

Das Taglüftungsverhalten hat aufgrund der höheren zeitlichen Relevanz einen deutlich höheren Einfluss auf die Übertemperaturgradstunden als das Nachtlüftungsverhalten. Die Bedienung des

Sonnenschutzes hat ebenso wie das Taglüftungsverhalten sehr großen Einfluss auf die Übergradtemperaturstunden. Nachtlüftungsvariante und die Varianten zu internen Lasten zeigen im Vergleich zu diesen weniger starken, aber immer noch hohen Einfluss. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 64 nochmal übersichtlich für den Standort Potsdam und die TRY2045 dargestellt.

Abbildung 64: Einfluss des Nutzungsverhaltens auf die Übertemperaturgradstunden (Potsdam, TRY2045)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Die Auswertung der Übertemperaturgradstunden für den jeweiligen Basisfall im Vergleich zu den Varianten zeigt, dass dieser im Mittelfeld zwischen den Extremen im Nutzungsverhalten liegt. Auf Basis dieses Exkurses lässt sich die These aufstellen, dass im Vergleich zu den Auswirkungen von anderen Parametern das Nutzungsverhalten eine dominierende Rolle spielt. Diese These wurde durch die Detailuntersuchung zum Nutzungsverhalten (vgl. Kapitel 5.3.7) bestätigt.

Für die Festlegung der Randbedingungen des Basisfalls lässt sich durch die thermischen Simulationen des Nutzungsverhaltens folgendes festhalten:

- Für das Nutzungsverhalten lassen sich extreme Verhaltensweisen zwischen „Frischluftfanatiker“ und „Zugluft-Vermeider“, zwischen stark und nie genutztem Sonnenschutz sowie großen Unterschieden bei den internen Lasten finden.
- Das Nutzungsverhalten hat dominanten Einfluss auf die Übertemperaturgradstunden.

- ▶ Die Basisfälle sind gut gewählt und liegen im Mittelfeld zwischen den Extremen im Nutzungsverhalten.
- ▶ Bei der Interpretation der Ergebnisse der Variantenuntersuchung ist großer Einfluss des Nutzungsverhaltens zu beachten.

5.3 Detailuntersuchung

In der Detailuntersuchung werden bestimmte Aspekte und Einflussgrößen von Randbedingungen der thermischen Simulation näher betrachtet.

Nachfolgenden Ergebnis-Diagrammen der Detailuntersuchung ist immer eine Übersichtszeile der jeweils zugrunde gelegten Varianten und des zu untersuchenden Parameters vorangestellt. Der zu variierende Parameter ist blau eingrahmt. Die Varianten des Parameters, die neu für die Detailuntersuchung ergänzt werden, sind in schwarzer Schrift, schon vorgestellte Ergebnisse aus der Basisuntersuchung, die im Ergebnis-Diagramm der Einordnung dienen, in grauer Schrift.

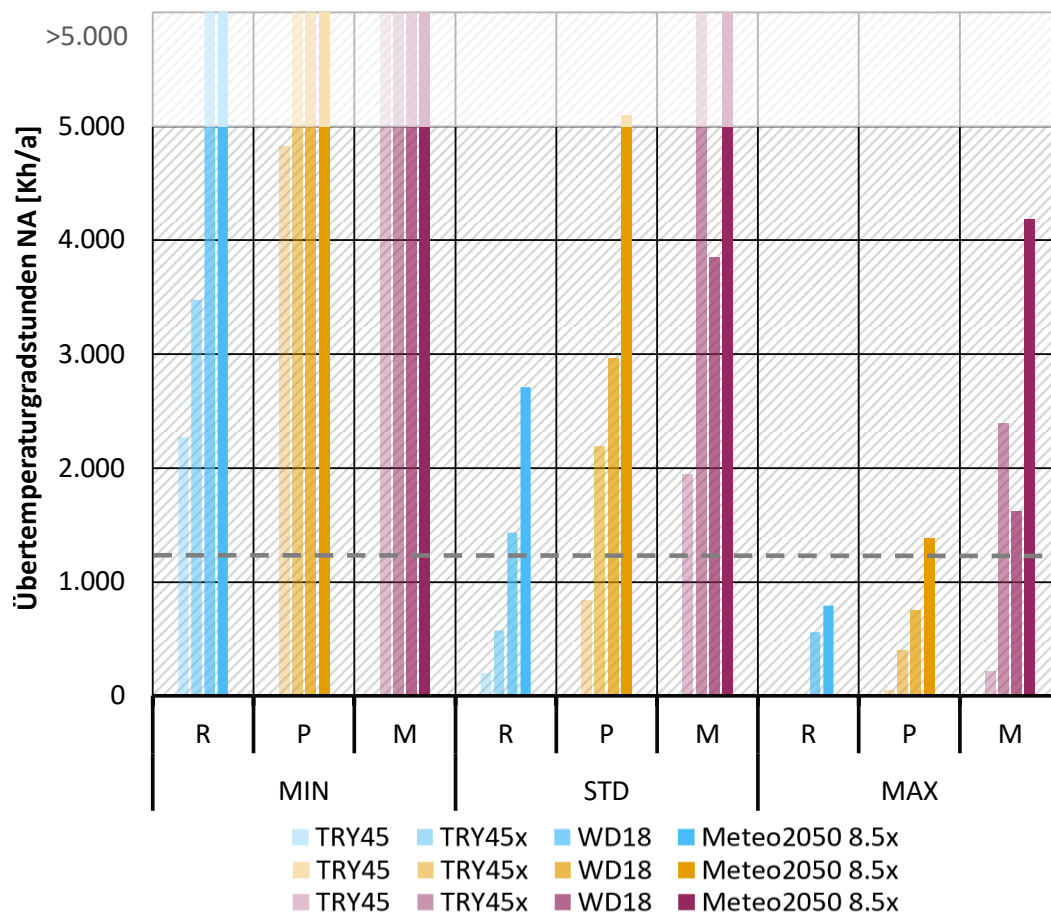
5.3.1 Klimadaten

5.3.1.1 Klimawandel extrem

Die Basisuntersuchung zeigte den großen Einfluss der zugrunde gelegten Klimadaten. Ergänzend wird nun eine Simulation mit „Worstcase“-Klimadaten durchgeführt, um einschätzen zu können, wie unterschiedliche Maßnahmenpakete auf extremes Klima reagieren. Hierfür werden die über die Meteonorm-Datenbank (Meteonorm 2021) generierten Klimadaten für das RCP-Szenario 8.5 im Jahr 2050 bei einem extremen Sommer eingesetzt und mit ÜTGS-Ergebnissen für die TRY2045, TRY2045x und Wetterdaten 2018 aus der Basisuntersuchung verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 65 am Beispiel des westorientierten Wohnzimmers dargestellt. Für eine Einschätzung der Meteonorm-Klimadaten wird auf Abbildung 36 verwiesen, welche die durchschnittliche Außenlufttemperatur im Sommerhalbjahr zeigt.

Abbildung 65: Klimawandel extrem - Übertemperaturgradstunden Wohnen

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	R / P / M (Vorort)	Meteo2050_8.5x TRY45, TRY45x, WD18	West	MIN / STD / MAX	GEG	Wohnen	Wohnzimmer	schwer	Lochfassade



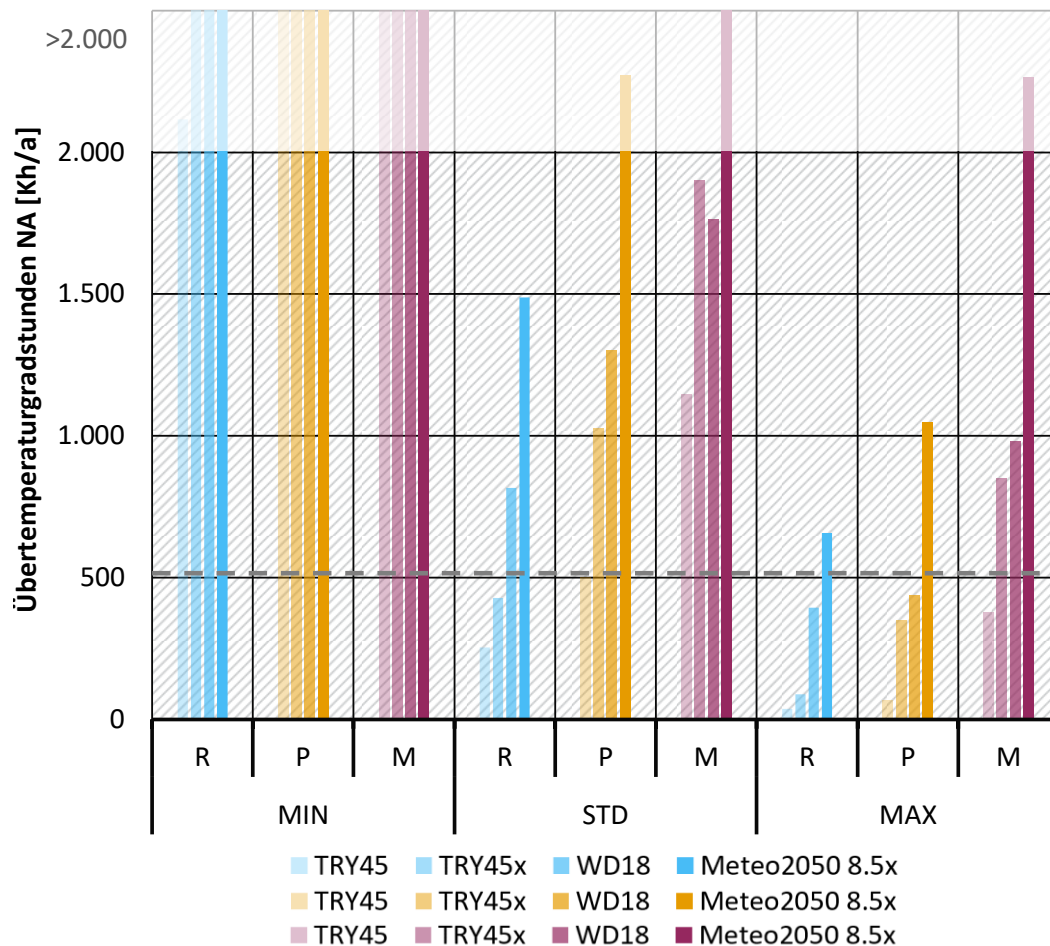
Quelle: eigene Darstellung, IBH

Wie auch schon bei den TRY45x und den Wetterdaten von 2018 ergeben sich bei den extremen Meteonorm-Klimadaten für das MIN-Maßnahmenpaket so viele Übertemperaturgradstunden, dass sie als gänzlich unbehaglich über dem Auswertebereich dieser Studie liegen. Beim STD-Maßnahmenpaket ergeben sich bei den Simulationen mit den extremen Klimadaten für alle Standorte deutlich höhere Übertemperaturgradstunden als mit den Klima- bzw. Wetterdaten der Basisuntersuchung, die deutlich über dem Anforderungswert liegen. Im Vergleich zu den Wetterdaten 2018 beträgt die ÜTGS-Zunahme für Rostock 89 %, für Potsdam 72% und Mannheim liegt wiederum außerhalb des Auswertebereichs. Für Mannheim ergibt sich selbst mit den MAX-Maßnahmen eine extrem hohe ÜTGS-Anzahl von 4.183 Kh/a, was einer Steigerung um 75 % im Vergleich zu den ÜTGS beim TRY2045x entspricht. Selbst das MAX-Maßnahmenpaket reicht bei den extremen Klimadaten nur noch beim Standort Rostock aus, um den Anforderungswert zu unterschreiten.

Für den Nutzungstyp Büro sind die ÜTGS bei extremen Klimadaten in Abbildung 66, für das Klassenzimmer in Abbildung 67 zu sehen.

Abbildung 66: Klimawandel extrem – Übertemperaturgradstunden Büro

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	R / P / M (Vorort)	Meteo2050_8.5x TRY45, TRY45x, WD18	West	MIN / STD / MAX	GEG	Büro	2-P-Bürraum	leicht	Fensterband

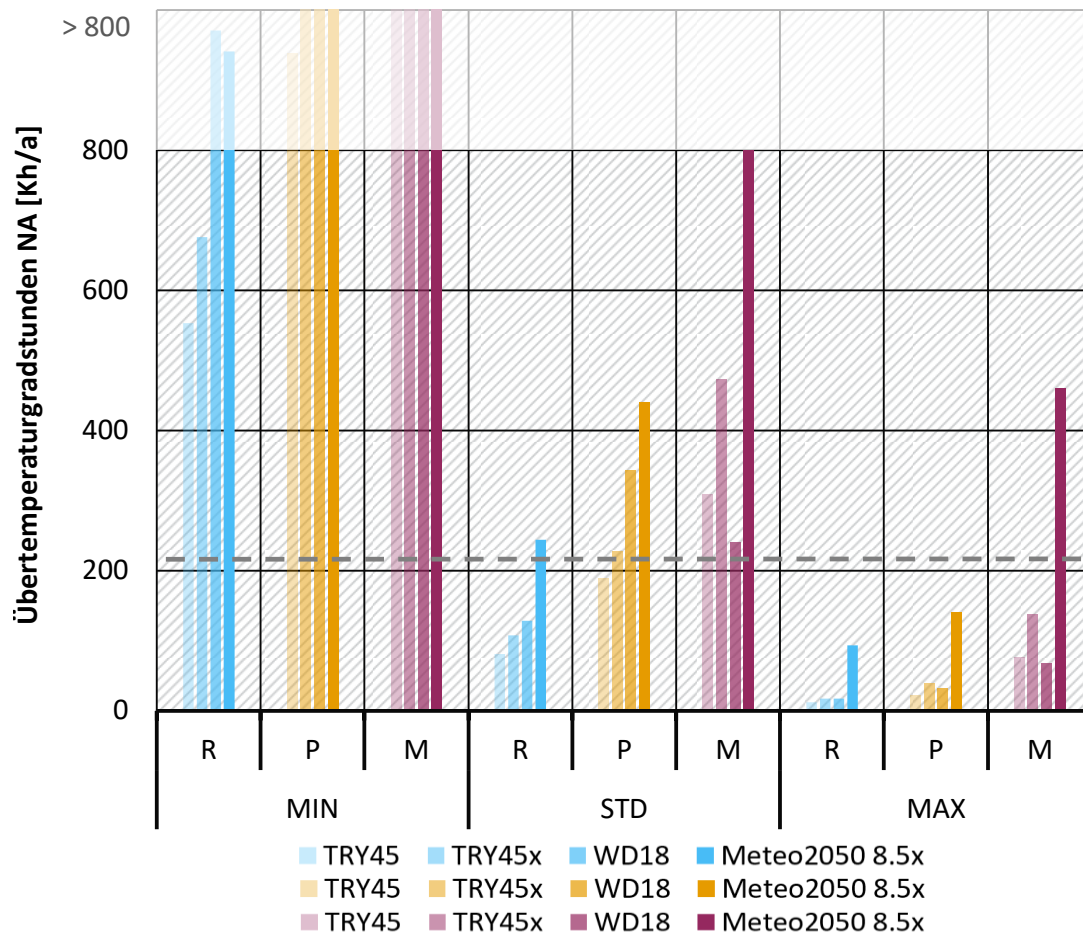


Quelle: eigene Darstellung, IBH

Beim Büro mit STD-Maßnahmenpaket wurde der Anforderungswert schon mit den TRY2045x bzw. den WD2018 überschritten. Mit den Klimadaten Meteo50_RCP8.5x gibt es nochmal eine massive Zunahme der ÜTGS. Auch mit den MAX-Maßnahmen wird der Anforderungswert bei den Extrem-Klimadaten an allen drei Standorten – und zwar für Potsdam und Mannheim mit Zunahmen von 139 bzw. 131 % im Vergleich zu den WD18 - überschritten.

Abbildung 67: Klimawandel extrem – Übertemperaturgradstunden Schule

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	R / P / M (Vorort)	Meteo2050_8.5x TRY45, TRY45x, WD18	West	MIN / STD / MAX	GEG	Schule	Klassenzimmer	mittel	Fensterband



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Nicht ganz so hoch liegen die ÜTGS für den extrem warmen Sommer des Meteo50_RCP8.5x bei der Simulation des Klassenzimmers: Die ÜTGS nehmen zwar extrem stark zu (im Vergleich zur nächstniedrigeren ÜTGS-Anzahl des TRY45x bzw. der WD2018 Zunahmen zwischen 230 bis 420 %), aber mit dem MAX-Maßnahmenpaket gibt es für die Standorte Rostock und Potsdam eine deutliche Unterschreitung des Anforderungswertes, in Mannheim allerdings eine ÜTGS-Zahl von ca. dem Doppelten des Anforderungswertes.

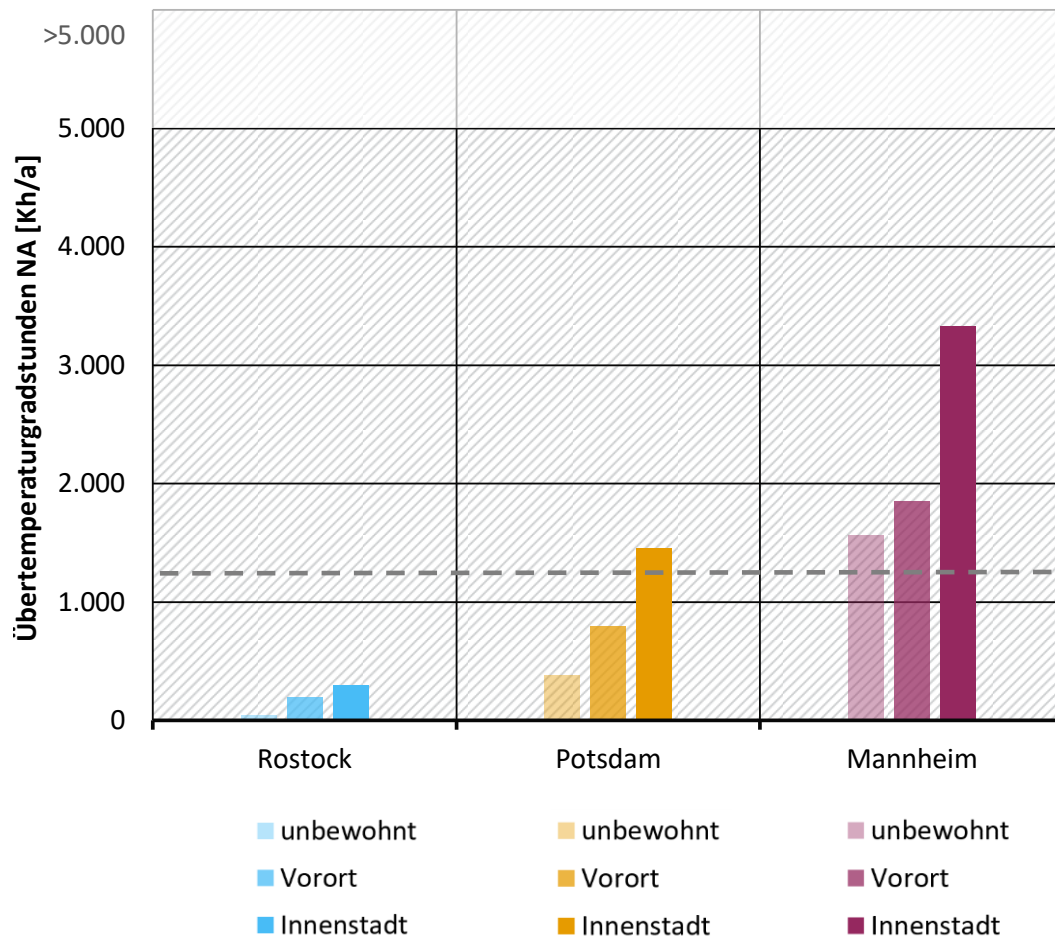
5.3.1.2 Urbaner Wärmeinsel-Effekt

Der urbane Wärmeinsel-Effekt (vgl. Kapitel 2.1.4 und 3.2.1) wirkt sich aufgrund überhöhter nächtlicher Außenlufttemperaturen vor allem auf Wohngebäude, welche tags und nachts genutzt werden, aus. Die Nachtlüftung durch geöffnete Fenster ist dadurch weniger effektiv.

In Abbildung 68 werden die Auswirkungen des innerstädtischen Wärmeinseleffekts am Beispiel des westorientierten Wohnzimmers für das TRY2045 für innerstädtische Lage im Vergleich zu unbewohnter und Vorort-Lage (vgl. Standortauswahl in Abbildung 30 und Abbildung 32) dargestellt.

Abbildung 68: Urbaner Wärmeinsel-Effekt -Übertemperaturgradstunden Wohnen

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmen (-pakete)*	Energiestandard*	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	R / P / M (unbewohnt, Vorort, Innenstadt)	TRY_2045	West	STD	GEG	Wohnen	Wohnzimmer	schwer	Lochfassade



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Die Auswirkungen des innerstädtischen Wärmeinseleffekts sind bei den Standorten Potsdam und Mannheim deutlich an der starken Zunahme der Übertemperaturgradstunden um rund 80 % im Vergleich zum Vorort zu erkennen, wohingegen beim Standort Rostock die Zunahme mit 55 % etwas moderater ausfällt.

5.3.2 Energiestandard

Nachfolgend wird der Einfluss des Energiestandards analysiert. Bei der Basisuntersuchung war der GEG-Standard zugrunde gelegt. Nun werden die Auswirkungen von unterschiedlichen Energiestandards, nämlich einem Altbau, einem teilsanierten Bestandsgebäude bei Fensteraustausch, einem teilsanierten Bestandsgebäude mit Innendämmung der Außenwand sowie einem hocheffizienten EH-40-Standard untersucht, so dass die Verschiebungen bei den Übertemperaturgradstunden analysiert werden können. Dabei ist der GEG-Standard sowohl als Neubau als auch als vollsanierter Altbau (etwa EH-85- oder EG-70-Standard) zu verstehen. Tabelle 32 fasst die Änderungen der Randbedingungen für die Energiestandard-Simulationsvarianten zusammen.

Tabelle 32: Randbedingungen - Energiestandards

	Altbau unsaniert	Altbausanierung - Fenstertausch	Altbausanierung - Innendämmung	GEG	EH40 /EG40
Wohnen					
Außenwand	42 cm Vollziegel	42 cm Vollziegel	42 cm Vollziegel mit Innendämmung	36,5cm Hochlochziegel	Hochlochziegel zzgl. Außendämmung
U-Wert	1,4 W/(m²K)	1,4 W/(m²K)	0,28 W/(m²K)	0,28 W/(m²K)	0,12 W/(m²K)
Fenster					
U-Wert	2,7 W/(m²K)	1,3 W/(m²K)	2,7 W/(m²K)	1,3 W/(m²K)	0,8 W/(m²K)
g-Wert	0,71	0,62	0,71	0,62	0,51
Büro / Schule					
Außenwand	42 cm Vollziegel	42 cm Vollziegel	42 cm Vollziegel mit Innendämmung	Stahlbeton mit Außendämmung	Stahlbeton mit Außendämmung
U-Wert	1,4 W/(m²K)	1,4 W/(m²K)	0,28 W/(m²K)	0,28 W/(m²K)	0,18 W/(m²K)
Fenster					
U-Wert	2,8 W/(m²K)	1,3 W/(m²K)	2,8 W/(m²K)	1,3 W/(m²K)	1,0 W/(m²K)
g-Wert	0,71	0,62	0,71	0,62	0,51

Bei der Variante mit Innendämmung ändert sich die wirksame Speicherkapazität:

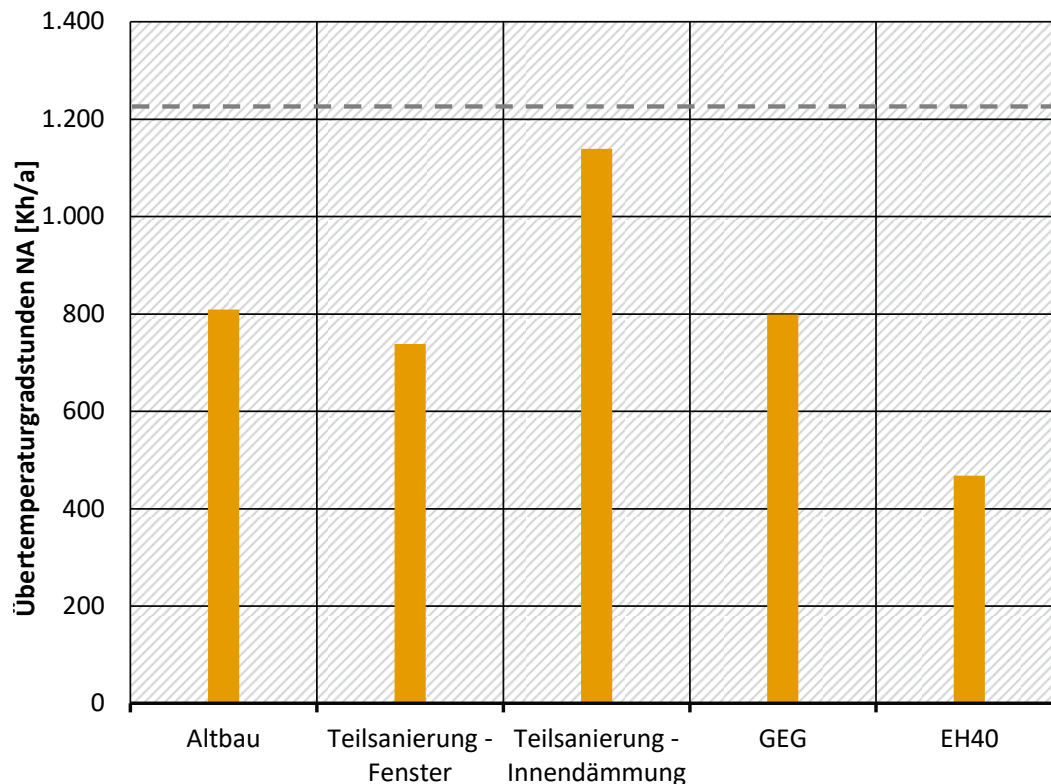
- beim Wohnen mit schwerer Bauweise ist die Änderung der wirksamen Wärmekapazität gering (wirksame Wärmekapazität sinkt von 144 Wh/Km² auf 139 Wh/Km²) und die Einstufung als schwere Bauweise bleibt bestehen,
- beim Büro (Fensterband) sind alle Varianten in leichter Bauweise, allerdings reduziert sich die wirksame Wärmekapazität von 39 auf 21 Wh/Km² bei Innendämmung,
- beim Klassenzimmer (Fensterband) sinkt die wirksame Wärmekapazität von 61 auf 51 Wh/Km² bei Innendämmung, womit auch hier die Einstufung von mittlerer Bauweise bestehen bleibt.

Auch der Einfluss der Infiltration wird betrachtet, da davon ausgegangen werden kann, dass diese auch einen wesentlichen Unterschied zwischen Bestands- und Neubauten darstellt. Damit sich nicht zu viele Einflüsse gleichzeitig überlagern, soll jedoch im ersten Teil der Energiestandard-Untersuchung die Infiltration konstant belassen und in einem zweiten Teil der Einfluss der Infiltration separat betrachtet werden.

In Abbildung 69 werden die Übertemperaturgradstunden bei Variation des Energiestandards für das westorientierte Wohnzimmer mit Standort Potsdam und Standard-Maßnahmenpaket, also mit Rollläden und erhöhter Nachtlüftung über Fenster, gezeigt.

Abbildung 69: Energiestandards im Vergleich - Übertemperaturgradstunden Wohnen

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	P (Vorort)	TRY_2045	West	STD	Altbau Teilsanierung - Fenster Teilsanierung - Dämmung GEG EH40 (KfW 40)	Wohnen	Wohnzimmer	schwer	Lochfassade



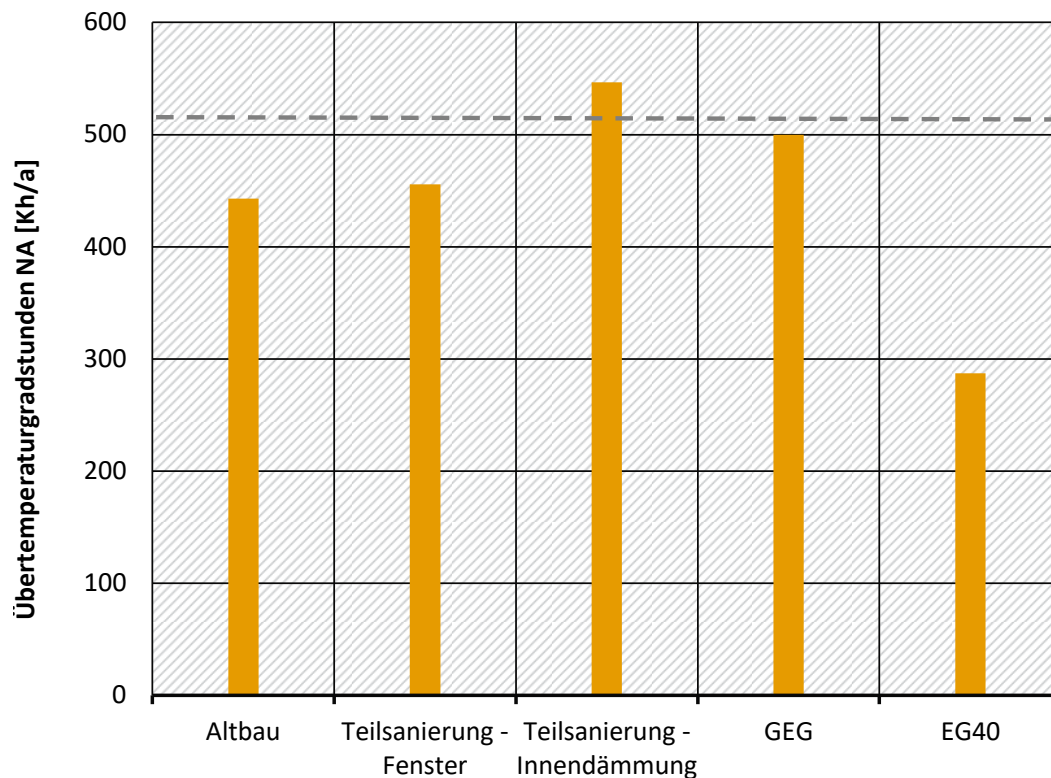
Quelle: eigene Darstellung, IBH

Deutlich ist der Einfluss der Energiestandards ersichtlich: Im Vergleich zum GEG-Standard nehmen die ÜTGs beim EH40 um rund 40 % ab und bei der Teilsanierung mit Innendämmung um rund 40 % zu. Die ÜTGs vom Altbau sind nahezu gleich dem GEG-Standard, wohingegen sie bei der Fenster-Teilsanierung leicht abnehmen. Daraus lässt sich folgern, dass vor allem die g-Werte entscheidend sind, aber auch die U-Werte der Außenbauteile (vgl. Teilsanierung-Fenster mit gleichem g-Wert wie beim GEG-Standard). Die etwas geringeren ÜTGs bei der Teilsanierung-Fenster im Vergleich zum GEG-Standard hängen mit der Absenkung der Raumtemperaturen durch Transmission durch die ungedämmten Außenwände bei kühleren Außenlufttemperaturen zusammen. Erstaunlich ist, dass der KfW-Effizienzhaus 40-Standard deutlich weniger ÜTGs aufweist als der GEG-Standard. Ursächlich hierfür ist der geringere g-Wert der Verglasung. Die hohe ÜTGs-Zahl bei der Innendämmung-Teilsanierung steht im Zusammenhang mit der Reduzierung der Speichermassen sowie teilweise der verringerten Transmission durch die Außenwände. Alle gezeigten Varianten unterschreiten den als gestrichelte Linie eingezeichneten Anforderungswert.

Die Übertemperaturgradstunden bei Variation des Energiestandards für das 2-Personen-Büro ist in Abbildung 70 dargestellt.

Abbildung 70: Energiestandards im Vergleich - Übertemperaturgradstunden Büro

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	P (Vorort)	TRY_2045	West	STD	Altbau Teilsanierung - Fenster Teilsanierung - Dämmung GEG EG40 (KfW 40)	Büro	2-P-Büro- raum	leicht	Fenster- band



Quelle: eigene Darstellung, IBH

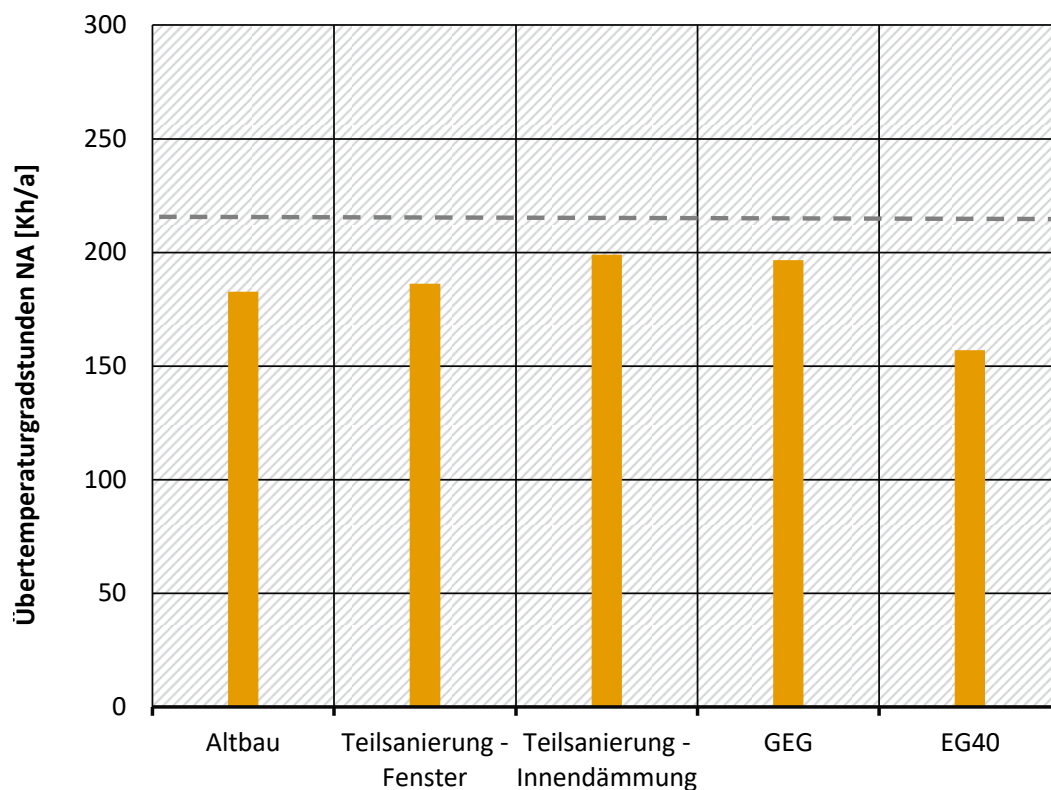
Für den EG40-Standard und die Teilsanierungen zeigen sich tendenziell vergleichbare Effekte wie beim Wohnen: Die ÜTGS nehmen im Vergleich zum GEG-Standard um gut 40 % beim EG40 und um rund 10% beim Altbau und der Fenster-Teilsanierung ab. Bei der Innendämmung-Teilsanierung nehmen sie wiederum zu, beim Büro aber nur um wenige Prozent. Dass die Innendämmung beim Büro im Vergleich zum Wohnen eine nicht so große Rolle spielt, hängt damit zusammen, dass das Büro im Basisfall bereits in leichter Bauweise simuliert wird und dadurch die weitere Reduktion von Speichermassen nicht mehr so ins Gewicht fällt.

Beim gewählten Büro-Beispiel hält einzig der Fall mit Innendämmung-Teilsanierung den Anforderungswert knapp nicht ein.

Abbildung 71 zeigt die Energiestandard-Varianten für das Klassenzimmer.

Abbildung 71: Energiestandard im Vergleich - Übertemperaturgradstunden Klassenzimmer

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	P (Vorort)	TRY_2045	West	STD	Altbau Teilsanierung - Fenster Teilsanierung - Dämmung GEG EG40 (KfW 40)	Schule	Klassenzimmer	mittel mit Innendämmung: leicht	Fensterband



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Beim Klassenzimmer zeigen sich zwischen den untersuchten Energiestandards deutlich geringere Unterschiede. Im Vergleich zum GEG-Standard nehmen die ÜTGS des EG40 um 20 % ab. Bei der Innendämmung-Teilsanierung nehmen die ÜTGS geringfügig zu, beim Altbau und der Fenster-Teilsanierung leicht ab. Den Anforderungswert unterschreiten alle gezeigten Schul-Varianten.

Insgesamt weist der EG40-Standard für Wohnen, Büro und Schule deutlich geringere Übertemperaturgradstunden als der GEG-Standard auf. Die g-Wert-Reduzierung ist hierfür der entscheidende Faktor. Beim GEG-Standard und besseren Dämmstandards scheinen die U-Werte nur sehr geringen Einfluss auf die ÜTGS zu haben, jedoch bei Verbesserung von sehr hohen U-Werten schon (z.B. U-Wert Außenwand von 1,4 auf 0,28 W/m²K). Dieser Effekt erklärt auch, warum der Unterschied zwischen Altbau und Fenster-Teilsanierung trotz der g-Wert-Reduzierung so gering ausfällt: die gleichzeitige Verbesserung des U-Wertes von 2,7 auf 1,3 W/(m²K) führt wegen der verringerten Möglichkeit zur Auskühlung entgegengesetzt zu einer Erhöhung der ÜTGS.

Der Einsatz von Innendämmungen ist für den Fall einer Nachtlüftung (insbesondere bei schwerer Bauweise) aus Sicht des sommerlichen Wärmeschutzes nicht zu empfehlen bzw. bedarf genauerer Planung im Einzelfall.

Anschließend soll zusätzlich zu den Auswirkungen von Änderungen von Wärmedämmeigenschaften und Energiedurchlassgrad auch noch die Auswirkungen der Luftdichtheit einbezogen werden. Hierfür werden folgende Varianten betrachtet:

- undichter Altbau mit hoher Infiltration und einem Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz von $n_{50} = 4 \text{ h}^{-1}$ (Infiltration $n_{\text{inf}} = 0,28 \text{ h}^{-1}$)
- Altbau/Neubau mit mittlerer Infiltration und einem Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz von $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ (Infiltration $n_{\text{inf}} = 0,07 \text{ h}^{-1}$)
- Energieeffizienter Neubaustandard KfW 40 (EH 40/EG 40) mit geringer Infiltration und einem Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz von $n_{50} = 0,5 \text{ h}^{-1}$ (Infiltration $n_{\text{inf}} = 0,035 \text{ h}^{-1}$)

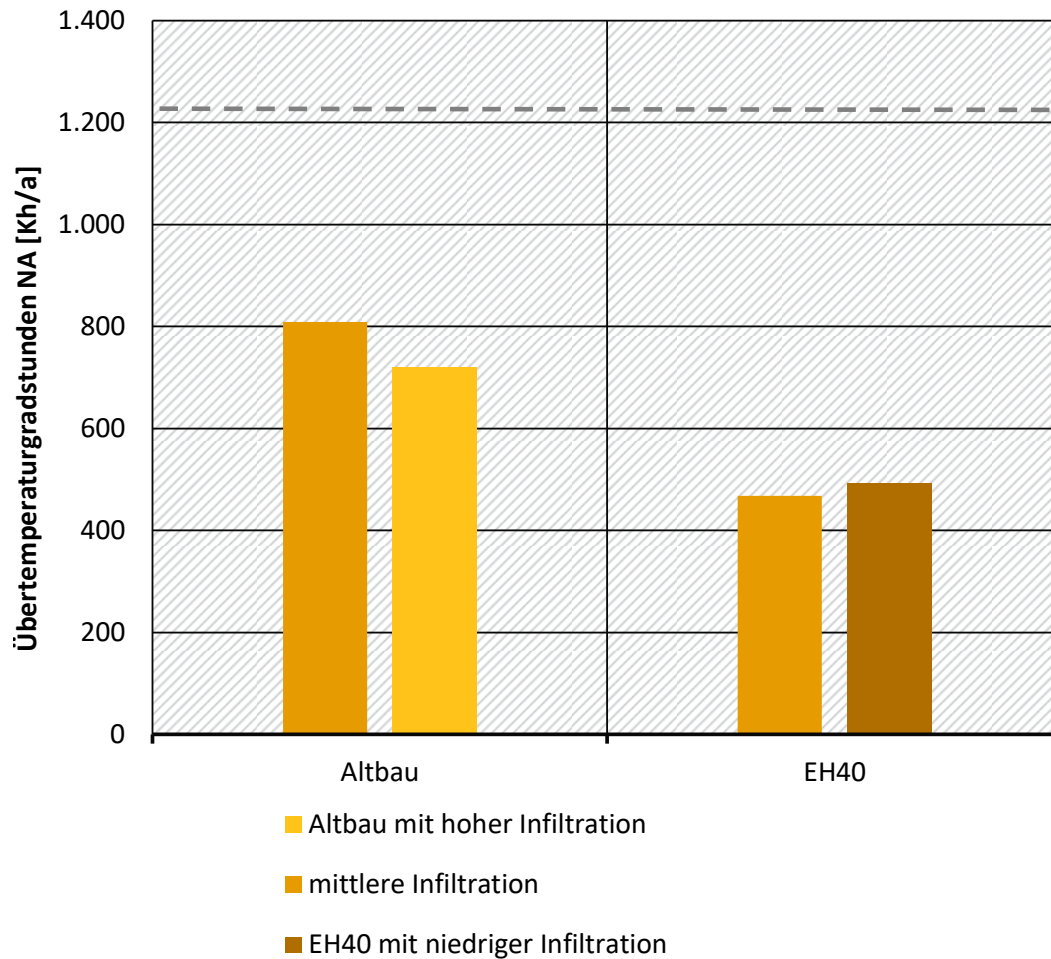
Die Berechnung der Infiltration erfolgt nach DIN V 18599-2:2018-09 Gleichung 64 bzw. 65 und mittlerer Abschirmung. Die Infiltration wird in der Simulation jeweils konstant angesetzt.¹¹

Das Ergebnis für Wohnen ist Abbildung 72 zu entnehmen, für den Büroraum sind die ÜTGS-Ergebnisse in Abbildung 73 dargestellt und für das Klassenzimmer in Abbildung 74. In den Grafiken zeigt die jeweils linke Säule den untersuchten Energiestandard mit mittlerer Infiltration und rechts daneben die variierte Infiltration, die - wie oben beschrieben - beim Altbau höher und beim Neubau niedriger angesetzt wird.

¹¹ Testweise wurden auch thermische Simulationen mit windabhängiger Infiltration durchgeführt. Damit die windabhängige Infiltration in dem verwendeten Simulationsprogramm berechnet werden kann, muss der simulierte Raum z.B. über einen Flur mit einer Außenwand mit anderer Orientierung verbunden werden. Die Ergebnisse der ÜTGS dieser Simulationen sind abhängig von der Art dieser Verbindung bzw. vor allem der Orientierung der Verbindung, der Windrichtungen und -geschwindigkeiten der Klimadaten und natürlich der Raumorientierung, was zu großen Unterschieden in den Ergebnissen führen kann. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde die Infiltration in der Basis und der Detailuntersuchung als konstant angesetzt.

Abbildung 72: Energiestandards unter Berücksichtigung Infiltration - Übertemperaturgradstunden Wohnen

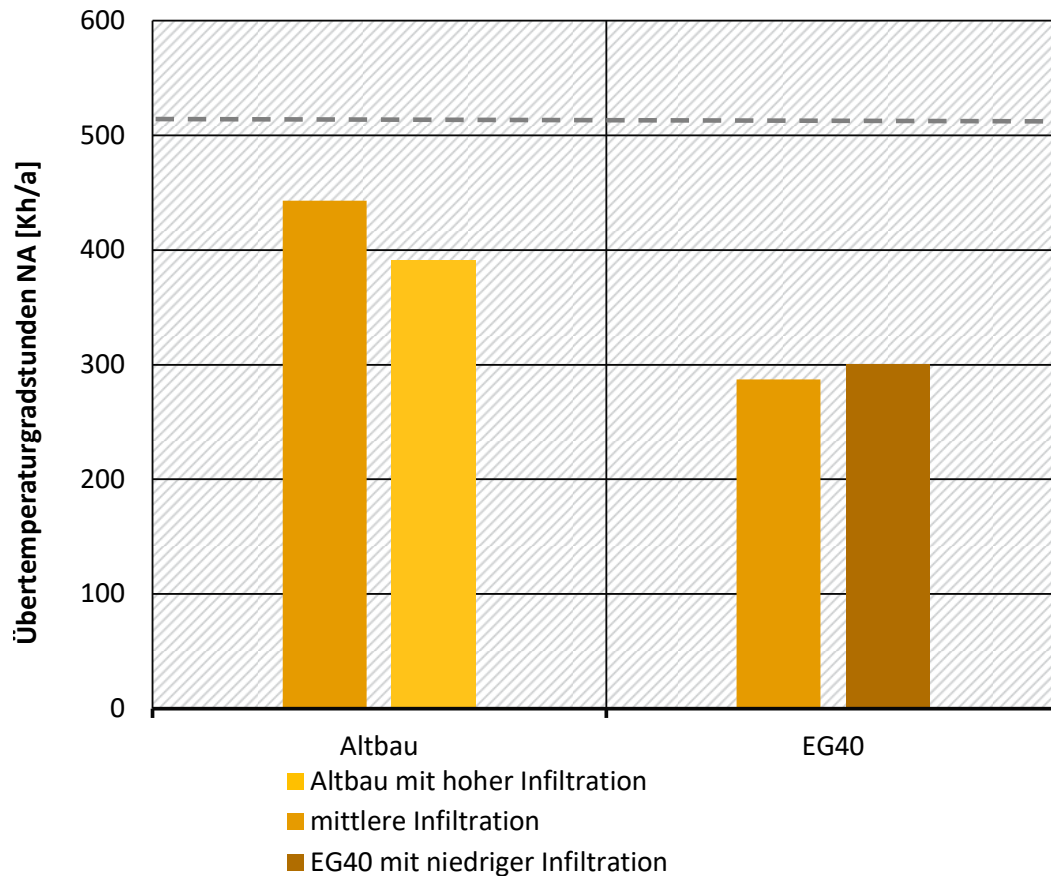
Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	P (Vorort)	TRY_2045	West	STD	Altbau mit mittlerer/hoher Infiltration EH40 mit mittlerer/geringer Infiltration	Wohnen	Wohnzimmer	schwer	Lochfassade



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Abbildung 73: Energiestandards unter Berücksichtigung Infiltration - Übertemperaturgradstunden Büro

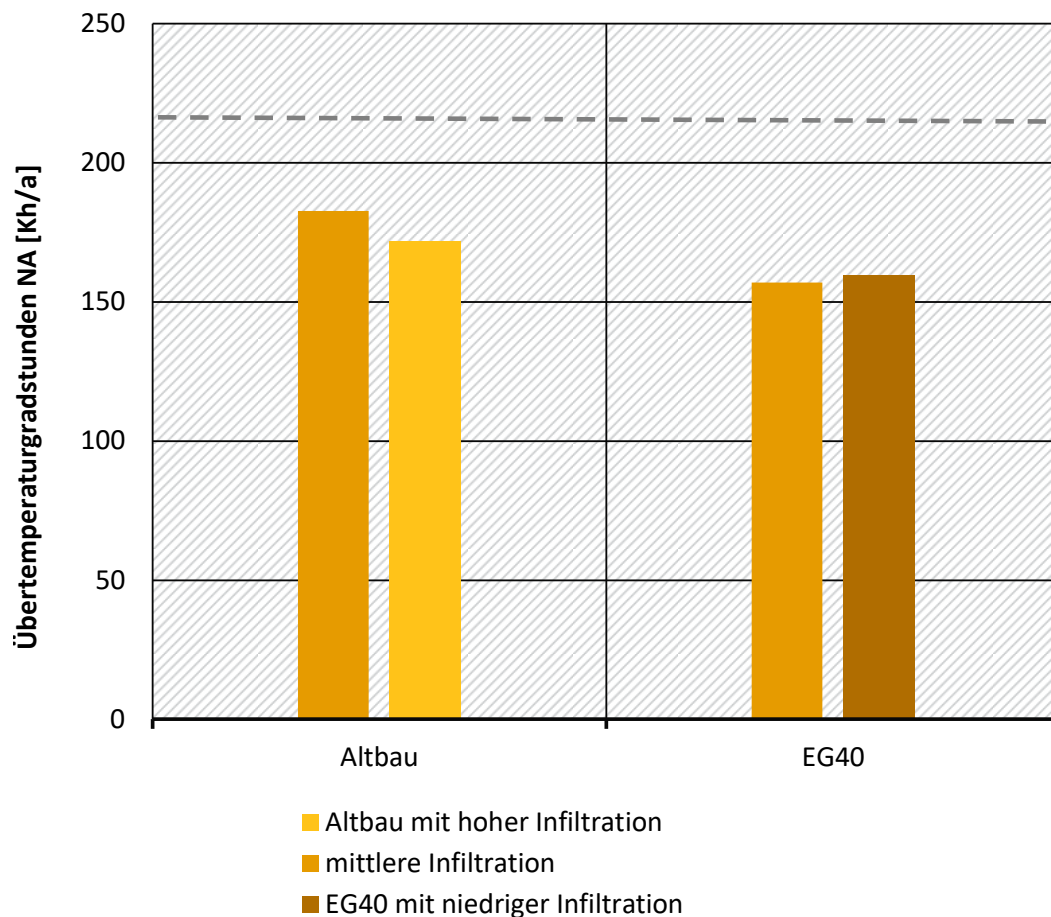
Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	P (Vorort)	TRY_2045	West	STD	Altbau mit mittlerer/hoher Infiltration EH40 mit mittlerer/geringer Infiltration	Büro	2-P-Büro	leicht	Fensterband



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Abbildung 74: Energiestandards unter Berücksichtigung Infiltration- Übertemperaturgradstunden Klassenzimmer

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	P (Vorort)	TRY_2045	West	STD	Altbau mit mittlerer/hocher Infiltration EH40 mit mittlerer/geringer Infiltration	Schule	Klassenzimmer	mittel mit Innendämmung: leicht	Fensterband



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Bei der Infiltration sind die Auswirkungen eindeutig: je höher die Infiltration, d.h. je höher der zusätzliche Luftwechsel durch Undichtigkeiten, umso niedriger sind die ÜTGS. Beim Altbau-Beispiel führt die angesetzte höhere Infiltration zu einer ÜTGS-Reduktion um 11 % (Wohnen), 12 % (Büro) bzw. 6 % (Klassenzimmer). Die Variation beim Neubau mit niedrigerer Infiltration hat eine ÜTGS-Steigerung um rund 5 % (Wohnen/Büro) bzw. 2 % (Klassenzimmer) zur Folge.

So ergibt sich bei Betrachtung der Teiluntersuchungen folgendes Bild:

- ▶ Altbau: Vergleicht man den sommerlichen Komfort im Altbau mit dem GEG-Standard ergeben sich bei den Nichtwohngebäuden Vorteile für den Altbau (ÜTGS-Absenkung um 6 bis 11 %), beim Wohngebäude kein Unterschied. Beim unsanierten Altbau ist allerdings zusätzlich von einer erhöhten Infiltration auszugehen. Diese hat positiven Einfluss auf die sommerliche Situation (ÜTGS-Absenkung um 6 bis 12 %).

- **Teilsanierungen:** Eine Teilsanierung der Fenster hat im Vergleich zum unsanierten Altbau wenig Einfluss auf den sommerlichen Komfort bei den beiden Nichtwohngebäude-Räumen, nur beim Wohnen sinkt die Überhitzung um 9 %. Innendämmung zur Teilsanierung wirkt sich in allen untersuchten Fällen ungünstig aus, weil Speichermasse verloren geht: im Vergleich zum unsanierten Altbau steigen die ÜTGS um rund 10 % (Schule) bis 40 % (Wohnen). (Für die Teilsanierungen wurde die Infiltration nicht variiert, weil davon auszugehen ist, dass im Zuge einer Sanierung auch die Undichtigkeiten vermindert werden und beispielsweise ähnlich der angesetzten mittleren Infiltration liegen könnten.)
- **Energieeffizientes Bauen:** Beim energieeffizienten Neubau führt eine sehr dichte Bauweise zu etwas geringerem sommerlichen Komfort (ÜTGS-Erhöhung um 2 bis 5 %). Luftdichtes Bauen ist trotz dieses leichten ÜTGS-Anstiegs aufgrund der Heizwärmebedarfsreduzierung durchaus als sinnvoll anzusehen. Aber zum Ausgleich muss im Sommerfall mehr gelüftet werden. Denn Infiltration ist nichts anderes als unbeabsichtigtes Lüften. Der niedrige g-Wert der 3-Scheiben-Verglasung hingegen hat weitaus größeren Einfluss auf den sommerlichen Komfort als die Infiltration. Kombiniert man die Auswirkungen von Dämmstandard mit der niedrigen Infiltration, kann für die hier untersuchten EH40/EG40-Fälle von einer ÜTGS-Reduktion von knapp 40 % (Wohnen, Büro) und knapp 20 % (Schule) ausgegangen werden.

5.3.3 Bauweise

Die Bauweise der Basisvariante ist an eine typische Gebäudeausführung entsprechend der Nutzung angelegt: Wohngebäude, sofern als Massivbau ausgeführt, haben eine schwere Bauweise, Bürogebäude durch abgehängte Decken, Trockenbau-Innenwände oft leichte Bauweise, Klassenzimmer oft eine mittlere Bauweise.

Nachfolgend soll untersucht werden, wie sich eine Variation der Bauweise auswirkt, da die Gebäudetypen auch als Holzbau (leichte Bauweise) oder mit massiven Innenwänden und ohne Abhangdecken (schwere Bauweise) ausgeführt werden können. Hierfür werden in den Simulationen die raumumschließenden Bauteilaufbauten so variiert, dass sich eine leichte, mittlere bzw. schwere Bauweise ergibt. Tabelle 33 gibt die sich über eine vereinfachte Berechnung ergebende wirksame Wärmekapazität für die jeweiligen Simulationsmodelle an. Angegeben wird die auf die Nettoraumfläche A_G bezogene wirksamen Wärmekapazität C_{wirk} .

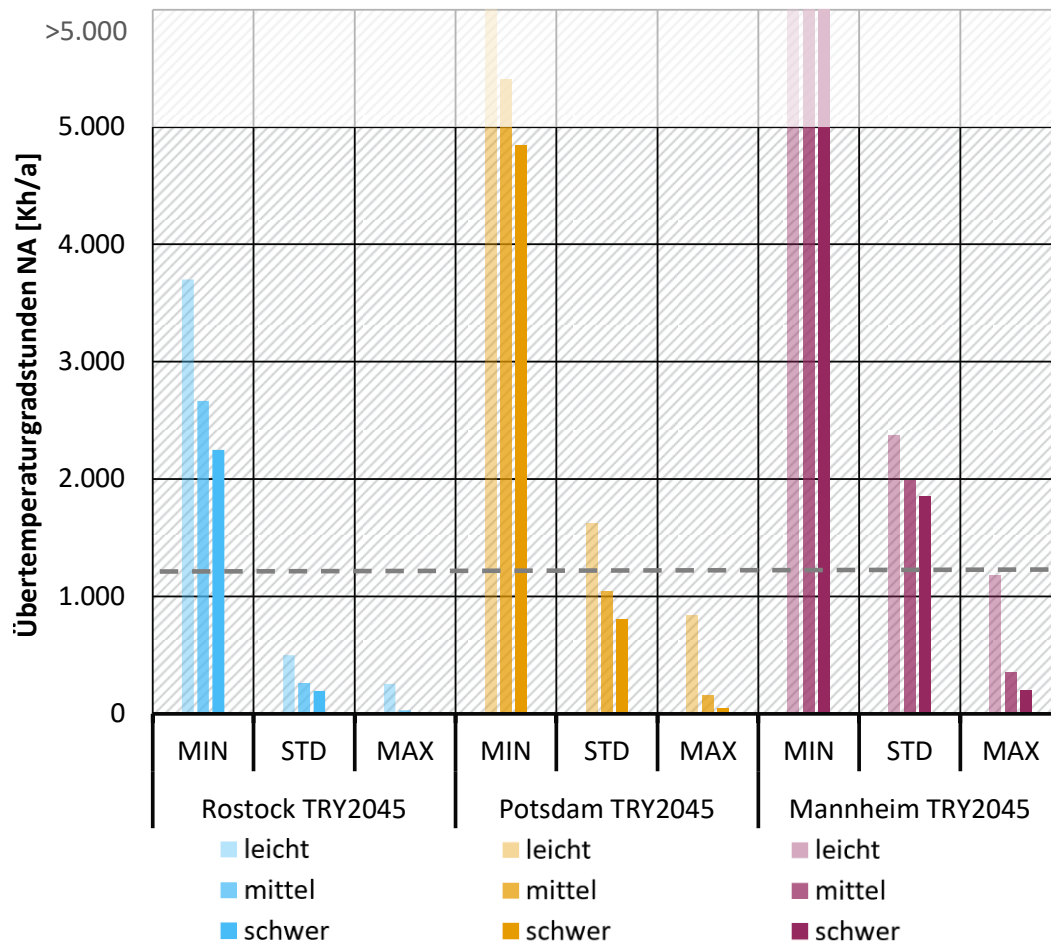
Tabelle 33: Randbedingungen - Bauweise

C_{wirk}/A_G	Leichte Bauweise	Mittlere Bauweise	Schwere Bauweise
Wohnzimmer	27 Wh/Km ²	93 Wh/Km ²	144 Wh/Km ² (Basisfall)
Bürraum (Fensterband)	39 Wh/Km ² (Basisfall)	72 Wh/Km ²	225 Wh/Km ²
Klassenzimmer (Fensterband)	39 Wh/Km ²	61 Wh/Km ² (Basisfall)	176 Wh/Km ²

Abbildung 75 können die Ergebnisse fürs Wohnen bei Variation der Bauweise entnommen werden.

Abbildung 75: Bauweisen im Vergleich - Übertemperaturgradstunden Wohnen

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	R / P / M (Vorort)	TRY_2045	West	MIN / STD / MAX	GEG	Wohnen	Wohnzimmer	leicht mittel schwer	Lochfassade



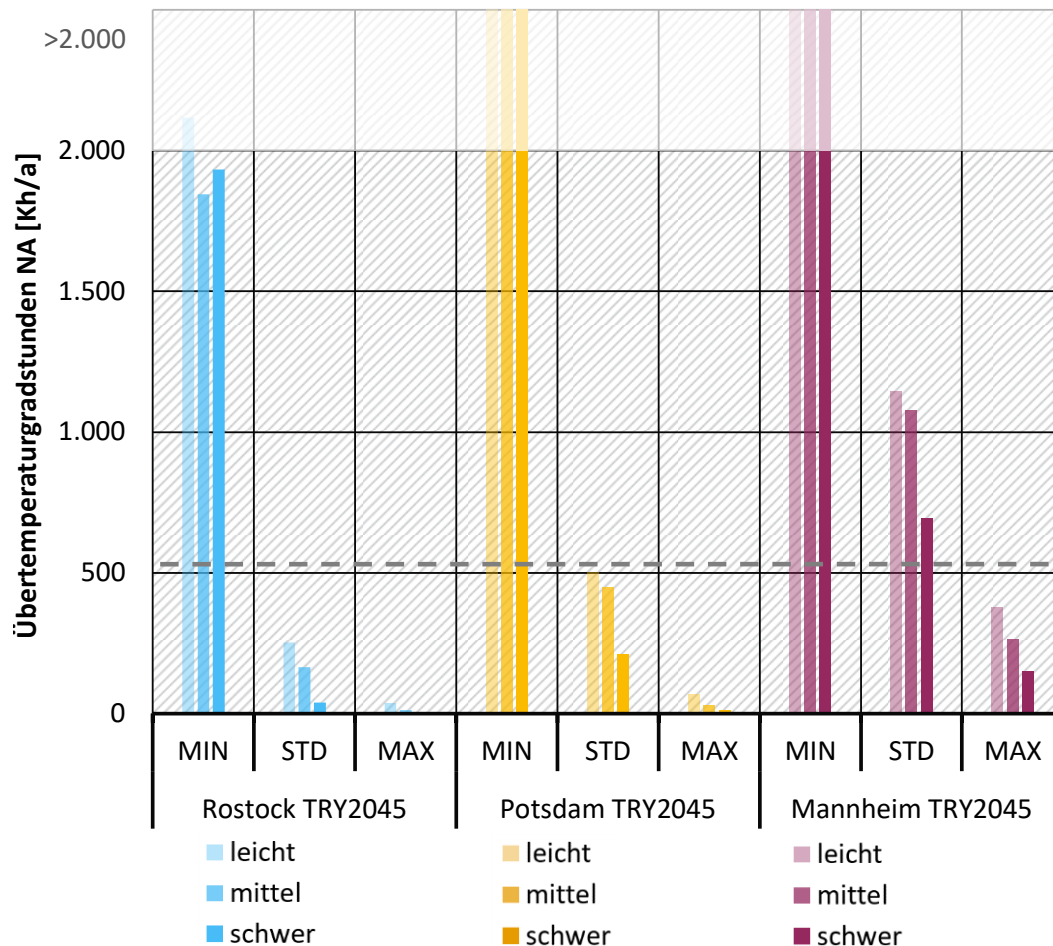
Quelle: eigene Darstellung, IBH

Der Einfluss von Speichermassen ist klar erkennbar: je höher die Wärmespeicherkapazität umso geringer die ÜTGs. Hierbei gilt zu beachten, dass bei allen drei Maßnahmenpaketen beim Wohnen von einer Nachtlüftung (erhöhte Nachtlüftung (MIN, STD) bzw. hohe Nachtlüftung (MAX)) ausgegangen wird. Bei der MAX-Variante ist eine leichte Bauweise deutlich ungünstiger als eine mittlere oder schwere.

Im Vergleich hierzu zeigt Abbildung 76 die Ergebnisse bei Büronutzung.

Abbildung 76: Bauweisen im Vergleich - Übertemperaturgradstunden Büro

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	R / P / M (Vorort)	TRY_2045	West	MIN / STD / MAX	GEG	Büro	2-P-Bürraum	leicht mittel schwer	Fensterband

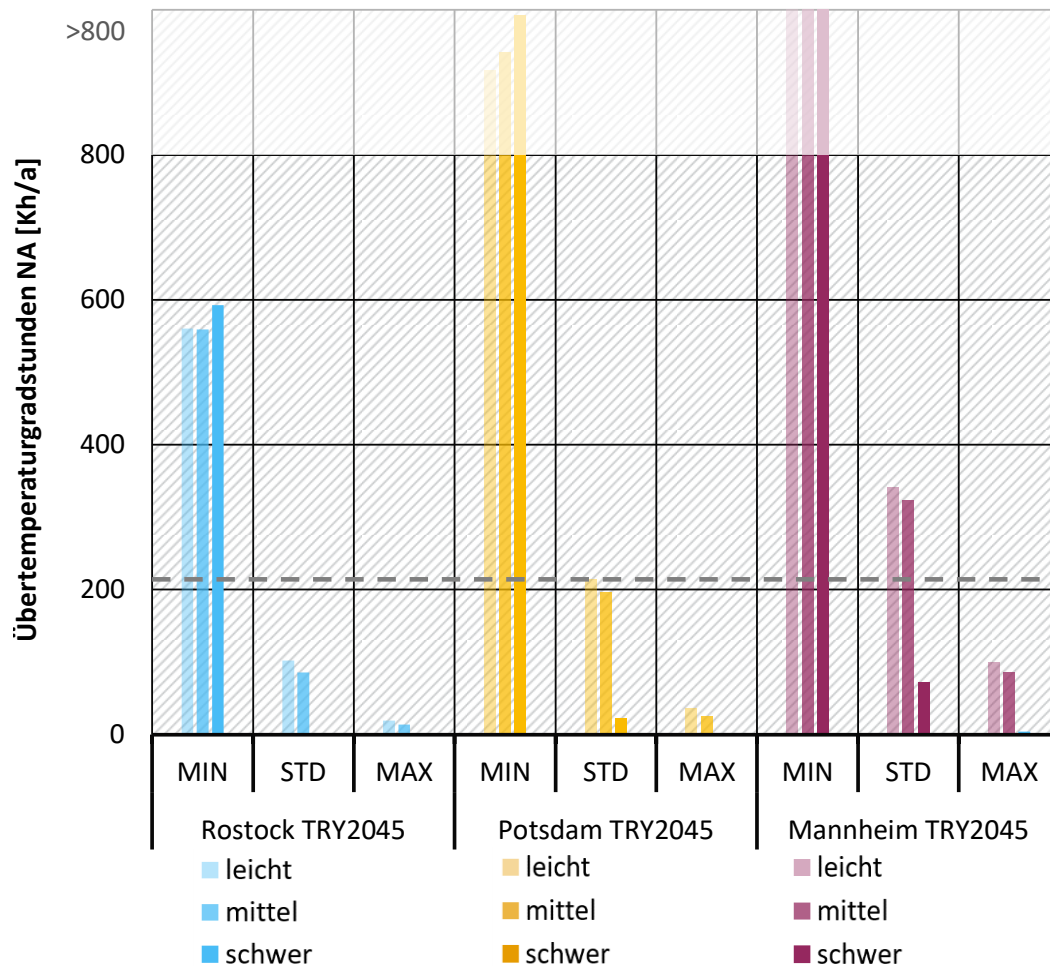


Quelle: eigene Darstellung, IBH

Beim Büro sind die Ergebnisse dem Wohnen sehr ähnlich: Auch beim STD- und MAX-Fall, die beide über erhöhte Nachtlüftung verfügen, ist immer die schwere Bauweise am günstigsten, die leichte Bauweise am ungünstigsten. In Rostock fällt bei der MIN-Variante (ohne Nachtlüftung) eine Verschiebung auf und die mittlere Bauweise weist die geringsten ÜTGS auf. Bezieht man die hier nicht mehr abgebildeten ÜTGS der MIN-Variante von Potsdam und Mannheim mit ein, so liegen diese mit rund 3.000 (Potsdam) und rund 4.000 (Mannheim) für die mittlere und schwere Bauweise jeweils nahezu gleichauf, wohingegen die leichte Bauweise nochmal je rund 250 Kh/a über den Werten der mittleren bzw. schweren Bauweise liegt. Auf diese geringfügigen Verschiebungen beim MIN-Fall sollte jedoch aufgrund der Vielfachen Überschreitung des Anforderungswertes kein großes Augenmerk gelegt werden.

Abbildung 77: Bauweisen im Vergleich - Übertemperaturgradstunden Klassenzimmer

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	R / P / M (Vorort)	TRY_2045	West	MIN / STD / MAX	GEG	Schule	Klassenzimmer	leicht mittel schwer	Fensterband



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Auch beim Klassenzimmer gibt es bei der MIN-Variante Verschiebungen: Bei den Standorten Rostock und Mannheim weist nun die schwere Bauweise die meisten ÜTGS auf. Beim STD- und MAX-Maßnahmenpaket ist für alle Standorte eine leichte Bauweise ungünstig, allerdings ist auch eine mittlere Bauweise nicht viel besser (z.B. beim STD-Fall Reduktion um 5 bis 8 %). Die geringen Abstände zwischen leichter und mittlerer Bauweise lassen sich durch die in Tabelle 33 angegebenen wirksamen Wärmekapazitäten erklären. Mit Abstand am günstigsten ist eine schwere Bauweise.

Bei den Fällen mit Nachtlüftung (MIN, STD, MAX beim Wohnen bzw. STD, MAX bei Büro und Schule) sind die Räume in schwerer Bauweise weniger von Überhitzung gefährdet als die entsprechenden Räume in leichter Bauweise. Bei den Fällen ohne Nachtlüftung (Büro/Schule: MIN) ist dieser Effekt nicht bzw. teilweise auch gegensätzlich sichtbar. Dies unterstreicht die Erkenntnisse von (Rüdiger, Ferk 2016), dass die positive Wirkung thermischer Speichermasse im Sommerfall vom

Wärmeabfuhrpotential beispielsweise durch Nachtlüftung bestimmt wird. Bleibt dieses aus, ist der Einfluss der Speichermasse auf die Innenraumüberhitzung gering bzw. nicht eindeutig.

5.3.4 Lage innerhalb des Gebäudes

Insbesondere bei kleineren Wohngebäuden mit wenigen Geschossen grenzen ein hoher Prozentsatz der Räume nach oben und nach unten nicht an andere Räume, wie es in der Basisuntersuchung mit adiabaten Anschlüssen im Gebäude angesetzt ist, sondern im Dachgeschoss an Außenluft oder im Erdgeschoss an einen Keller bzw. an Erdreich bei Gebäuden ohne Unterkellerung. Aus diesem Grund werden nachfolgend für das Wohngebäude diesbezügliche Auswirkungen auf die Übertemperaturgradstunden untersucht. Tabelle 34 sind die angesetzten Randbedingungen zu entnehmen.

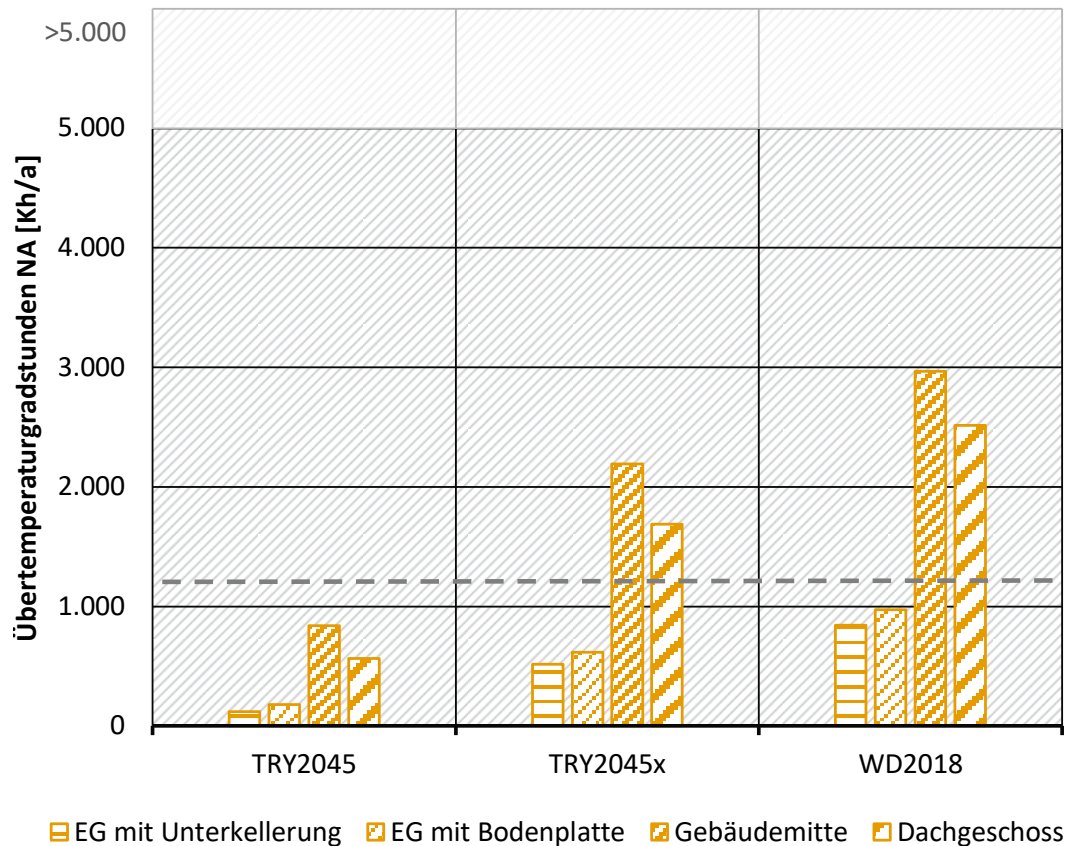
Tabelle 34: Randbedingungen – Lage innerhalb des Gebäudes

Lage im Gebäude	Bauteilaufbau	U-Wert
Raum im Dachgeschoss	Dach 16 cm EPS-Wärmedämmung 20 cm Stahlbeton Gipsputz	0,20 W/m ² K
Raum im Erdgeschoss – ohne Unterkellerung	Bodenplatte Parkett 6 cm Zementestrich 2 cm Trittschalldämmung 40 cm Stahlbeton 6 cm Perimeterdämmung	0,35 W/m ² K
Raum im Erdgeschoss – mit Unterkellerung (unbeheizter Keller in thermischer Hülle)	Decke zum Keller (ungedämmt) Parkett 6 cm Zementestrich 2 cm Trittschalldämmung 20 cm Stahlbeton Außenwand gegen Erdreich 20 cm Stahlbeton 10 cm Perimeterdämmung	0,35 W/m ² K

Die Auswirkungen der Raumlage auf die Übertemperaturgradstunden des Muster-Wohnzimmers zeigt Abbildung 78. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass es sich um eine thermisch-dynamische Simulation des Raumes handelt und keine Whole-Building-Simulation. Die Räume werden also – abgesehen von den in Tabelle 34 angegebenen angrenzenden Bauteilen und der Fassade – als adiabatisch ohne Luftaustausch innerhalb des Gebäudes simuliert. Das bedeutet, dass beim Raum im Dachgeschoss keine Effekte von aufsteigender Wärme darunterliegender Räume oder eines angrenzenden, im oberen Bereich gegebenenfalls stark aufgeheizten Treppenhauses berücksichtigt werden.

Abbildung 78: Lage innerhalb des Gebäudes - Übertemperaturgradstunden Wohnen

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpaket	Energiestandard	Nutzung	Raum	Lage	Bauweise	Fassade
SIM	P	TRY_2045 TRY_2045x WD_2018	West	STD	GEG	Wohnen	Wohnzimmer	Erdgeschoss Gebäudemitte Dachgeschoss	schwer	Lochfassade



Hinweis zum Dachgeschoss: Grundlage ist eine Raum-Simulation, keine Whole-Building-Simulation, daher sind in den ÜTGS keine Effekte von thermischem Auftrieb berücksichtigt, die bei der Dachgeschoss-Position eine wesentliche Rolle spielen können.

Quelle: eigene Darstellung, IBH

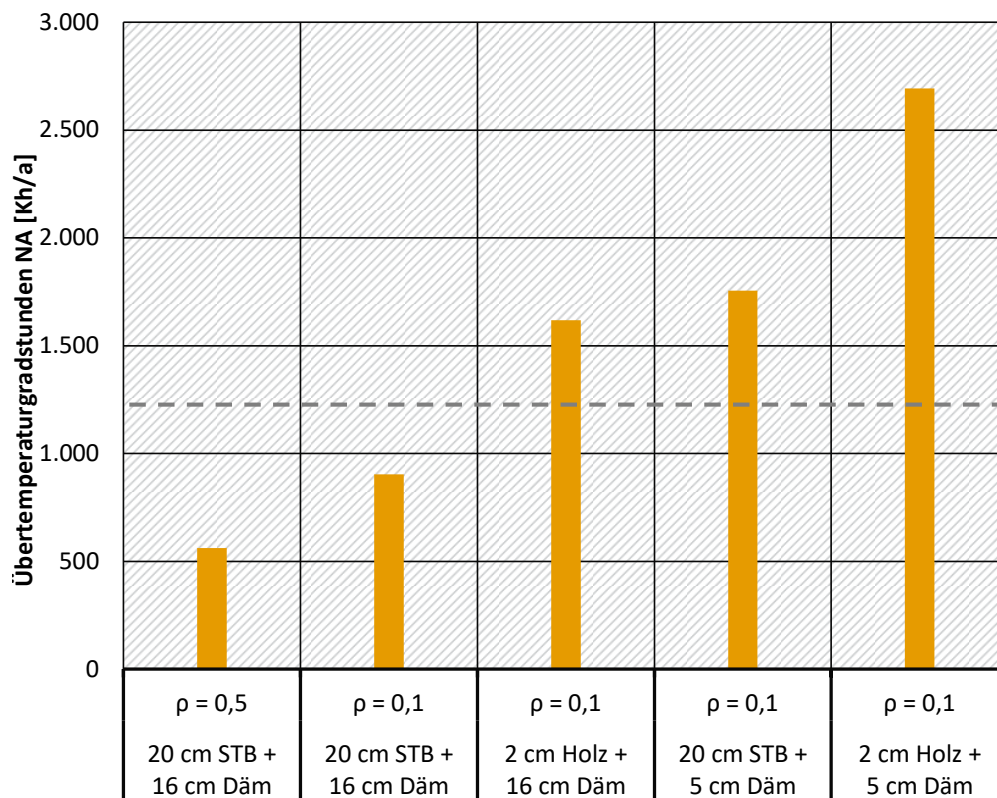
Es lässt sich feststellen, dass die Lage im Gebäude insbesondere bei Räumen im Erdgeschoss äußerst relevant für die Übertemperaturgradstunden ist. Im Durchschnitt weisen die Erdgeschoss-Räume um 75 % reduzierte Übertemperaturgradstunden auf. Die an einen gedämmten - im Winterfall nur indirekt beheizten - Keller anschließenden Räume sind hierbei noch günstiger als die an Erdreich angrenzenden. Die im Vergleich zum Keller kältere Temperatur des Erdreichs kann durch die Dämmung etwas weniger Einfluss auf den Raum nehmen.

Der an das Dach angrenzende Raum weist durch Transmission bei kühler nächtlicher Außenluft auch etwas niedrigere ÜTGS auf als die in der Gebäudemitte liegenden Räume. Das widerspricht Erfahrungen in der Praxis, nach denen Räume im Dachgeschoss besonders von Überhitzung betroffen sind (vgl. Kapitel 3.1.3, (Kunze 2019)). In der bisherigen Betrachtung wurde allerdings von einem hellen Dachbelag mit einem Reflexionsgrad ρ von 50 % ausgegangen. Dunklere Dachmaterialien mit geringerem Reflexionsgrad weisen einen entsprechend höheren Absorptionsgrad auf und erwärmen sich dadurch bei auftretender Solarstrahlung stärker. Wie sich diese

höhere Erwärmung der obersten Dachschicht auf den Innenraum auswirkt, wird in Abbildung 79 für das TRY 2045 dargestellt. Das Flachdach mit 20 cm Stahlbeton und 16 cm Dämmung (vgl. Tabelle 34) weist mit einer dunklen Dachdeckung ($\rho = 10\%$) um gut 60 % mehr Übertemperaturgradstunden als mit dem helleren Dachbelag ($\rho = 50\%$) aus Abbildung 78. Ausgehend von der dunklen Dachoberfläche erhöhen auch der Ersatz des Stahlbetontragwerks durch eine leichte Holzkonstruktion sowie die Reduktion der Dämmung von 16 cm auf 5 cm die Zahl der Übertemperaturgradstunden im Dachraum um rund 80 bzw. 90 % stark. Durch die reduzierte Masse bzw. die geringere Dämmstärke wird die Wärme der aufgeheizten obersten Schicht schneller durch das Bauteil zum Innenraum hin geleitet. Besonders groß ist dieser Effekt, wenn die leichte Holzkonstruktion kaum gedämmt ist, was zu einer Erhöhung um 200 % bezogen auf das dunkle, gut gedämmte Stahlbeton-Dach führt.

Abbildung 79: Materialität des Dachs - Übertemperaturgradstunden Wohnen

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpaket	Energiestandard	Nutzung	Raum	Lage Dachgeschoss	Bauweise	Fassade
SIM	P	TRY_2045	West	STD	GEG	Wohnen	Wohnzimmer	Dach mit unterschiedlicher Reflektion und Dämmung	schwer	Lochfassade



ρ = Reflexionsgrad

Quelle: eigene Darstellung, IBH

Während beim Dach die Stärke der Wärmedämmung also offensichtlich einen beachtlichen Einfluss auf die Überhitzung des Innenraums hat, fällt dieser bei der Dämmung der Außenwände nur sehr gering aus (vgl. Abbildung 69). Hier erhöht sich die Zahl der Übertemperaturgradstunden beim „Altbau – Teilsanierung Innendämmung“ durch das Aufbringen von Dämmung sogar im Vergleich zum „Altbau unsaniert“, und der „GEG-Standard“ weist trotz des geringeren g-Werts der Fenster nur minimal weniger Übertemperaturgradstunden auf als der Altbau. Der deutlich geringere Einfluss der Außenwand im Vergleich zum Dach kann sowohl auf die deutlich geringere Fläche der Außenwand als auch auf die hellere Oberfläche mit geringerer Absorption zurückgeführt werden.

Hier sei nochmals hingewiesen, dass es sich um keine Whole-Building-Simulation handelt. Nur in einer solchen könnten weitere Effekte wie aufsteigende Wärme darunterliegender Räume oder im Treppenhaus berücksichtigt werden.

5.3.5 Wechselwirkung

Die Vorschriften des GEG in Verbindung mit der DIN 4108-2 unterscheiden hinsichtlich Anforderungen und möglichen Maßnahmen nicht zwischen gekühlten und ungekühlten Gebäuden. Nachfolgend soll beispielhaft für den Musterraum des 2-Personen-Büros untersucht werden, ob die Nachtlüftung mit und ohne aktive Kühlung gleichermaßen wirkt.

Der Untersuchung liegt folgende Variante zugrunde:

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmen(pakete)	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	P (Vorort)	TRY_2045	West	(1) ohne Nachtlüftung - ohne Kühlung (2) mit mech. Nachtlüftung - ohne Kühlung (3) ohne Nachtlüftung - mit Kühlung (4) mit mech. Nachtlüftung - mit Kühlung	GEG	Büro	2-P-Büro-raum	leicht	Fensterband

Die gewählten Maßnahmen stellen durch die Fälle mit Kompressionskältemaschine und mechanischer Lüftungsanlage, die für die Tag- und ggf. Nachtlüftung sorgt, eine Sonderuntersuchung in der Parameterstudie dar: Fall (1) entspricht abgesehen von der *mechanischen* Taglüftung dem MIN-Maßnahmenpaket, Fall (2) abgesehen von der *mechanischen* Tag- und Nachtlüftung dem STD-Maßnahmenpaket. Fall (3) entspricht Fall (1) und Fall (4) dem Fall (2), jedoch gibt es hier zusätzlich eine aktive Kühlung über eine strombetriebene Kompressionskältemaschine.

Der Kühlbedarf für den Büroraum wird als ideale Kühlung bei einer Soll-Raumtemperatur von 25 °C simuliert und über einen SEER von 3,5, in welchem auch Hilfsenergien berücksichtigt sind, in den Strombedarf für die Kälteversorgung umgerechnet.

In Tabelle 35 werden die Ergebnisse aufgeführt. Bei den Auswertungen wird der Strombedarf für die Taglüftung, der für alle Fälle gleich ist, nicht betrachtet.

Tabelle 35: Wechselwirkung zwischen Nachtlüftung und aktiver Kühlung – Büroraum

	ÜTGS >26° [Kh/a]	Wärmeabfuhr Nachtlüftung [kWh/a]	Strombedarf Nachtlüftung [kWh/a]	Strombedarf Kühlung [kWh/a]	Strombedarf gesamt [kWh/a]
(1) ohne Nachtlüftung - ohne Kühlung	2.960	-	-	-	0
(2) mit mech. Nachtlüftung - ohne Kühlung	852	474	151	-	151
(3) ohne Nachtlüftung - mit Kühlung	0	-	-	115	115
(4) mit mech. Nachtlüftung - mit Kühlung	0	386	137	58	195

Energieangaben beziehen sich auf den 2-Personen-Büroraum

Im Fall (1), der wie beim MIN-Maßnahmenpaket nur über einen außenliegenden Sonnenschutz verfügt, sind die ÜTGS inakzeptabel hoch – dafür wird keinerlei Strom benötigt. Auch beim Fall (2) sind die ÜTGS trotz der mechanischen Nachtlüftung, mit der 474 kWh/a an Wärme abgeführt werden können, noch deutlich.

Hinsichtlich der Wirksamkeit der Nachtlüftung lässt sich erkennen, dass ohne Kühlung (Fall 2) mit 474 kWh/a eine höhere Wärmeabfuhr durch die Nachtlüftung möglich ist als mit Kühlung mit 386 kWh/a (Fall 4). Dafür reduziert sich auch der Strombedarf für die Nachtlüftung von 151 kWh/a (Fall 2) auf 137 kWh/a (Fall 4). Setzt man diese Werte ins Verhältnis, so können je eingesetzter Kilowattstunde Strom 3,1 kWh Wärme ohne Kühlung (Fall 2) und 2,8 kWh Wärme mit Kühlung (Fall 4) abgeführt werden.¹²

Gleichzeitig lässt sich auch feststellen, dass der jährliche Strombedarf für die passive Kühlung über Nachtlüftung mit 151 kWh (Fall 2) höher ist als bei der aktiven Kühlung mit 115 kWh (Fall 3). Energetisch am ungünstigsten ist die Kombination aus mechanischer Nachtlüftung und aktiver Kühlung mit insgesamt 195 kWh (Fall 4).

5.3.6 Randbedingungen Schule

Die Simulationsrandbedingungen sind wohlüberlegt und praxisnah gewählt. Jedoch können andere Festlegungen unter Umständen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Dies soll an zwei Beispielen untersucht werden, welche die thermische Simulation des Klassenzimmers betreffen: Folgende Auswirkungen sollen untersucht werden:

- Schulnutzung während Ferienzeit
- Keine Möglichkeit einer zusätzlichen Fensteröffnung während Nutzung

Zunächst wird in Abbildung 80 der Unterschied gezeigt, ob von einem Klassenzimmer ohne Nutzung oder mit Nutzung während der Schulferien ausgegangen wird. Je nachdem werden die Sommerferien mit 6 Wochen in den warmen Sommermonaten als Nutzungszeit für die ÜTGS ausgewertet oder nicht. Die blauen Säulen („mit Schulferien“) zeigen die ÜTGS, wie in der Parameterstudie angesetzt, unter Berücksichtigung der Schulferien, d.h. ohne Nutzung des

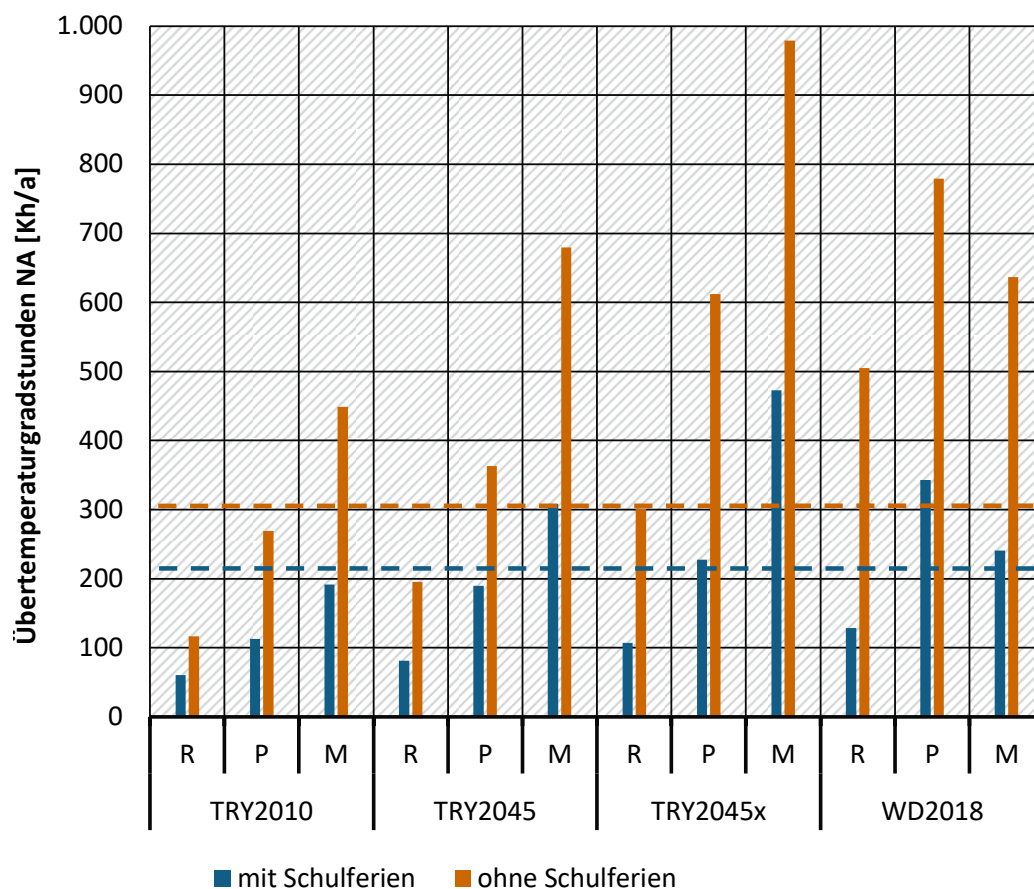
¹² Ergänzend wurden diese Simulationen für den Büroraum mit schwerer Bauweise durchgeführt. Sodann können je eingesetzter Kilowattstunde Strom 3,4 kWh Wärme ohne Kühlung (Fall 2) und 3,2 kWh Wärme mit Kühlung (Fall 4) abgeführt werden.

Klassenzimmers in den Ferien. Die ÜTGS bei Nutzung des Klassenzimmers auch in den Ferienwochen ist in den orangenen Säulen („ohne Schulferien“) dargestellt. Gestrichelt ist der jeweilige Anforderungswert eingezeichnet.

Die ÜTGS unterscheiden sich gravierend und nehmen zum Teil um mehr als 100 % zu. Fünf der blauen Säulen überschreiten den Anforderungswert, acht der orangenen Säulen.

Abbildung 80: Nutzung während der Schulferien - Übertemperaturgradstunden Klassenzimmer

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	R / P / M (Vorort)	TRY_2010 TRY_2045 TRY_2045x WD_2018	West	STD	GEG	Schule Nutzung in Ferien keine Nutzung in Ferien	Klassenzimmer	mittel	Fensterband



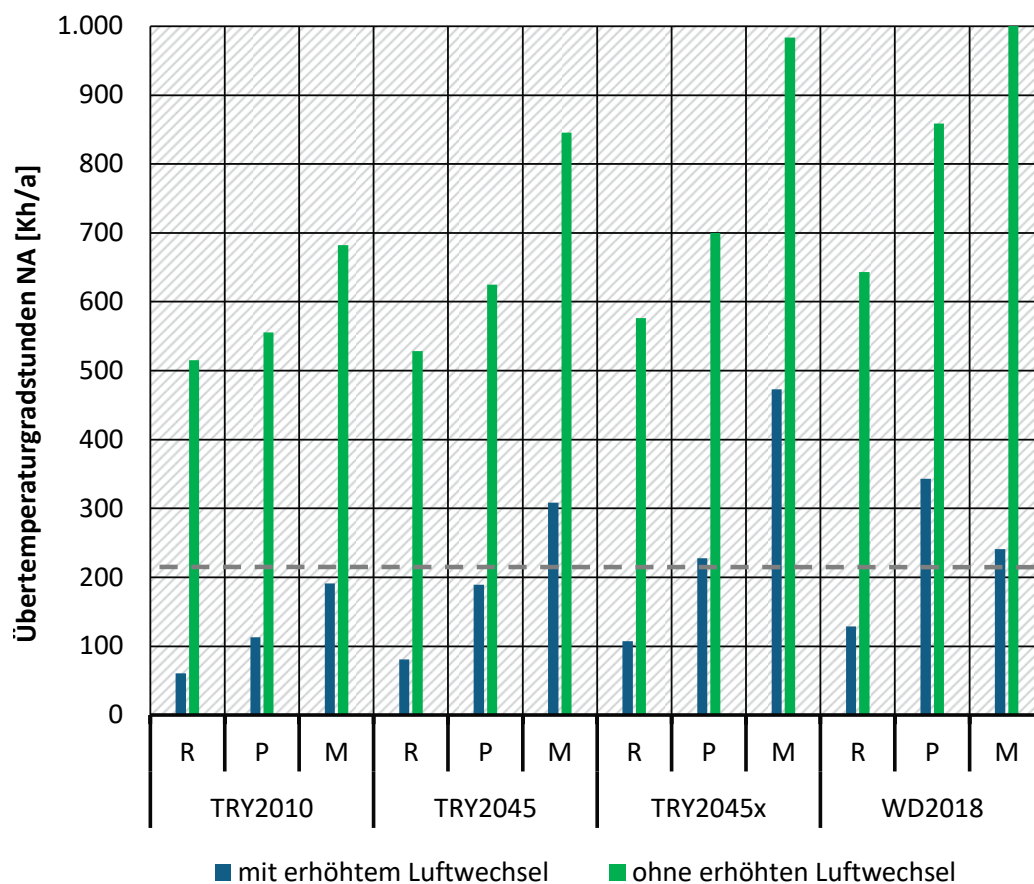
Quelle: eigene Darstellung, IBH

Grundsätzlich wird bei den Klassenzimmer-Simulationen von einer Vollbelüftung über eine RLT-Anlage mit 30 m³/h je Person ausgegangen, woraus sich ein 4,6-facher mechanischer Luftwechsel ergibt. In der Parameterstudie wird jedoch zusätzlich von der Möglichkeit ausgegangen, dass bei zu warmen Raumtemperaturen (über 23 °C) und gleichzeitig kühleren Außentemperaturen die Fenster geöffnet werden, wodurch sich ein Luftwechsel von 3 h⁻¹ zusätzlich zum mechanischen Luftwechsel einstellt. Es kann jedoch Umstände geben, die dem Öffnen der Fenster entgegenstehen, wie beispielsweise, dass die Fenster aus Schallschutzgründen während des Unterrichts nicht geöffnet werden dürfen. In Abbildung 81 sind die ÜTGS für den Vergleich mit und ohne zusätzlichen Fenster-Luftwechsel zu sehen. Die Auswirkung von nicht-öf-fenbaren Fenstern auf die ÜTGS sind als grüne Säulen dargestellt: die ÜTGS nehmen drastisch zu, oft um ein

Vielfaches. Keine der untersuchten Standort- und Klimadatenvarianten mit STD-Maßnahmenpaket kann ohne zusätzliche Fensterlüftung den Anforderungswert einhalten. Daraus lässt sich ableiten, dass für den Fall, dass die Fenster nicht geöffnet werden können, weitere Maßnahmen, entsprechend dem MAX-Paket, für das Abführen der hohen inneren Lasten durch die Personen und für den sommerlichen Wärmeschutz dringend zu ergreifen sind.

Abbildung 81: Öffnbare Fenster - Übertemperaturgradstunden Klassenzimmer

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Maßnahmenpakete	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	R / P / M (Vorort)	TRY_2010 TRY_2045 TRY_2045x WD_2018	West	STD	GEG	Schule ohne / mit erhöhtem Luftwechsel über öffnbare Fenster	Klassenzimmer	mittel	Fensterband



Quelle: eigene Darstellung, IBH

5.3.7 Nutzungsverhalten

Im Kapitel 5.2 gibt es einen Exkurs zum Einfluss des Nutzungsverhalten bei Wohnnutzung, in dem die Auswirkungen von sinnvollem Verhalten und weniger günstigem Verhalten u.a. hinsichtlich Tag- und Nachtlüftung und Bedienung vom Rollladen untersucht werden.

Nachfolgend sollen nicht wie in Kapitel 5.3 die einzelnen Parameter analysiert werden, sondern ein Vergleich zwischen sehr günstigem und sehr ungünstigem Verhalten in Kombination für die Parameter Taglüftung, Nachtlüftung und Bedienung vom Rollladen erfolgen. Das extrem

günstige und extrem ungünstige Verhalten nimmt auf die Bezeichnungen und Kürzel aus Kapitel 5.3 Bezug und wird folgendermaßen abgebildet:

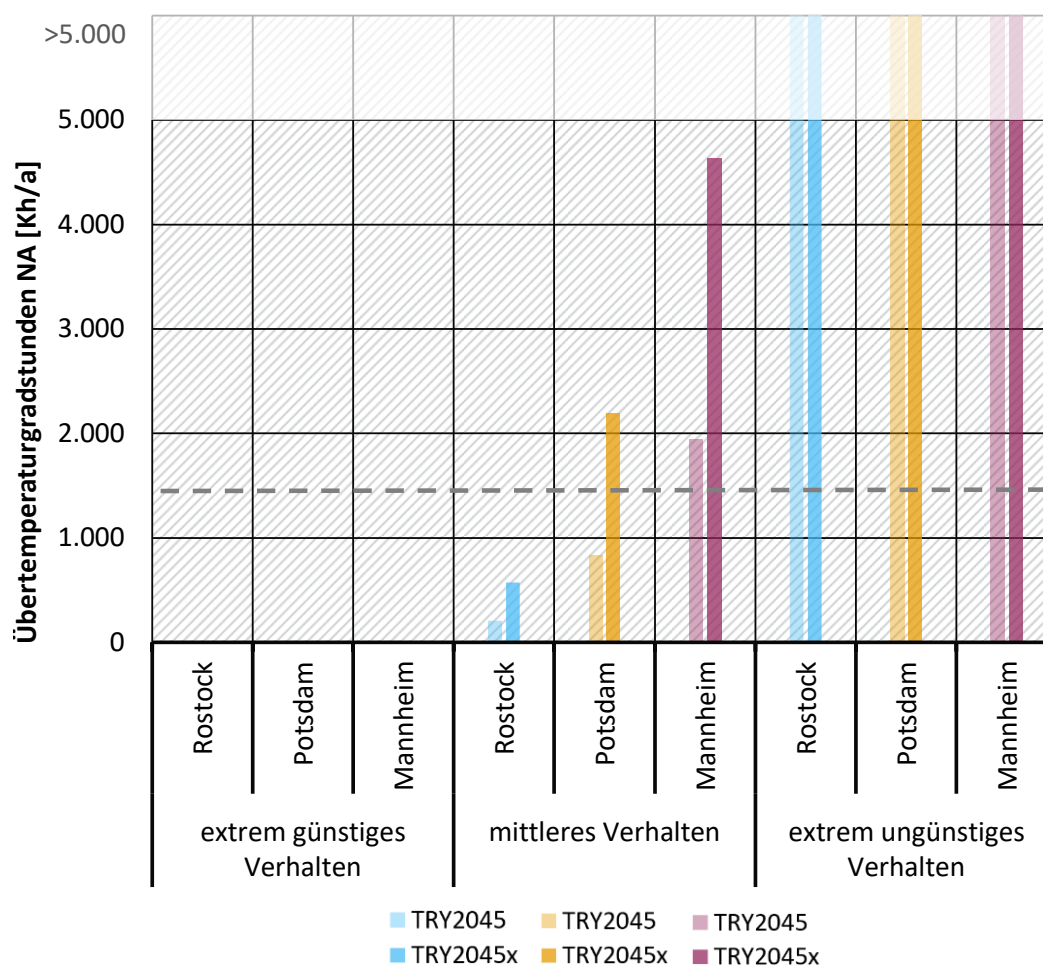
- ▶ extrem günstiges Verhalten: sinnvolles temperaturabhängiges Lüften (T2), nächtlicher Viellüfter (N1), herunter gelassener Rollladen während Abwesenheit (S3)
- ▶ extrem ungünstiges Verhalten: Wenig-Lüfter (T4), nächtlicher Wenig-Lüfter (N3), offener Rollladen während Abwesenheit (S4)

Als „mittleres“ Verhalten werden die in der Parameterstudie gewählten Ansätze bezüglich Taglüftung, Nachtlüftung und Bedienung vom Rollladen bezeichnet.

Abbildung 82 zeigt den hohen Einfluss des Nutzungsverhaltens: beim extrem günstigen Verhalten gibt es keine Übertemperaturgradstunden, beim extrem ungünstigen Verhalten selbst für den Standort Rostock weit über 10.000 Kh/a (nicht mehr dargestellt).

Abbildung 82: Einfluss des Nutzungsverhaltens – Übertemperaturgradstunden Wohnzimmer

Methode	Standort	Klimadaten (TRY)	Orientierung	Nutzereinfluss	Energiestandard	Nutzung	Raum	Bauweise	Fassade
SIM	R / P / M (Vorort)	TRY_2045	West	extrem günstiges, mittleres und extrem ungünstiges Verhalten (bzgl. Tag-, Nachtlüftung, Bedienung Rollladen)	GEG	Wohnen	Wohnzimmer	schwer	Lochfassade



Quelle: eigene Darstellung, IBH

5.4 Diskussion Basis- und Detailuntersuchung

Die Ergebnisse sind nur in Bezug auf die getroffenen Randbedingungen interpretierbar. Wichtige Festlegungen bei der Methodik und den Randbedingungen sollen deshalb in diesem Kapitel aufgegriffen, diskutiert und hinsichtlich des jeweiligen Einflusses und ihrer Plausibilität eingeschätzt werden. Als besonders beachtenswerte Diskussionspunkte werden hierfür die TRY 2017, die sich allein auf die Raumtemperatur konzentrierende Komfortbewertung, die Auswertung nach dem NA-Komfortband die raumweise Simulation und allgemein die Übertragbarkeit der Ergebnisse ausgewählt.

5.4.1 Klimadaten

Bezugnehmend auf Kapitel 3.6.3 soll die Aussagekraft der verwendeten Klimadaten diskutiert werden. Die zugrunde gelegten Klimadaten, die Sommer im Klimawandel abbilden sollen, haben wesentlichen Einfluss auf die Erkenntnisse, die aus den umfangreichen thermischen Simulationen gezogen werden können. Aus diesem Grund wurde in Kapitel 3.6 der aktuellste zur Verfügung stehende TRY 2017-Klimadatensatz (DWD 2020b, DWD 2017), analysiert und darauf basierend eine Auswahl für die Parameterstudie getroffen. Die Verwendung des TRY 2017-Klimadatensatzes mit ortsgenauen TRY wird wegen ihrer verbreiteten Anwendung für thermische Gebäudesimulationen in Deutschland für die Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit als folgerichtig eingeschätzt.

Ob das Zukunfts-Testreferenzjahr TRY2045 des TRY 2017-Klimadatensatzes nach derzeitigem Kenntnisstand geeignet ist, die Periode 2031 bis 2060 abzubilden, ist hierbei nicht die entscheidende Fragestellung und kann im Rahmen dieser Studie auch nicht beantwortet werden. Mittels der Analysen von Durchschnittstemperatur im Sommerhalbjahr, der Anzahl von Sommertagen u.a., konnte zumindest gezeigt werden, dass sich die TRY2045 und TRY2045x dazu eignen, gegenwärtige durchschnittliche und warme Sommer abzubilden: die Mitteltemperaturen des Sommerhalbjahrs der TRY2045 und TRY2045x liegen nämlich über denen der gemittelten Wetterdaten von 2011 bis 2020.¹³ Für eine bessere Einschätzbarkeit wurde die TRY-Auswahl in der Parameterstudie auch noch um die Wetterdaten des besonders warmen Sommers 2018 ergänzt. Die Auswertung der Übertemperaturgradstunden zeigte zumeist für letztere die meisten Übertemperaturgradstunden und nicht für das extrem warme Zukunftsjahr TRY2045x. Es bleibt daher eine Ungewissheit bestehen, welchen Abschnitt im Klimawandel diese Studie abbildet. Auch hinsichtlich der weiteren Entwicklung der Globalstrahlung besteht Unsicherheit¹⁴.

In den 5 Jahren, die seit der Veröffentlichung des TRY 2017-Klimadatensatzes vergangen sind, hat sich die DWD-Datenlage von Wettermessungen weiter verbessert, und auch die Auswirkungen des Klimawandels können durch neue Erkenntnisse der letzten Jahre noch besser eingeschätzt werden. Derzeit steht die Aktualisierung der DWD-TRY im Auftrag des BBSR an, die voraussichtlich im Jahr 2024 wieder als ortsgenaue TRY erscheinen werden. Erst im Vergleich zu diesen wird man beurteilen können, inwieweit die TRY2045 und TRY2045x noch als repräsentativ angesehen werden können.

¹³ Die diesbezügliche Problematik besteht darin, dass Klimadaten keine Wetterdaten sind und Wetterdaten, zwar die Basis für Klimadaten bilden, aber keine Klimadaten sind. Klimadaten werden i.d.R. auf Basis einer 30-jährigen Klimanormalperiode gebildet.

¹⁴ Im Sommer 2022 überragte die Sonnenscheindauer im Sommer ihr langjähriges Mittel im Vergleich zur Periode 1961 bis 1990 um knapp 34 Prozent. (www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2022/20220830_deutschlandwetter_sommer2022_news.html). Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung schreibt bezugnehmend auf eine eigene Studie, dass wegen Veränderungen des Jetstreams Hitzewellen über Europa drei- bis viermal schneller zugenommen haben als in den übrigen nördlichen mittleren Breitengraden, wie etwa in den USA oder Kanada (www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/mehr-hitzewellen-in-westeuropa-wegen-veraenderungen-des-jetstreams).

Nach Erscheinen des TRY 2024-Klimadatensatzes wird daher empfohlen, die entsprechenden ortsgenauen Zukunfts-TRY zu analysieren und ausgewählte Teile der Parameterstudie auf dieser Basis zu aktualisieren. Dies würde helfen, die angesprochene Ungewissheit zu verkleinern und eine bessere Einordnung der Ergebnisse zu ermöglichen.

5.4.2 Auswertung der Raumtemperatur (Übertemperaturgradstunden)

In der Parameteruntersuchung wird die Raumtemperatur in Form von Übertemperaturgradstunden ausgewertet, die Luftbewegung im Raum und die Luftfeuchte fließen nicht in die Bewertung ein. Diese beiden Größen haben jedoch erheblichen Einfluss auf das Behaglichkeits- beziehungsweise Überhitzungsempfinden. Nachfolgend werden Hintergrundinformationen zu den Zusammenhängen und zu möglichen Auswirkungen bei Variation dieser beiden Parameter gegeben.

5.4.2.1 Einfluss der Luftgeschwindigkeit

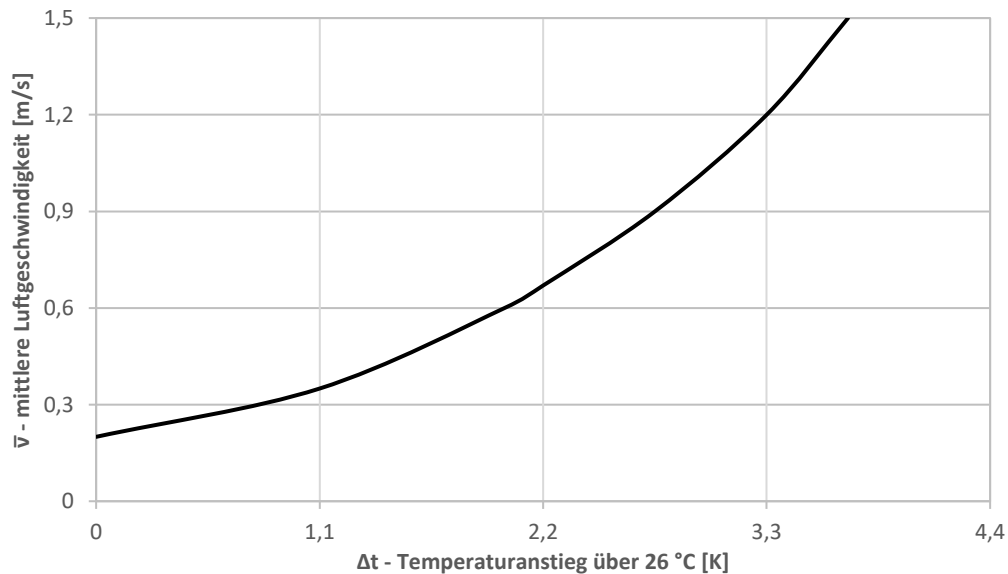
Die Bewegung der Luft im Raum spielt eine wesentliche Rolle für das Behaglichkeitsempfinden, weil sie den konvektiven Wärmeaustausch zwischen Person und Umgebung beeinflusst. Deshalb kann die Erhöhung der Luftgeschwindigkeit durch Einsatz von Ventilatoren oder durch Querlüftung über Fenster eine effektive Maßnahme zum sommerlichen Wärmeschutz darstellen.

Luftgeschwindigkeit und konvektiver Wärmeaustausch

Der Einfluss der Luftgeschwindigkeit wird in die Berechnung des PMV nach DIN EN ISO 7730 einbezogen. Hierbei geht die relative Luftgeschwindigkeit indirekt über die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten ein (vgl. Kapitel 3.3.4). Im Anhang G der DIN EN ISO 7730 zeigt eine Grafik die Kombination aus Luftgeschwindigkeit und Temperatur mit gleichem Wärmeübergang von der Haut - ausgehend von 26 °C Lufttemperatur und 0,20 m/s Luftgeschwindigkeit für den Fall einer üblichen Sommerbekleidung (0,5 clo) bei sitzender Tätigkeit (1,2 met). In Abbildung 83 wird aus der beschriebenen Grafik die Beispielkurve für den Fall dargestellt, dass Lufttemperatur und mittlere Strahlungstemperatur der raumumschließenden Flächen¹⁵ identisch sind.

¹⁵ Nach DIN EN ISO 7730 ist der relative Unterschied zwischen der Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur für diese Einschätzung bedeutend und es werden auch Kurven für relative Unterschiede von -10, -5, +5 +10 °C gegeben (s. DIN EN ISO 7730 Bild G.1 - Erforderliche Luftgeschwindigkeit, um eine erhöhte Temperatur auszugleichen).

Abbildung 83: Erforderliche Luftgeschwindigkeit zum Ausgleich einer Temperaturerhöhung nach DIN EN ISO 7730



Der Kurvenverlauf zeigt den Fall, dass die Lufttemperatur gleich der mittleren Strahlungstemperatur der raumumschließenden Flächen ist.

Quelle: DIN EN ISO 7730, eigene Darstellung

Ein Temperaturanstieg von 26 °C auf 28 °C (Anstieg um 2 K) könnte bei den beschriebenen Randbedingungen durch eine Verdreifachung der Luftgeschwindigkeit von 0,2 auf 0,6 m/s, und eine Temperaturerhöhung um 3,3 K durch eine Versechsfachung der Luftgeschwindigkeit von 0,2 auf 1,2 m/s ausgeglichen werden (vgl. Abbildung 83). DIN EN ISO 7730 weist darauf hin, dass im Hinblick auf die bevorzugte Luftgeschwindigkeit große individuelle Unterschiede zwischen den Personen bestehen.

Eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit im Raum kann durch den Einsatz von Ventilatoren erreicht werden, aber auch Fensteröffnungen, insbesondere bei Querlüftung, können die Luftbewegung deutlich erhöhen. Nachfolgend werden hierfür einige Beispiele aufgeführt:

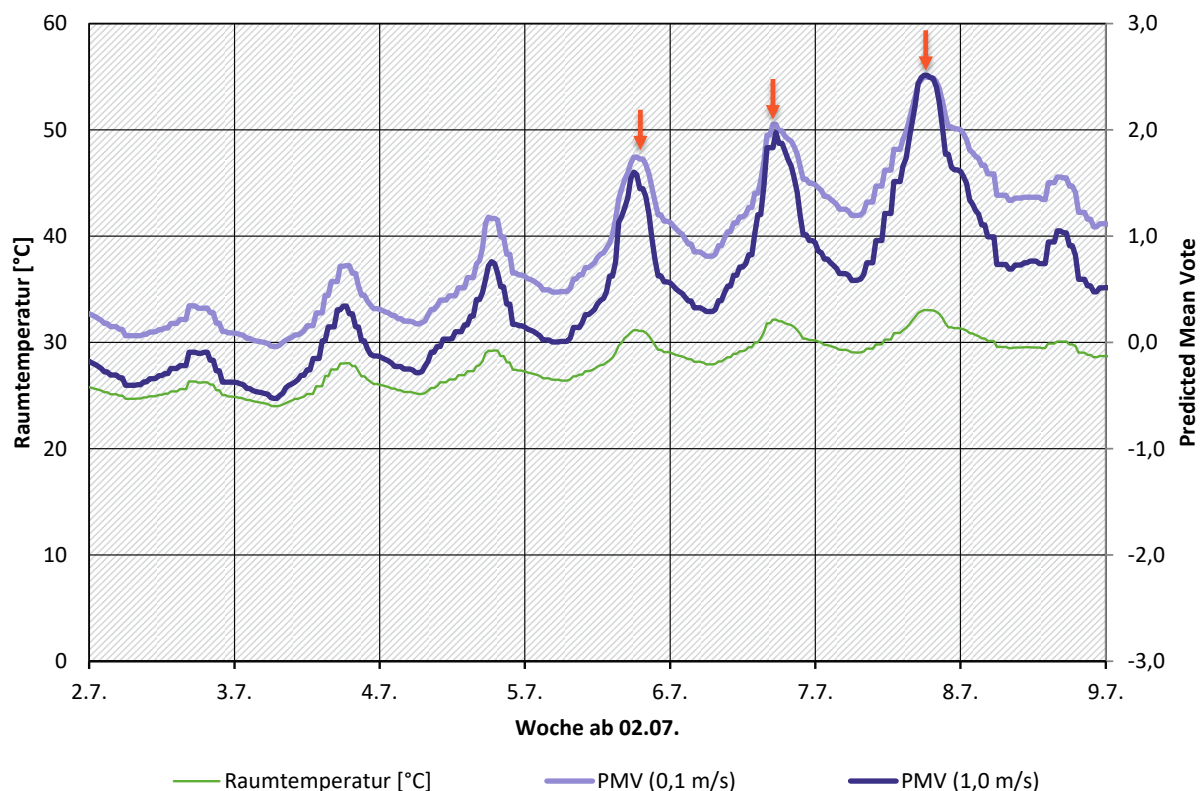
- ▶ **Tisch- Stand- oder-Deckenventilatoren:** Bei einem Vergleich von vier ausgewählten Tischventilatoren (Becker 2022) führen die Datenblätter maximale Windgeschwindigkeiten in 2 m Abstand zwischen 1,8 und 2,5 m/s bei Leistungsaufnahmen von 12 bis 40 W auf. Zwei dieser Ventilatoren sind ab einer minimalen Geschwindigkeit von 0,1 m/s regulierbar. Deckenventilatoren können teilweise noch höhere maximale Leistungsaufnahmen haben: Ein Vergleich von 13 Deckenventilatoren (Strenziok 2022) zeigt maximale Leistungsaufnahmen zwischen 27 W und 65 W für Raumgrößen zwischen 12 und 40 m² bei maximalen Volumenströmen zwischen 118 und 249 m³/min. Jeder der aufgeführten Deckenventilatoren verfügt über mindestens drei Geschwindigkeitsstufen. Angaben zu Luftgeschwindigkeiten fehlen in den Datenblättern der Deckenventilatoren. (Tartarini et al. 2022) erwähnt einen Standventilator, der auf höchster Stufe 4,5 m/s bei einem Abstand von einem Meter erzeugen kann, ergänzt aber, dass die meisten Tisch-, Decken-, oder Standventilatoren nicht so hohe Geschwindigkeiten erreichen können.
- ▶ Die Erhöhung der Luftgeschwindigkeit kann auch natürlich durch Fensteröffnungen erfolgen. Die resultierende Luftbewegung hängt neben der Größe und Anordnung der Öffnungen von physikalischen Effekten, wie dem Auftrieb als Folge von Temperaturunterschieden und von Winddruckdifferenzen, ab. Windinduzierte Luftbewegung entsteht durch Überdruck an

der Wind zugewandten Seite und Unterdruck an der Wind abgewandten Seite. Durch entsprechende Planung der Öffnungen (Nutzung Kamineffekt, Querlüftung) können diese Effekte verstärkt werden. (Holzer et al. 2017) Es können jedoch wegen der Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und -richtung keine definierten Luftgeschwindigkeiten eingestellt werden. Es können sogar Wetterlagen auftreten, bei denen trotz bestehender Querlüftungsmöglichkeit kaum bzw. keine Luftbewegung entsteht. Daher gibt es auch Konzepte, bei denen die natürliche Lüftung mechanisch durch Ventilatoren unterstützt wird (Hybride Lüftung).

(Hinweis: Bei der Auslegung von mechanischen Lüftungsanlagen werden die Raumlufgeschwindigkeiten absichtlich gering gehalten ($< 0,2 \text{ m/s}$ in Personennähe), damit es nicht zu Zugserscheinungen kommt. Lüftungsanlagen werden daher i.d.R. nicht genutzt, die Behaglichkeit über erhöhte Luftbewegung zu erhöhen.)

Nachfolgend soll der Einsatz eines Ventilators mittels thermischer Simulation einer warmen Beispiel-Sommerwoche untersucht werden, indem die Auswirkung auf den PMV bei einer Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m/s}$ (ohne Ventilator) auf 1 m/s (mit Ventilator) ausgewertet wird (s. Abbildung 84).

Abbildung 84: Auswirkung der Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von $0,1$ auf $1,0 \text{ m/s}$ auf den PMV für eine exemplarische Sommer-Woche (am Beispiel Wohnzimmer West – Potsdam TRY2045 mit MIN-Maßnahmenpaket)



Quelle: IBH, eigene Darstellung

Durch die Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m/s}$ auf $1,0 \text{ m/s}$ wird der PMV in der beispielhaft dargestellten Woche durchschnittlich um etwa $0,5$ der siebenteiligen

Komfortbewertung gesenkt. So wird der Raum beispielsweise am frühen Morgen des 6.7. mit einer Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s als etwas warm, und bei einer Luftgeschwindigkeit von 1 m/s zwischen neutral und etwas warm empfunden. Je höher jedoch die Raumtemperatur, desto schwächer fällt der Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf den PMV aus. Bei über 30 °C kann der Unterschied verschwindend klein werden oder gänzlich verschwinden. Dies hängt mit der Wärmeabgabe des Menschen über die Haut durch Konvektion zusammen, welche nur möglich ist, wenn die Raumlufttemperatur niedriger als die Hauttemperatur ist.

Was bei der Berechnung des PMV nicht einfließt, ist die Wärmeabgabe durch Verdunstungskühlung auf der Haut, wie sie bei Schweißbildung auftritt. So steht in (Holzer et al. 2017), dass bewegte Luft den Verdunstungseffekt der Haut verstärkt und somit die empfundene Temperatur um bis zu vier Grad Celsius senken kann. Der Einfluss der Evaporation, wie sie verstärkt bei Aufenthalt in sehr warmen Räumen auftreten kann, soll nachfolgend -als kleiner Exkurs- noch kurz betrachtet werden.

Luftgeschwindigkeit, Konvektion und Evaporation

Theoretisches Wissen über die Zusammenhänge hat schon (Gagge et. al 1971) in Form von Wärmebilanz-Formeln zusammengestellt, in denen auch die Evaporation berücksichtigt wird. Mit diesen kann berechnet werden, ob bei bestimmten Raumtemperatur-Raumfeuchte-Kombinationen der Einsatz eines Ventilators sinnvoll ist.¹⁶

Bei der Auswertung von Fachliteratur ist (Tartarini et al. 2022) oft auf die Aussage gestoßen, dass Ventilatoren nur bis 35 °C eingesetzt werden sollen, da ansonsten die zugeführte bewegte Luft wärmer ist als die Oberflächentemperatur der Haut und so dem Körper zusätzlich Wärme zugeführt wird. Dieser Hinweis ignoriert aber die höhere Evaporation von Schweiß bei höherer Luftbewegung. Eine erhöhte Luftgeschwindigkeit von 0,8 m/s erhöht bei Raumluftfeuchten von größer 22% die kritische Temperatur für Hitzebelastung um durchschnittlich 1,4 K. Bei niedrigeren Luftfeuchten würde Schweiß auch ohne Luftbewegung schon sehr gut verdunsten und der Ventilator hätte für die Evaporation keinen weiteren Effekt. (Tartarini et al. 2022)

In mehreren Veröffentlichungen, die in (Tartarini et al. 2022) zusammengestellt sind, wird der Effekt von erhöhter Luftgeschwindigkeit auf den Körper experimentell untersucht. Beispielsweise konnten (Morris et al. 2019, zitiert nach Tartarini et al. 2022) zeigen, dass bei 40 °C und einer relativen Feuchte von 51 % die Körpertemperatur durch Luftbewegung gesenkt werden kann. (Ravanelli et. al 2015, zitiert nach Tartarini et al. 2022) haben eine Senkung der Körpertemperatur und des Pulses durch Luftbewegung bei 42 °C und 50 % relativer Luftfeuchte, sowie bei 36 °C und 80 % relativer Luftfeuchte gemessen. Von (Gagnon et al. 2017, zitiert nach Tartarini et al. 2022) wurden Versuche bei 42 °C und 30-70 % Feuchte durchgeführt. Durch einen Ventilator erzeugte Luftbewegung hat bei Personen im Alter von 61 bis 72 Jahren hierbei den Puls erhöht, bei jüngeren Menschen zwischen 21 und 30 Jahren nicht. Dies sei auf die verminderte Schweißbildung bei Älteren zurückzuführen.

Andere Veröffentlichungen betonen die Abhängigkeit von der Feuchtkugeltemperatur, also die niedrigste über Verdunstungskühlung erreichbare Temperatur, für das Entstehen von Hitzestress im Körper. Bei hohen Feuchtkugeltemperaturen ist eine Körperkühlung durch Schwitzen und Verdunstung nicht mehr möglich. Eine Feuchtkugeltemperatur von über 35 °C¹⁷ wird in

¹⁶ (Tartarini et al. 2020) haben diese Informationen in Form einer Online-Grafik zusammengestellt, bei welcher Luftgeschwindigkeiten, Stoffwechselrate und Wärmeisolation der Bekleidung variiert werden können.

¹⁷ Eine Feuchtkugeltemperatur von 35 °C ergibt sich z.B. bei einer Lufttemperatur von 35 °C und 100% relativer Luftfeuchte, 40 °C und 70% relativer Luftfeuchte oder 45 °C und 50 % relativer Luftfeuchte.

(Sherwood, Huber 2010) als Grenze genannt, die ein Mensch ohne Aktivität nur wenige Stunden überleben kann. (Vecellio et al. 2022) haben Messungen der Körperkerntemperatur an jungen Menschen bei hohen Feuchtkugeltemperaturen durchgeführt. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die von (Sherwood, Huber 2010) genannte 35 °C-Feuchtkugeltemperaturgrenze tatsächlich wohl zu hoch angesetzt ist und zudem von den jeweiligen klimatischen Verhältnissen abhängt.

Dieser Exkurs zeigt, dass es verschiedene Ansätze gibt, wie die Verdunstungskühlung auf der Haut mit und ohne Konvektion eingeschätzt werden kann. Bei vielen Studien geht es letztlich um eine Einschätzung, wann gesundheitsgefährdender Hitzestress auftritt. In vielen Fällen scheint auch bei hohen Raumtemperaturen eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit sinnvoll zu sein.

5.4.2.2 Einfluss der Raumlufffeuchte

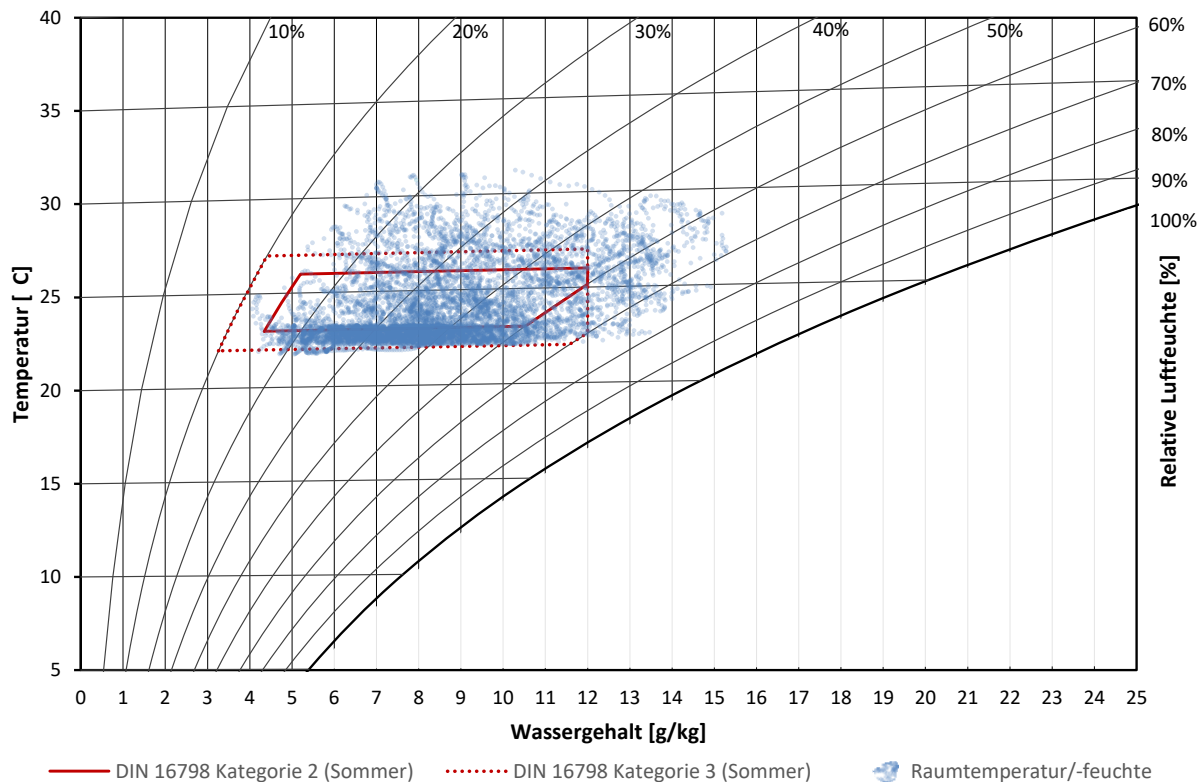
Wie im vorangegangenen Kapitel schon beschrieben, hat auch die Raumlufffeuchte einen großen Einfluss auf das Komfortempfinden. Eine Auswertung von Simulationsergebnissen, welche die absolute oder relative Feuchte einbezieht, ist möglich. Behaglichkeitsdiagramme in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte hat 1975 schon W. Frank¹⁸ veröffentlicht.

Nachfolgend wird eine andere Darstellungsform gewählt. Hierfür werden die Behaglichkeitsbereiche für die Kühlperiode nach Anhang B der DIN EN 16798-1 in ein vereinfachtes h-x-Diagramm eingezeichnet, das die absolute Raumtemperatur, die absolute Feuchte (=Wassergehalt) und die relative Feuchte enthält (s. Abbildung 85). Rot eingezeichnet sind die Temperatur- und Feuchtebereiche der Kühlperiode für Kategorie II (23 bis 26 °C / 25 bis 60 %) und Kategorie III (22 bis 27 °C / 20 bis 70 %). Zudem wird nach DIN EN 16798-1 empfohlen, die absolute Feuchte auf 12 g/kg zu begrenzen.

In Abbildung 85 ist beispielhaft jeder Stundenmittelwert für Temperatur und Feuchte von der Simulation des Wohnzimmers mit STD-Maßnahmenpaket, Standort Potsdam, Sommerhalbjahr des TRY2045x eingezeichnet, so dass sich eine Punktwolke ergibt.

¹⁸ Vgl. Frank W. (1975), Raumklima und Thermische Behaglichkeit. In: Berichte aus der Bauforschung, Band 104, Berlin. In den Diagrammen werden behagliche, noch behagliche, zu trockene und zu feuchte Bereiche ausgewiesen.

Abbildung 85: Beispielhafte Temperatur-Feuchte-Auswertung eines Simulationsergebnisses mit eingezeichneten Grenzen für Kategorie II und III der DIN EN 16798-1 (Kühlperiode)



Randbedingungen: Stundenmittelwerte Raumtemperatur und -feuchte der Simulation des Wohnzimmer-Musterraums mit STD-Maßnahmenpaket, TRY2045x Standort Potsdam, Sommerhalbjahr Mai bis Okt.

Quelle: IBH, eigene Darstellung

Für klimatisierte Räume nach Kategorie II wären demnach alle Temperaturen oberhalb der durchgezogenen roten 26°-Linie zu warm und die Raumfeuchten größer 12 g/kg bzw. mehr als 60 % zu feucht. Was unter medizinischen Gesichtspunkten eine sinnvolle Feuchte-Grenze ist, müsste jedoch noch geklärt und festgelegt werden.

Diskussion - Auswertegröße Raumtemperatur

Bei der Auswertung der Simulationen der Parameterstudie liegt der Fokus auf der resultierenden operativen Raumtemperatur. Dadurch werden andere Größen, die das Behaglichkeitsempfinden beeinflussen, außer Acht gelassen. In die Auswertung könnte beispielsweise auch die Raumfeuchte, die ebenfalls als Simulationsergebnis vorliegt, einbezogen werden. Eine Bewertung der Feuchtedaten ist allerdings bei der Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes nicht üblich, könnte aber als zusätzliche Information bereitgestellt werden (z.B. als Stundenanzahl mit mehr als 65 % relativer Feuchte). Dies könnte bei feuchten Standorten eine wertvolle Ergänzung sein. Des Weiteren wird in den Simulationen die Luftgeschwindigkeit im Raum konstant mit 0,1 m/s angesetzt. Eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit durch (Quer-)Lüftung oder Ventilatoren kann durch die damit einhergehende stärkere Konvektion und Wärmeabgabe über die Haut das Behaglichkeitsempfinden erhöhen. Bei steigenden Raumtemperaturen nimmt durch einsetzende Schweißbildung auch die Bedeutung von Verdunstungskühlung auf der Haut zu. Die Verdunstungsrate hängt wiederum von der Luftfeuchte und der Luftgeschwindigkeit ab.

5.4.3 Auswertung auf Basis des NA-Komfortbands

Im Rahmen der Parameterstudie wurden ausführlich die Vor- und Nachteile verschiedener in DIN-Normen beschriebener Methoden zur Bestimmung von Übertemperaturgradstunden bzw. Übertemperaturhäufigkeit diskutiert (vgl. Kapitel 3.5). Nach Abwägung wurde das Komfortband des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 als Bezugskomfortband gewählt.

Auf Basis der Erkenntnisse aus der Parameterstudie soll nun eine Einordnung der Auswertung nach NA versucht werden:

► Abhängigkeit der Ergebnisse vom Komfortband

Anhand eines Vergleichs der sich ergebenden Übertemperaturgradstunden soll der Einfluss des NA-Komfortbands eingeschätzt werden. Abbildung 86 zeigt die ÜTGS nach Nationalem Anhang verglichen mit den starren Bezugswerten für die Raumtemperaturen, wie sie je nach Sommerklimaregion in der DIN 4108-2¹⁹ festgelegt sind. Nach DIN 4108-2 liegen die Bezugsgrenzen hier für Rostock bei 25 °C, für Potsdam bei 26 °C und für Mannheim bei 27 °C. Abbildung 86 können die Unterschiede der NA- und DIN 4108-2-ÜTGS für den westorientierten Wohnzimmer-Modellraum als zwei direkt aneinander liegende Balken für verschiedene Maßnahmenpakete und Klimadaten entnommen werden.

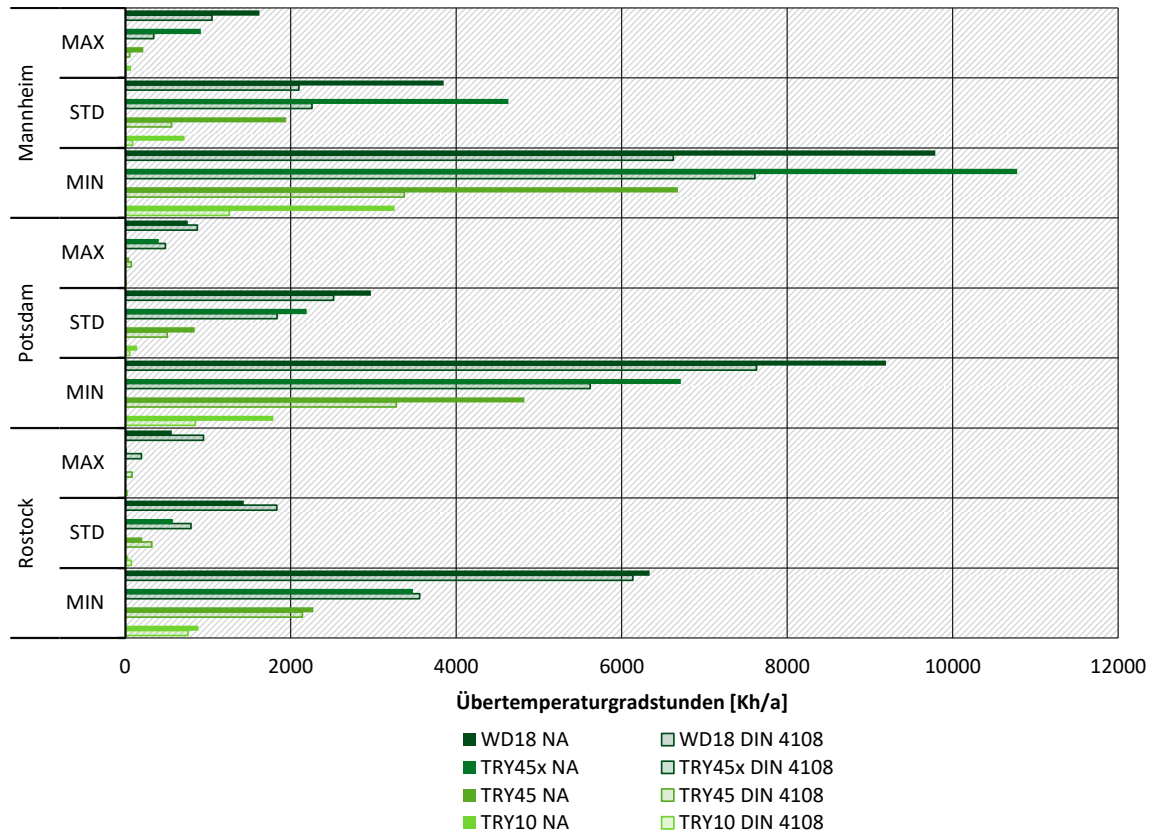
Für den Standort Mannheim liegen die NA-ÜTGS deutlich höher als die mit Bezugsgrenze 27 °C. Obwohl nach dem NA-Komfortband bei hohen Außentemperaturen maximale Raumtemperaturen bis 28 °C zulässig sind, liegen die Raumtemperaturen im niedrigen Außentemperaturbereich gleitend bis hin zu einer maximalen Raumtemperatur von 24 °C im Komfortbereich. Dieser untere Wert von 24 °C maximaler Raumtemperatur und das gleitende Komfortband sind für die Abweichung von über 50 % verantwortlich. Für Rostock liegen die NA-ÜTGS meist unter denen mit fester Bezugsgrenze von 25 °C. Das ist darauf zurückzuführen, dass in Rostock die gleitende NA-Komfortgrenze bei heißen Außenlufttemperaturen bis zu 3 K über der festen Bezugsgrenze von 25 °C, aber maximal 1 K unter der festen Bezugsgrenze von 25 °C für Rostock liegen kann.

Beim Standort Rostock liegen die ÜTGS - insbesondere beim MIN-Maßnahmenpaket – insgesamt aber nah beieinander. Auch bei Potsdam mit STD- und MAX-Maßnahmen gibt es nur geringfügige Unterschiede.

¹⁹ Bezug genommen wird im Rahmen dieser Studie immer auf die Version DIN 4108-2:2013-02.

Abbildung 86: Vergleich Übertemperaturgradstunden nach NA und DIN 4108-2 (Wohnzimmer mit Westorientierung)

ÜTGS mit Bezug auf das Komfortband des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 im Vergleich zur Auswertung mit festen Bezugswerten der operativen Innentemperaturen (25 °C Rostock / 26 °C Potsdam / 27 °C Mannheim) nach DIN 4108-2

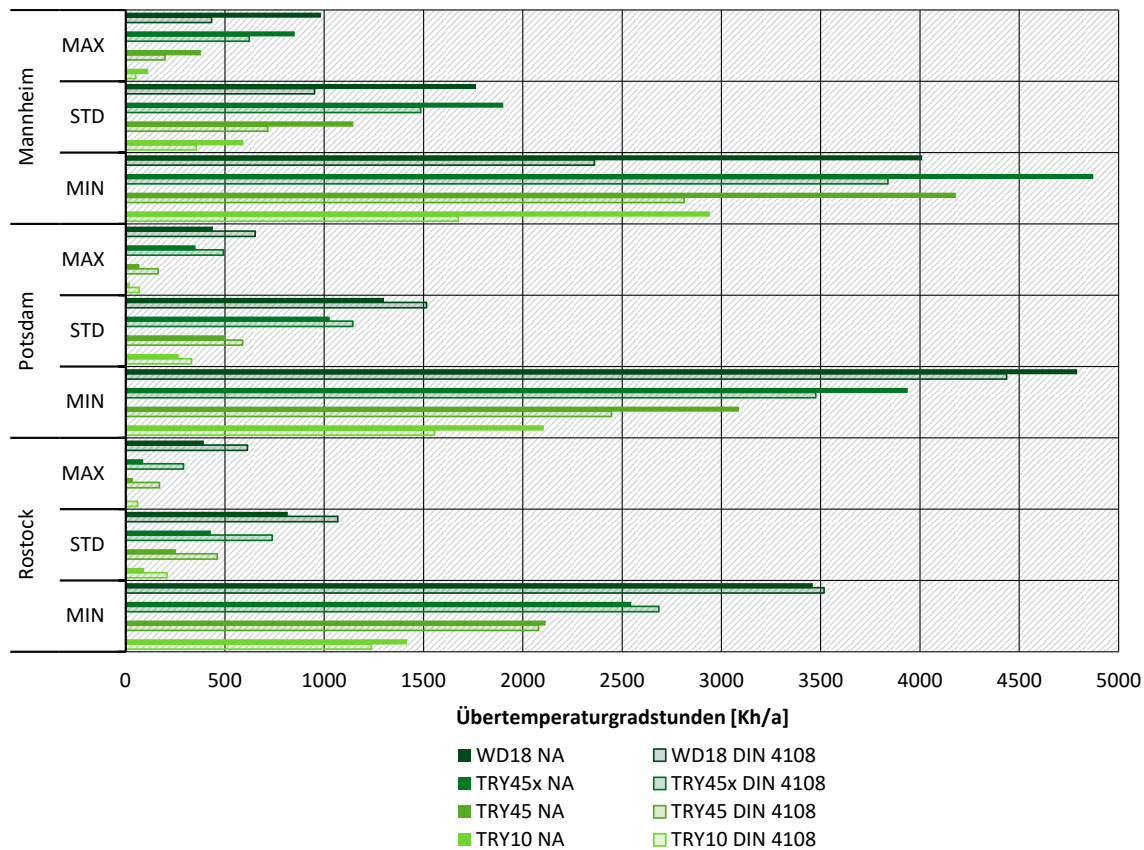


Quelle: IBH, eigene Darstellung

Abbildung 87 zeigt die analoge Darstellung für den Büro-Modellraum. Auch hier liegen die NA-ÜTGS des Standorts Mannheim deutlich über den nach DIN 4108-2 ausgewerteten ÜTGS. Ebenso zeigen die ÜTGS beim Standort Rostock mit MIN-Maßnahmenpaket wenig Abweichung.

Abbildung 87: Vergleich Übertemperaturgradstunden nach NA und DIN 4108-2 (Büro mit Westorientierung)

ÜTGS mit Bezug auf das Komfortband des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1 im Vergleich zur Auswertung mit festen Bezugswerten der operativen Innentemperaturen (25 °C Rostock / 26 °C Potsdam / 27 °C Mannheim) nach DIN 4108-2



Quelle: IBH, eigene Darstellung

Insgesamt lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

► Vorteile Komfortband NA

Durch den Bezug zur Außentemperatur ist das NA-Komfortband vermutlich nah am menschlichen Komfortempfinden, das sich auch an seiner freien (nicht konditionierten) Umgebung orientiert. Bei wärmeren Standorten (Sommerklimaregion C) ergeben sich deutlich höhere ÜTGS, so dass hier mehr Maßnahmen ergriffen werden müssen, um komfortable Raumtemperaturen zu gewährleisten. Dies wird als sinnvoll angesehen.

► Nachteile Komfortband NA

Dass das Komfortband des Nationalen Anhangs Raumtemperaturen von kleiner gleich 24 °C bei Außentemperaturen kleiner 16 °C fordert (vgl. Abbildung 16), könnte mit dem Bedürfnis nach kühleren nächtlichen Raumtemperaturen zusammenhängen. Dem widerspricht, dass in DIN EN 16798-1/NA explizit auf Verwaltungs- und Bürogebäuden Bezug genommen wird. Wird ein Gebäude allerdings aktiv gekühlt, führt das NA-Komfortband eine Kühlgrenztemperatur von 24 °C erforderlich, um Übertemperaturen zu vermeiden. So ergeben sich bei der Energiebedarfsanalyse (vgl. Kapitel 5.5) für die Varianten mit Kompressionskältemaschine und 25 °C eine überraschend hohe Anzahl an Übertemperaturgradstunden. Im Sinne eines ressourcenschonenden

Kühlenergie-Einsatzes sollte daher eine Anhebung der 24 °C-Linie auf 25 °C oder sogar 26 °C beim oberen Komfortband (Sommerfall) erwogen werden.

Diskussion - Übertemperaturgradstunden nach Komfortband des Nationalen Anhangs der DIN EN 16798-1

Für die Interpretation der Simulationsergebnisse bedeutet die Auswertung bezogen auf das NA-Komfortband ein hohes Maß an Berücksichtigung der Raumtemperatur im Verhältnis zur Außentemperatur. Dennoch führt in wärmeren Regionen die auf 28 °C Raumtemperatur begrenzte Adaption zu mehr Übertemperaturgradstunden. Dies wird als wichtig und richtig betrachtet. Bei anderen Bewertungsgrößen wie dem PMV geht die Außentemperatur nur in Form eines Bekleidungs-wertes ein. Die unterschiedlichen Ansätze machen deutlich, dass mehr Forschungsarbeit im Hinblick auf Gesundheitsschutz und komfortable Raumtemperaturen nötig ist, vor allem auch in Bezug auf den Einfluss der Außentemperatur.

5.4.4 Untersuchung von Fallbeispielen

In der Studie werden typische Fälle der Baupraxis abgebildet, was die Bereitstellung von typischen Kenngrößen und -zahlen ermöglicht. Die Bandbreite von Gebäuden, Anlagenkonzepten und Raumtypen ist aber immens, was in diesem Umfang nicht abgebildet werden kann. Dies wird beispielsweise bei der Detailuntersuchung des Raumes im Dachgeschoss deutlich (vgl. Kapitel 5.3.4), der mit der Standardkonstruktion des Dachs keine, bei Variation der Dachmaterialien aber durchaus eine deutliche Erhöhung der Übertemperaturgradstunden zeigt. Noch ungünstigere Fälle würden Räume mit Steildach, Galeriegeschosse oder Räume mit Dachflächenfenster darstellen. Auch die Detailuntersuchung zu den Randbedingungen Schule (s. Kapitel 5.3.6) zeigt die großen Auswirkungen bei Variation von Randbedingungen.

5.4.5 Raumweise Betrachtung

Die Parameterstudie basiert auf Simulationen von Modellräumen, Gebäude als Ganzes (Whole-Building-Simulation) werden nicht untersucht. Für die Übertragbarkeit auf Gebäude, die sich neben den untersuchten Räumen der Hauptnutzung auch über Verkehrs-, Lagerflächen und anderen Bereichen verfügen, muss bei der Übertragung Ergebnisse unbedingt beachtet werden. Spezifische Werte aus der Energiebedarfsanalyse (s. Kapitel 5.4) und Wirtschaftlichkeitseinschätzung (s. Kapitel 5.6) können daher nicht auf das Gebäude hochgerechnet werden.

Bezogen auf die Simulation birgt die raumweise Betrachtung den Nachteil, dass die Infiltration konstant angesetzt werden musste: Eine Simulation mit windinduzierter Infiltration ist raumweise nicht möglich, da hierfür der Gebäudebezug mit Lufteintritt an der windzugewandten und Luftaustritt an der windabgewandten Seite fehlt. Bei einer windinduzierten Simulation der Infiltration würden Windgeschwindigkeit und -richtung aus den Klimadaten, Gebäudekubatur und Raumanordnung die Ergebnisse beeinflussen. Der gewählte Ansatz der Berücksichtigung der Infiltration über einen konstanten Ansatz verstärkt aus diesem Grund aber die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse.

5.5 Energiebedarfsanalyse

Im Hinblick auf ein zukünftiges Ausschöpfen von Optionen zur Senkung des Energiebedarfs und von Treibhausgasemissionen, aber auch für die wichtige Ableitung einer geeigneten Definition von „passiven“ Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz soll in diesem Kapitel das Augenmerk auf den mit passiven Maßnahmen und passiver Kühlung verbundenen Energiebedarf –

auch im Vergleich zu einer aktiven Kühlung - gerichtet werden (Begriffserläuterung s. Kapitel 3.2.2 und 3.2.3).

5.5.1 Vorgehensweise

Für ausgewählte Varianten wird der spezifische - auf Quadratmeter Nettoraumfläche bezogene - jährliche Energiebedarf ermittelt. Hierfür werden analog der Parameterstudie thermisch-dynamische Simulationen durchgeführt.

Folgende Energiebedarfe, die im Zusammenhang mit Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz stehen, werden einbezogen:

- ▶ Heizung
- ▶ Beleuchtung
- ▶ Lüftungsanlage (RLT)
- ▶ Kühlung

Der Energiebedarf für Heizung und Beleuchtung wird in die Analyse einbezogen, um den Einfluss von geringem Fensterflächenanteil und des Einsatzes von Sonnenschutzverglasung untersuchen zu können.

Tabelle 36 zeigt die Variantenmatrix, für welche die Energiebedarfsanalyse durchgeführt werden soll. Wohngebäude werden bei der Energiebedarfsanalyse nicht betrachtet, weil die festgelegten Maßnahmenpakete MIN, STD, MAX beim Wohnen mit keinem Energiebedarf verbunden sind.

Tabelle 36: Variantenmatrix zur Energiebedarfsauswertung

Parameter	
Standort	Rostock, Potsdam, Mannheim
Klimadaten	TRY2045
Nutzungstyp	Büro, Schule
Verglasungsvariante	Lochfassade, Fensterband, Vollverglasung
Ausrichtung	West
Maßnahmenpaket	MIN, STD, MAX, OPT, KKM, GEO

Hierbei bedeuten MIN, STD, MAX, OPT, KKM, GEO:

Maßnahmenpakete - Energiebedarfsanalyse	
MIN	Wenig Vorkehrung
STD	Normale Vorkehrung
MAX	Viel Vorkehrung
OPT	Viel Vorkehrung (MAX) mit energetischer Optimierung (freie Nachtlüftung)
KKM	Wenig Vorkehrung (MIN) mit Kühlung über Kompressionskältemaschine
GEO	Wenig Vorkehrung (MIN) mit Kühlung über Geothermie

Das Maßnahmenpaket OPT ist gleich dem Maßnahmenpaket MAX mit dem einzigen Unterschied, dass die Nachtlüftung nicht mechanisch über die RLT-Anlage, sondern - um den Energiebedarf zu optimieren – frei über Lüftungselemente erfolgt.

Um die Energiebedarfe direkt miteinander vergleichen zu können, werden strombasierte Heiz- und Kühlsysteme gewählt, so dass für alle Verbraucher Strom der Endenergieträger ist. Bei der Heizung wird von einer Wärmepumpe ausgegangen, deren Effizienz über die Jahresarbeitszahl beschrieben wird. Bei einer Kompressionskältemaschine erfolgt die Umrechnung von Kühlenergiebedarf in Strombedarf über den sogenannten Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER), der das Verhältnis von erzeugter Kälte zu eingesetztem Strom angibt. Bewusst wird auf eine Festlegung der jeweiligen Übergabesysteme und deren Untersuchung verzichtet. Stattdessen sind in den gewählten Energieeffizienz-Kenngrößen Verteilungs-, Übergabeverluste und Hilfsenergie für die Verteilung enthalten.

In der vorangegangenen Parameterstudie ist als Maßnahme nicht die passive Kühlung über Geothermie betrachtet worden, obwohl es sich hinsichtlich der Absenkung von ÜTGS um eine sehr effiziente Maßnahme handelt. Hintergrund ist, dass für eine Nutzung die geologischen und genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen vorhanden sein müssen. Diese Voraussetzungen sind oft nicht gegeben. Nachfolgend wird eine passive Kühlung über Grundwasser (GEO) unter der Annahme einer für die Kühlung ausreichenden Grundwasser-Ergiebigkeit und eines fiktiven SEER für den Strombedarf der Grundwasserpumpe und sonstigen Hilfsenergien untersucht.²⁰

In den Vergleich soll auch eine Kombination aus aktiver Kühlung über eine Kompressionskältemaschine und PV-Strom einfließen. Allerdings wird nachfolgend bei dieser PV-Variante nicht von einem Betrieb nur mit PV-Strom ausgegangen, sondern ermittelt, welcher Anteil des Anlagenstrombedarfs bei der Variante KKM von einer PV-Dach-Anlage gedeckt werden könnte.

In Tabelle 37 sind die für die Energiebedarfsanalyse gewählten Randbedingungen zusammengestellt. Ansonsten gelten die Randbedingungen der Parameterstudie (vgl. Kapitel 4).

²⁰ Wie in Kapitel 3.2.2.2 aufgeführt, kommen bei einer passiven Kühlung als Wärmesenke oft Grundwasser oder Erdreich zum Einsatz. Letzteres kann über in Erdsonden zirkulierende Sole genutzt werden. Ein zusätzlicher Nutzen bei Erdreich als Wärmesenke besteht, wenn das Gebäude im Winter über eine (Sole-)Wärmepumpe mit Wärmequelle Erdreich beheizt und im Sommer über die Solezirkulation mit Erdreich als Wärmesenke direkt gekühlt wird. Durch den saisonalen Temperatur-Ausgleich kann das Erdreich so optimal genutzt werden. In der Praxis reicht die Soletemperatur für die direkte Kühlung oft nur einige Monate aus. Aufgrund des geschlossenen Kreislaufs ist der Energieaufwand für die Solezirkulation bei direkter Kühlung mit einem EER von ca. 20 sehr gering (obwohl Erdsonden oft knapp 100 m tief sind). Ist eine weitere direkte Kühlung aufgrund der dabei ansteigenden Soletemperatur nicht mehr möglich, kann die Wärmepumpe gleichsam einer Kältemaschine betrieben werden und so weiter Kühlenergie (mit einem EER von ca. 6 bis 7) erzeugt werden. Hierbei wird das Erdreich über die Solezirkulation in den Erdsonden effizient zur Rückkühlung genutzt, so dass sich im Vergleich zu einer konventionellen KKM mit Luft-Rückkühlung ein höherer EER ergibt.

Tabelle 37: Randbedingungen Energiebedarfsanalyse

Heizen	
Raumübergabesystem	ideale Heizung
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe	4
Hilfsenergie	in Jahresarbeitszahl enthalten
Kühlen	
Raumübergabesystem	ideale Kühlung
Regelung Kühlung	Kühlung nur während der Nutzungszeit: auf Raum-Solltemperatur von 25 °C
Kompressionskältemaschine SEER (KKM) (inkl. Rückkühler, etc.)	elektrisch betrieben 4
Geothermie Strombedarf für Grundwasserpumpe und Hilfsenergie abgeschätzt über SEER SEER (GEO)	über Grundwassernutzung mit ausreichender Er- giebigkeit ²¹ 15
Hilfsenergie	in SEER enthalten
Beleuchtung	
Installierte Leistung	(s. Kap. 4.5: 7 W/m ² Büro; 6 W/m ² Schule)
Steuerung	tageslichtabhängig
PV-Anlage (in Kombination mit KKM)	
Auslegung	Modulfläche = 75 % der Raumfläche / 4 Geschosse Büro: 3,9 m ² je 2-Personen Büro Schule: 12,3 m ² je Klassenraum Ausrichtung zu gleichen Teilen Ost und West Modulneigung: 10° PV-Effizienz (gesamt): 16 %
Strombedarf Nutzung	Büro: 106 W je 2-Personen Büro Schule: 250 W je Klassenraum

Der Strombedarf für automatisch betriebenen, außenliegenden Sonnenschutz und für automatisch betriebene Lüftungselemente wird wegen der geringen Relevanz vernachlässigt.

5.5.2 Ergebnisse

In Abbildung 88 ist eine Übersicht über die Ergebnisse des Büros aufgeteilt auf Heizung, Beleuchtung, RLT-Anlage und Kühlung für die Standorte Rostock (R), Potsdam (P), Mannheim (M) und die Fassadentypen Lochfassade (LF), Fensterband (FB) und Vollverglasung (VV) zu sehen. Ergänzend werden – als schwarze Punkte eingezeichnet – auch die Übertemperaturgradstunden nach Nationalem Anhang der DIN EN 16798-1 NA angezeigt.

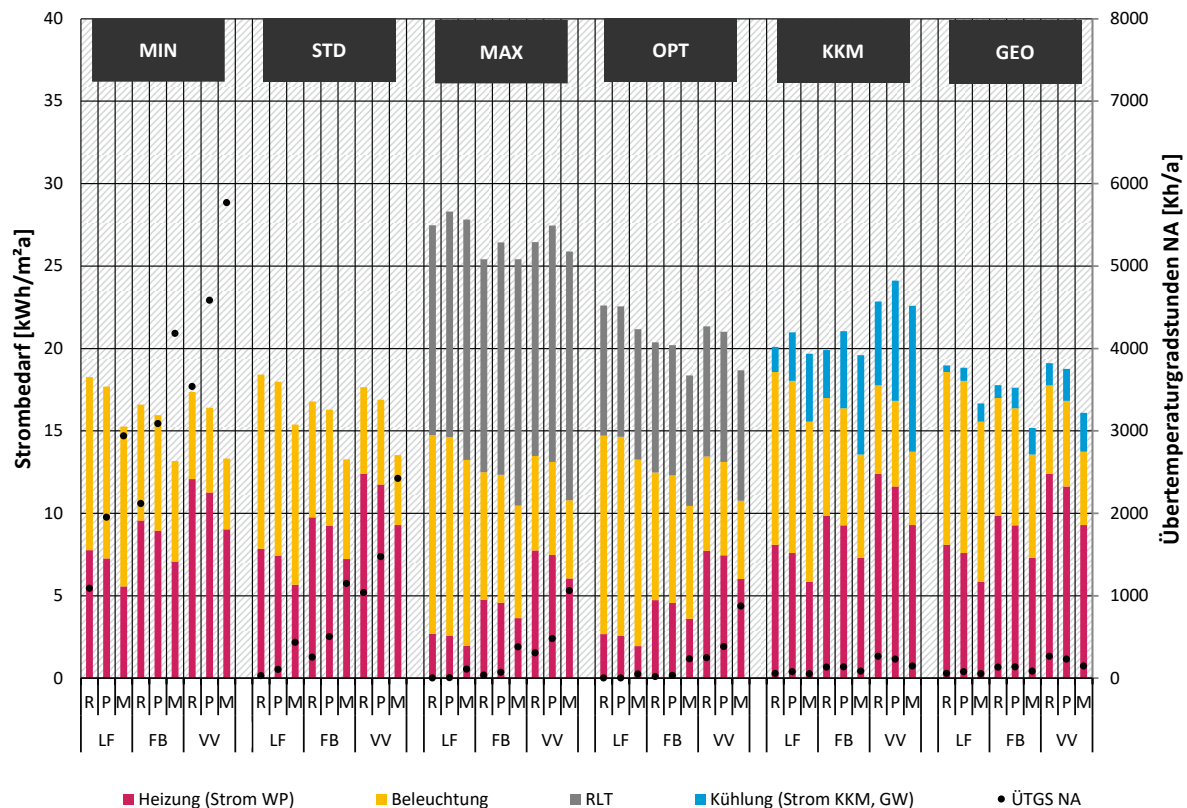
²¹ Bei einer max. Kühlleistung von 50 W/m² und 5 K Erhöhung der Grundwassertemperatur bedarf es einer Ergiebigkeit von 1,8 ml/s je m² Raumfläche, was bei einem Gebäude mit einer gekühlten Raumfläche von 3.000 m² einer max. Entnahme von 5,4 l/s entspräche.

Abbildung 88: Energiebedarfsanalyse – westorientiertes Büro (TRY2045)

Endenergieträger: Strom (für alle Verbraucher)

Standorte: Rostock (R), Potsdam (P), Mannheim (M)

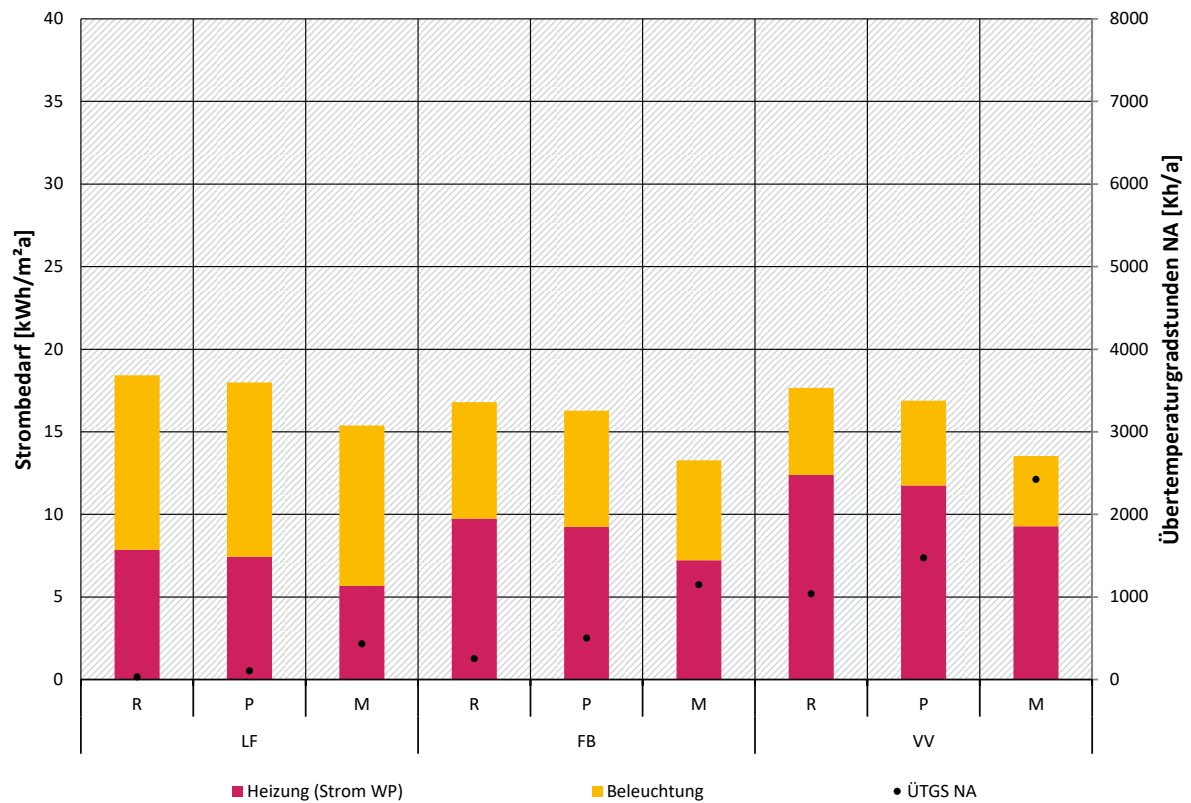
Fassadentypen: Lochfassade (LF), Fensterband (FB) und Vollverglasung (VV)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

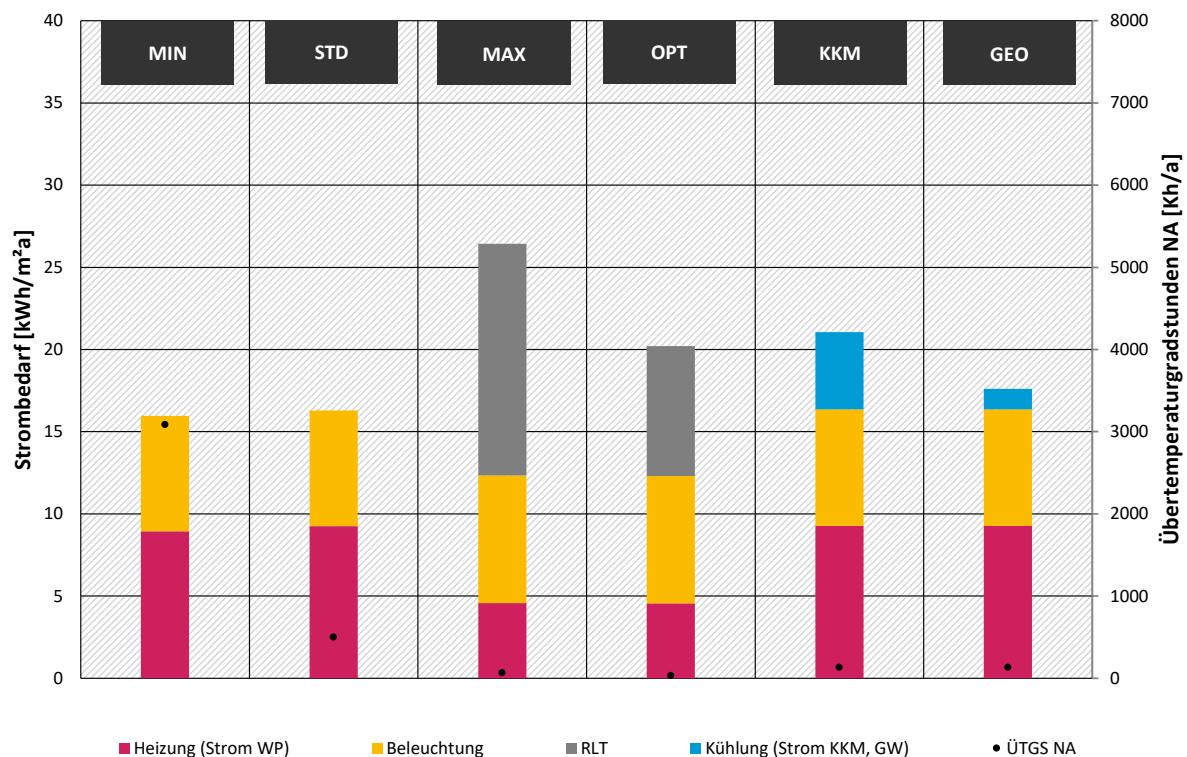
An den angezeigten Übertemperaturgradstunden ist erstmal eine der Analyse vorangestellte Einordnung der Varianten in zumutbar und nicht akzeptabel vorzunehmen, wodurch viele der MIN-Varianten als unzumutbar ausscheiden. Für gekühlte Räume sind die ÜTGS für die Varianten mit aktiver Kühlung (KKM, GEO) teilweise noch auffallend hoch, insbesondere bei den Varianten mit Vollverglasung und dem Standort Rostock. Da das gewählte Komfortband bei Außentemperaturen kleiner 20 °C jedoch maximale operative Raumtemperaturen zwischen 24 und 25 °C vorsieht, die gewählte Kühl-Solltemperatur aber konstant bei 25 °C liegt, können hier trotz ausreichender Kühlung ÜTGS entstehen. Bei kühleren Standorten wie Rostock scheinen diese Fälle öfter aufzutreten.

Da die Grafik viele weitere Informationen bereithält, soll diese in zwei vereinfachten Darstellungen, und zwar zunächst konzentriert auf das STD-Maßnahmenpaket (Abbildung 89) und anschließend für den Standort Potsdam mit Fassadentyp Lochfassade (Abbildung 90) erläutert werden.

Abbildung 89: Endenergiebedarf bei STD-Maßnahmenpaket - westorientiertes Büro (TRY2045)

Quelle: eigene Darstellung, IBH

Deutlich erkennbar sind die durch die Klimadaten der Standorte geprägten Strombedarfe für Heizung und Beleuchtung. Ein warmer Standort und ein geringer Fensterflächenanteil führen zu geringerem Heizwärmebedarf, wohingegen ein geringer Fensterflächenanteil zu höherem Beleuchtungsstrombedarf führt.

Abbildung 90: Endenergiebedarf für die Varianten Fensterband mit Standort Potsdam – westorientiertes Büro (TRY2045)

Quelle: eigene Darstellung, IBH

Die Varianten STD und MIN weisen den gleichen Energiebedarf auf, haben durch die natürliche Nachtlüftung über Lüftungselemente beim STD-Maßnahmenpaket jedoch unterschiedliche ÜTGS.

Beim Beleuchtungsstrom ist eine Erhöhung beim MAX- und OPT-Maßnahmenpaket ersichtlich, da die geringere Lichttransmission (Tageslichtdurchlässigkeit) bei der Sonnenschutzverglasung²² durch Kunstlichteinsatz ausgeglichen wird. Der Strombedarf ist beim MAX-Maßnahmenpaket mit mechanischer Tag- und Nachtlüftung durch den Strombedarf für die RLT-Anlage am höchsten, obwohl der Energiebedarf im Heizfall durch die Reduzierung der Lüftungswärmeverluste über die Wärmerückgewinnung stark abnimmt. Durch die natürliche Nachtlüftung beim OPT-Maßnahmenpaket sinkt der RLT-Strombedarf um 44 %.

Bei der Variante KKM ist zunächst zu beachten, dass diese genauso wie die MIN-Variante zumindest für den Neubau aufgrund der zu hohen ÜTGS (ohne Kühlung) nicht zulässig wäre (vgl. Tabelle 51). Diese müsste somit mit anderen passiven Maßnahmen kombiniert werden. Der Strombedarf für die KKM-Variante ist geringer als der der MAX-Variante. Besteht eine Möglichkeit zur passiven Kühlung über Geothermie (z. B. Grundwasser), ergeben sich wie in Variante GEO zu sehen ist, niedrige ÜTGS verbunden mit geringerem Strombedarf.

Kurz sollen die Auswirkungen bei Veränderung der angenommenen Energieeffizienz (Jahresarbeitszeit der Wärmepumpe, und SEER der Kältemaschine) auf Abbildung 90 angesprochen werden: Würden die Jahresarbeitszahl bzw. der SEER von 4 auf 3 (z.B. bei Einsatz von weniger effizienten Außenluft-Wärmepumpen oder einer ineffizienten Regelung der Kältemaschine)

²² Lichttransmission τ der Sonnenschutzverglasung 0,71 im Vergleich zu 0,82 der Wärmeschutzverglasung

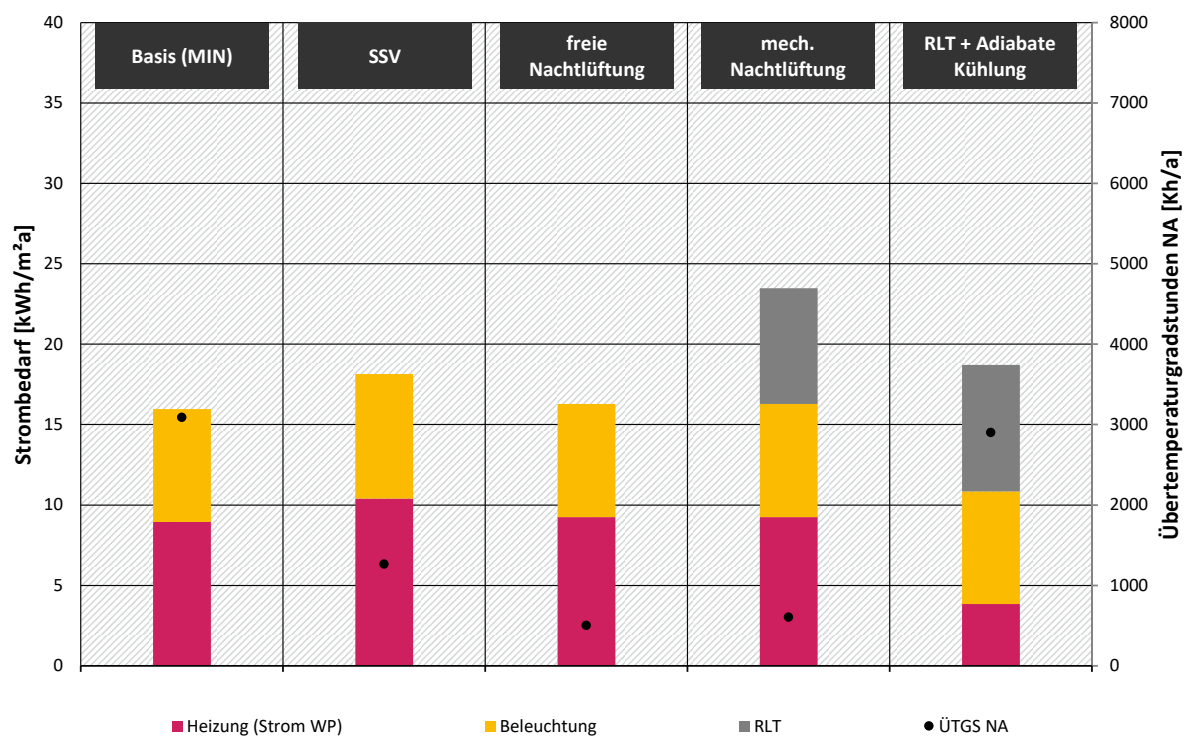
reduziert, so würde sich der Strombedarf für Heizung und Kühlung um ein Drittel erhöhen. Genauso könnte die Jahresarbeitszahl bzw. der SEER auf 5 erhöht werden, um besonders effiziente Geräte abzubilden. Dann würde der Strombedarf für Heizung und Kühlung um 20 % abnehmen.

In Analogie zu Abbildung 90 wird eine Untersuchung in Abbildung 91 dargestellt: Hierbei werden keine Maßnahmenpakete zugrunde gelegt, sondern jeweils ausgehend vom MIN-Standard (mit außenliegender Jalousie) Einzelmaßnahmen hinsichtlich ihrer Effektivität für die Absenkung von ÜTGS und der Auswirkungen auf den Energiebedarf untersucht. Folgende Einzelmaßnahmen werden betrachtet:

- ▶ MIN + Sonnenschutzverglasung (SSV)
- ▶ MIN + Freie Nachtlüftung (über Lüftungselemente)
- ▶ MIN + Mechanische Nachtlüftung (RLT ohne WRG - nur nachts betrieben)
- ▶ MIN + RLT und Adiabate Kühlung (Mechanische Taglüftung über RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnung und Adiabatik über indirekte Verdunstungskühlung – ohne Nachtlüftung)

Die vorab beschriebenen Randbedingungen werden beibehalten.

Abbildung 91: Endenergiebedarf von Einzelmaßnahmen bei Fensterband und Standort Potsdam – westorientiertes Büro (TRY2045)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Genauso wie schon bei den Maßnahmenpaketen erkennbar, sind bei der Einzelmaßnahme Sonnenschutzverglasung die Auswirkungen auf den Strombedarf für Heizung und Beleuchtung ersichtlich. Eine Sonnenschutzverglasung als weitere Maßnahme zur außenliegenden Jalousie ist in der gewählten Variante nicht ausreichend, um die ÜTGS unter den Anforderungswert von 517 Kh/a abzusenken, dennoch ist eine beachtliche Reduktion im Vergleich zum MIN-Basisfall zu sehen.

Mit der Nachtlüftung lassen sich ÜTGS noch besser absenken, wobei die Absenkung bei der mechanischen Nachtlüftung durch die über die Zuluft zugeführte Ventilatorabwärme geringer ausfällt. Durch die mechanische Nachtlüftung erhöht sich der Stromverbrauch um knapp die Hälfte im Vergleich zum MIN-Basisfall. Bei dieser Einzelmaßnahmenuntersuchung wird die RLT-Anlage (ohne WRG) nur für die Nachtlüftung eingesetzt. Aus diesem Grund läuft die Anlage nicht in der Heizperiode und es gibt auch keine WRG-Reduktion des Heizungsenergiebedarfs. Diese Einzelmaßnahme stellt daher auch nur einen theoretischen Fall dar, um den Sommerfall isoliert betrachten zu können.²³

Durch den Einsatz einer indirekten Verdunstungskühlung während der Taglüftung in Verbindung mit einer RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnung lassen sich die Übertemperaturgradstunden nur um 188 Kh/a reduzieren (vgl. Säule „RLT + Adiabate Kühlung“). Die ÜTGS-Reduktion wäre bei einem höheren Luftwechsel als dem vergleichsweisen geringen Luftwechsel von $1,3 \text{ h}^{-1}$ sicher deutlicher, wobei ein höherer Luftwechsel auch zu einem höheren RLT-Strombedarf führen würde (vgl. Abbildung 95 – Klassenraum mit Luftwechsel $4,6 \text{ h}^{-1}$). Um die Auswirkung der Adiabatik besser einschätzen zu können, wurde eine zusätzliche Simulation der Einzelmaßnahme „Adiabatik“ für das MAX-Maßnahmenpaket im 2-Personen-Büro durchgeführt. Hierbei konnten die ÜTGS durch die Adiabatik um den absoluten Wert von 167 Kh/a abgesenkt werden, was bei der MAX-Variante einer beachtlichen ÜTGS-Reduktion um zwei Drittel entspricht.

Abschließend zur Energiebedarfsanalyse beim Büro soll noch die Kombination einer elektrisch betriebenen Kältemaschine mit einer Photovoltaik-Anlage betrachtet werden. In dem zu untersuchenden Beispiel wird die Kältemaschine allerdings nicht ausschließlich mit PV-Strom betrieben, sondern bestimmt, welcher Anteil des Kühlstrombedarfs mit einer fiktiven auf dem (Flach-)Dach eines 4-stöckigen Bürogebäudes installierten PV-Anlage betrieben werden könnte.

Für die Lastganganalyse wird folgende Vorgehensweise gewählt:

- ▶ Dem betrachteten Büroraum wird anteilig der erzeugte PV-Strom der Anlage zugeordnet (Daten PV-Anlage s. Tabelle 37)
- ▶ Vom aktuellen (halbstündlichen) PV-Ertrag wird zunächst der Nutzungsstrombedarf abgezogen, der vom PV-Strom gedeckt werden soll. Wenn noch PV-Strom übrig ist, wird von diesem der Heiz-, Beleuchtungs-, Lüftungs- und Kühlstrombedarf abgezogen.
- ▶ Wenn bei einem Halbstundenwert immer noch PV-Strom übrig ist, wird dieser nicht weiter beachtet. Dieser würde dann ins öffentliche Stromnetz eingespeist und vergütet.
- ▶ Die Senkung des Strombedarfs durch den anteiligen PV-Strom wird für den Fall mit und ohne aktive Kühlung ausgewertet.

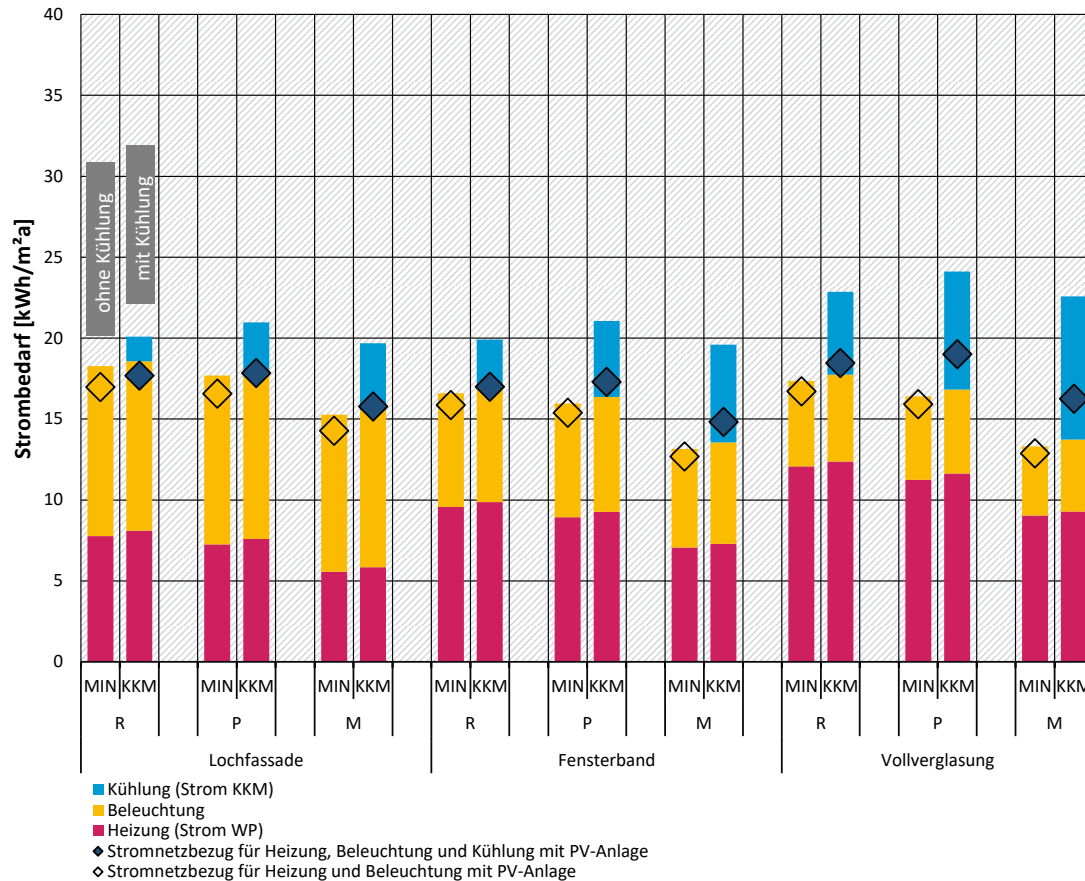
Aus den in Abbildung 92 gezeigten Ergebnissen lässt sich ableiten, dass im Falle ohne Kühlung (vgl. jeweils linke Säule), der PV-Strom fast ausschließlich der Deckung des Nutzungsstroms dient, die Summe aus Heiz- und Beleuchtungsbedarf kann nicht merklich abgesenkt werden (vgl. Mittelpunkt des Quadrats ohne Füllfarbe). Dies hängt mit dem Lastgang des Strombedarfs zusammen, der offenkundig nur selten mit dem PV-Erzeugungszeiten korreliert.

Insgesamt liegt der resultierende Strombedarf (vgl. ungefüllte und ausgefüllte Quadrate) der Fälle mit KKM immer über den entsprechenden MIN-Varianten ohne Kühlung. Während bei den KKM-Varianten mit 2,4 bis $6,3 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ein teilweise sehr hoher Anteil des Kühl-, Heizungs- und

²³ Als Einzelmaßnahme nicht betrachtet wurde der Betrieb der RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnung zur Taglüftung, weil die ÜTGS-Absenkung bei dieser Maßnahme äußerst gering ist. Hierbei könnte die Zuluft, sofern die Abluft kühler als die Außenluft ist, über den Wärmetauscher etwas abgekühlt werden.

Beleuchtungsstroms mit PV-Strom gedeckt werden kann, beträgt die Deckung des Beleuchtungs- und Heizungsstroms bei den MIN-Varianten nur 0,4 bis 1,3 kWh/m²a.

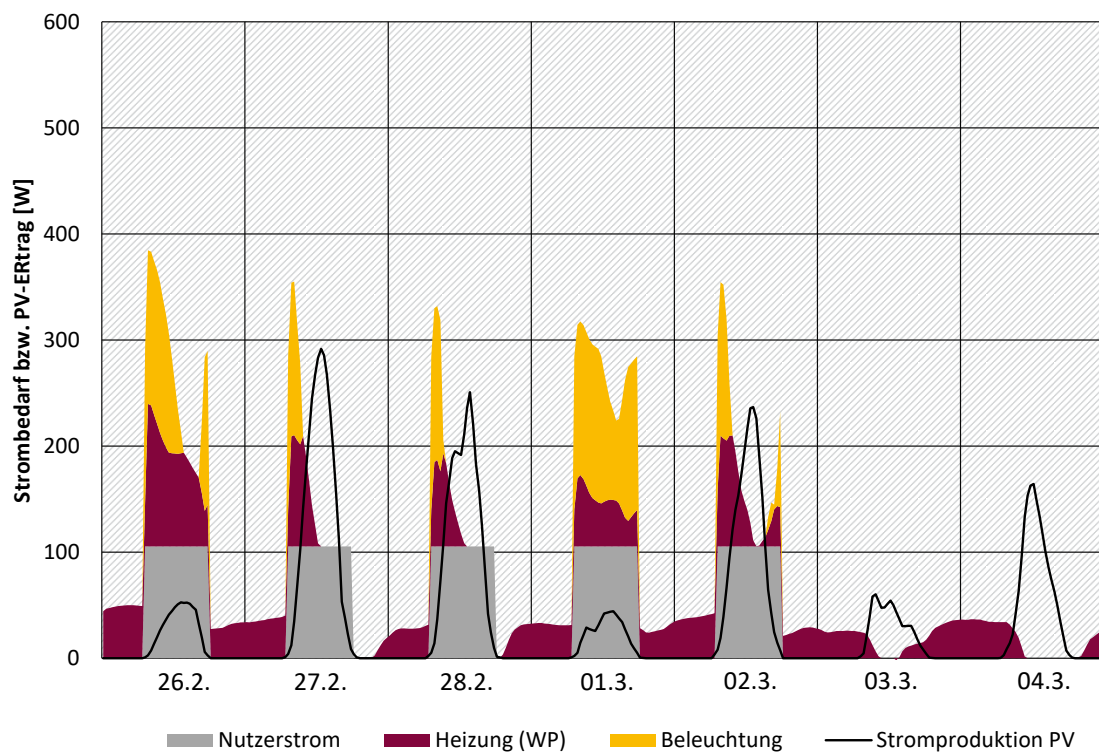
Abbildung 92: Endenergiebedarf mit PV für die MIN- und KKM-Variante – westorientiertes Büro (TRY2045)



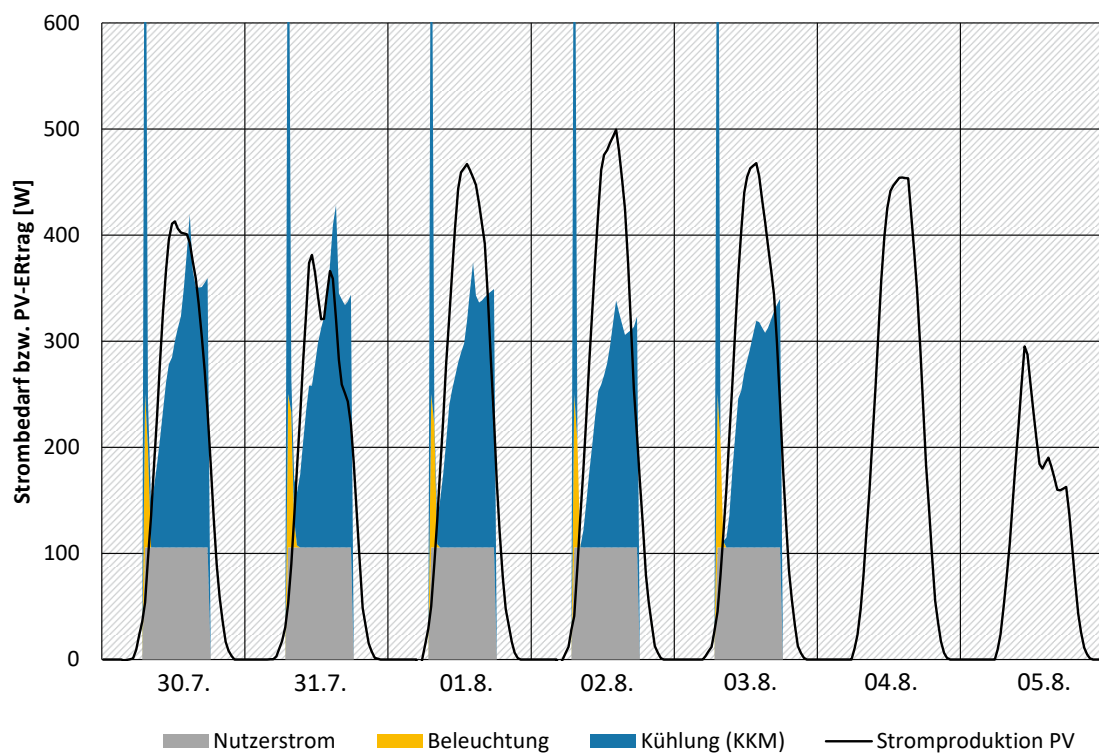
Hinweis: Nicht dargestellt ist der in der jeweiligen Variante in das öffentliche Netzeingespeiste PV-Strom.

Quelle: eigene Darstellung, IBH

Um die Zusammenhänge zwischen PV-Stromerzeugung und Stromlastgang zu verdeutlichen, werden die Verläufe für eine Winterwoche in Abbildung 93 und für eine Sommerwoche in Abbildung 94 dargestellt. In der Winterwoche kann der PV-Strom je nach PV-Stromproduktion einen kleineren oder höheren Anteil des Nutzungsstroms decken, hingegen vom Anlagenstrom nur wenig (vgl. rote Flächen unterhalb schwarzer PV-Linie) und vom Beleuchtungsstrom wegen der zeitlichen Versetzung nichts. In der sonnigen Sommerwoche kann zwar auch wegen der zeitlichen Versetzung kein Beleuchtungsstrom, der im Sommer sehr gering ist, gedeckt werden, dafür kann der Nutzungsstrom fast komplett und auch der Strom für die Kühlung größtenteils gedeckt werden (vgl. blaue Flächen unterhalb schwarzer PV-Linie). Auch die morgendliche Kühllastspitze ist gut zu erkennen, die durch die Regelungsvorgabe entsteht, dass nur während der Nutzungszeit gekühlt wird und dann der Raum erstmal auf Solltemperatur gekühlt wird.

Abbildung 93: Stromlastgang und PV-Erzeugung – Büro in Winterwoche

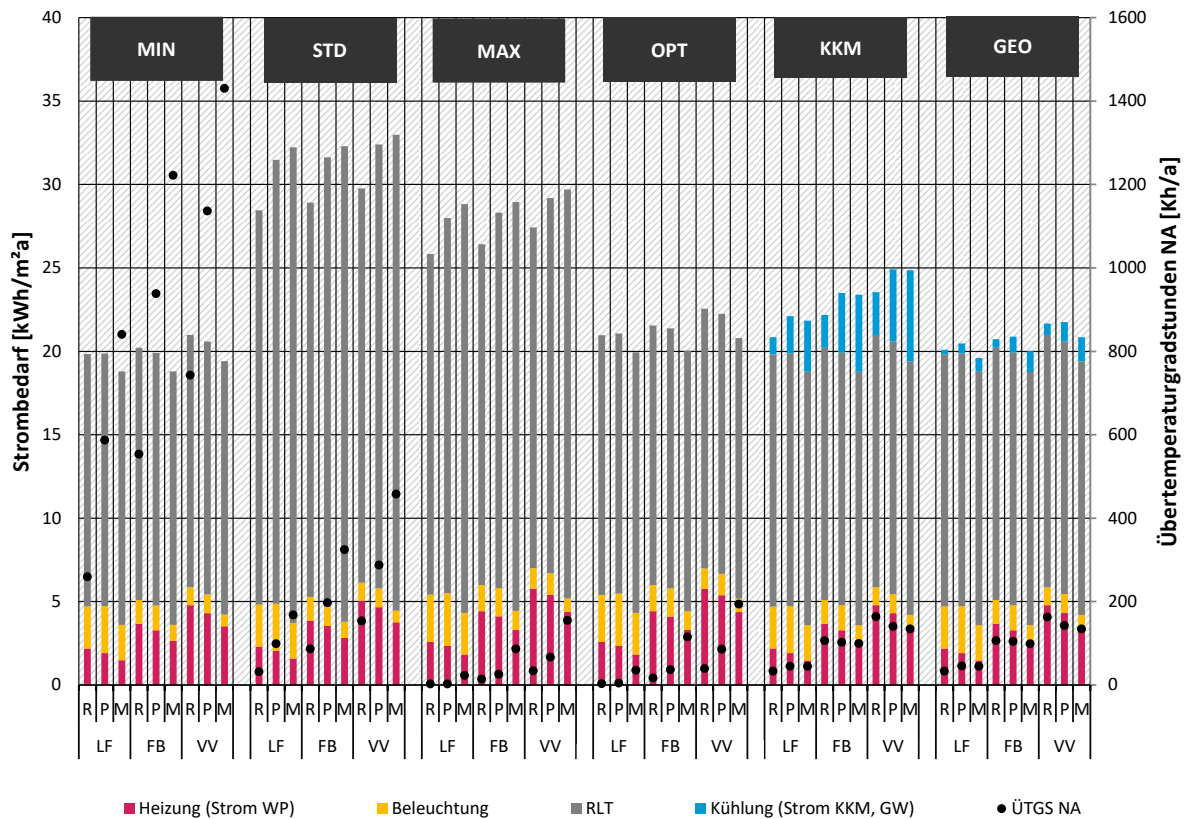
Quelle: eigene Darstellung, IBH

Abbildung 94: Stromlastgang und PV-Erzeugung - Büro in Sommerwoche

Quelle: eigene Darstellung, IBH

In Abbildung 95 ist in Analogie zur Abbildung 88 für den westorientierten Büroraum die Energiebedarfsanalyse für das westorientierte Klassenzimmer dargestellt. Aus Luftqualitätsgründen wird in allen Fällen eine Lüftungsanlage angesetzt (vgl. Randbedingungen Parameterstudie), welche durch den aufgrund des erforderlichen Luftwechsels hohen RLT-Strombedarfs bei der Energiebedarfsanalyse entscheidend ist.

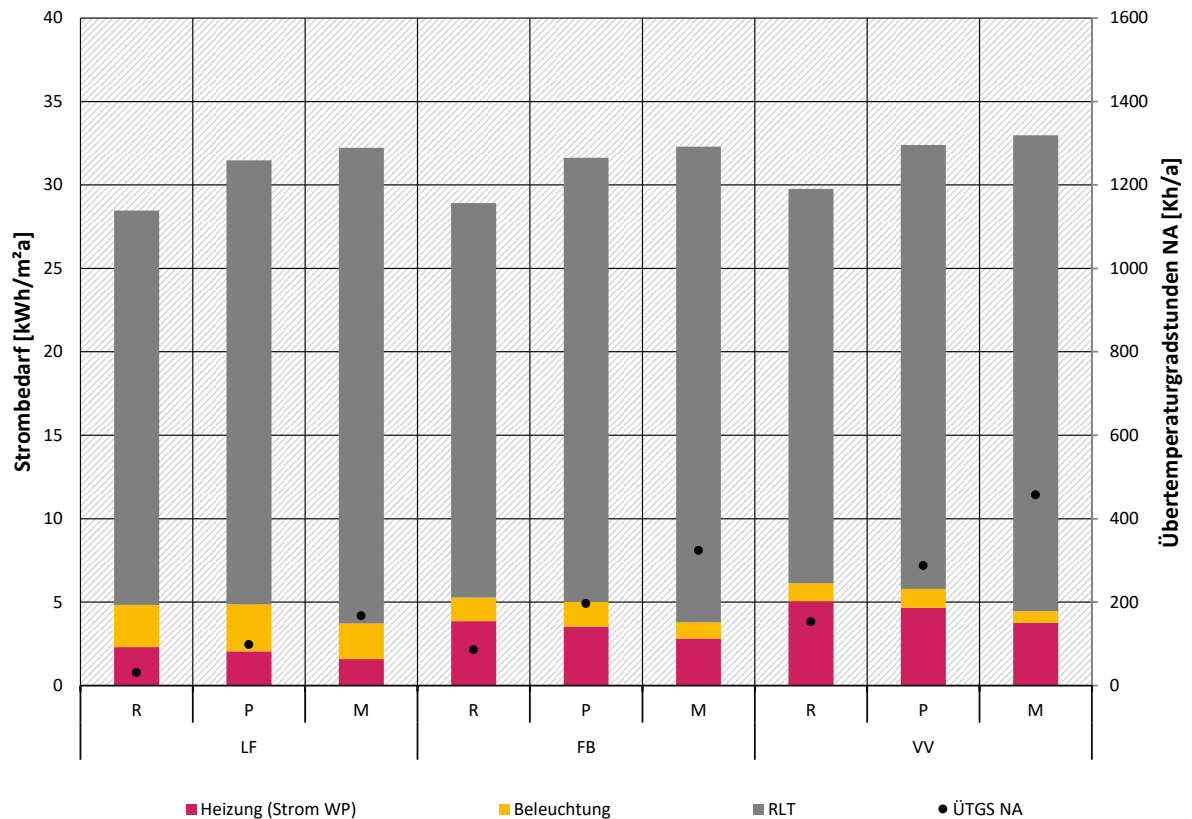
Abbildung 95: Energiebedarfsanalyse – westorientiertes Klassenzimmer (TRY2045)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Die komplexe Grafik soll anhand von heraus gegriffenen Beispielen weiter erläutert werden. In Abbildung 96 sind die Varianten mit STD-Maßnahmenpaket herausgegriffen. Insgesamt betrachtet fallen die Unterschiede bei Variation der Standorte und Fassadentyp durch den bestimmten RLT-Strom im Vergleich zum Büroraum weniger deutlich aus. Erkennbar sind dennoch die durch die Klimadaten der Standorte geprägten Strombedarfe für Heizung und Beleuchtung. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass für die Varianten Fensterband Mannheim und Vollverglasung Potsdam und Mannheim der ÜTGS-Anforderungswert überschritten ist.

Abbildung 96: Endenergiebedarf bei STD-Maßnahmenpaket - westorientiertes Klassenzimmer (TRY2045)



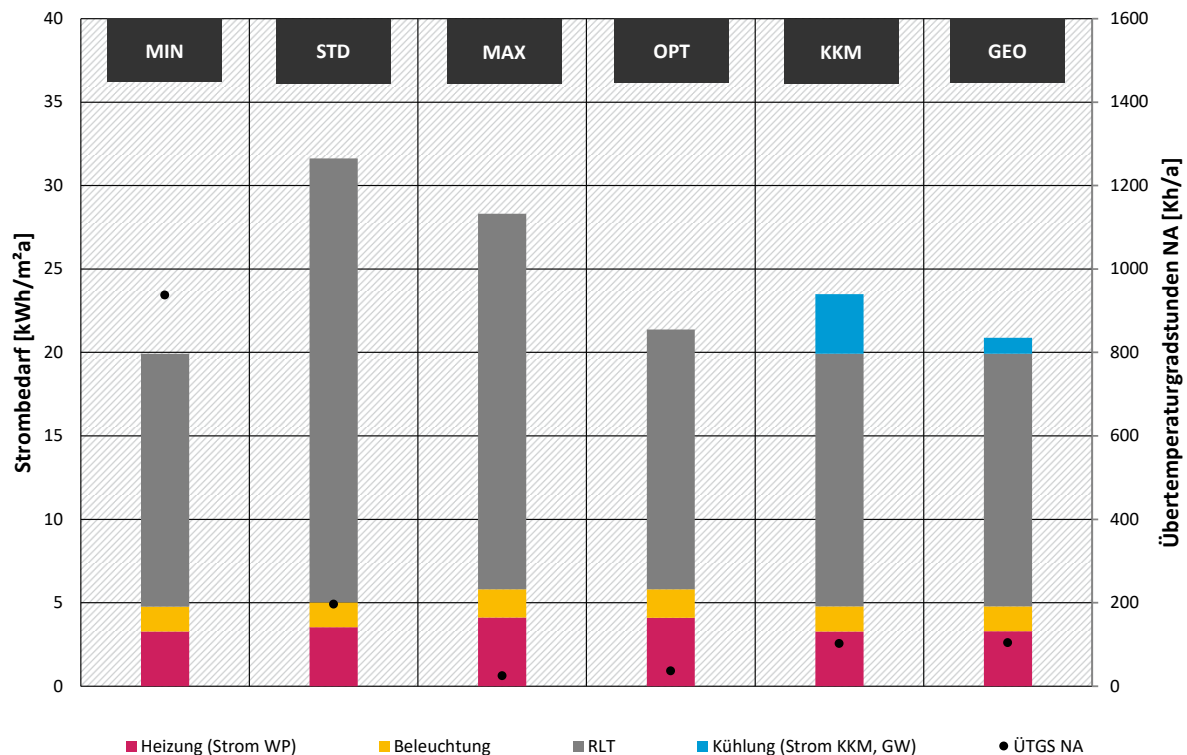
Quelle: eigene Darstellung, IBH

Für den Standort Potsdam mit Fassadentyp Lochfassade zeigt Abbildung 97 die Klassenzimmer-Strombedarfsanalyse (vgl. Büroraum Abbildung 90)

Die Varianten STD und MIN weisen den gleichen Energiebedarf für Heizung und Beleuchtung auf. Da die Nachtlüftung der STD-Variante bei der Schule über die RLT-Anlage erfolgt, erhöht sich der RLT-Strombedarf im Vergleich zur MIN-Variante. Durch die Nachtlüftung beim STD-Maßnahmenpaket nehmen die ÜTGs unter den Anforderungswert ab.

Die Erhöhung von Beleuchtungs- und Heizungsstrom beim MAX- und OPT-Maßnahmenpaket durch die Sonnenschutzverglasung ist auch zu erkennen.

Wie beim Büroraum ist auch beim Klassenzimmer, sofern eine Möglichkeit zur passiven Kühlung besteht, die Variante GEO am besten. In diesem Fall könnten auch die MIN- und KKM-Varianten die Anforderung zum sommerlichen Wärmeschutz über einen simulativen Nachweis erfüllen (vgl. Tabelle 53).

Abbildung 97: Endenergiebedarf für die Fensterband-Varianten mit Standort Potsdam – westorientiertes Klassenzimmer (TRY2045)

Quelle: eigene Darstellung, IBH

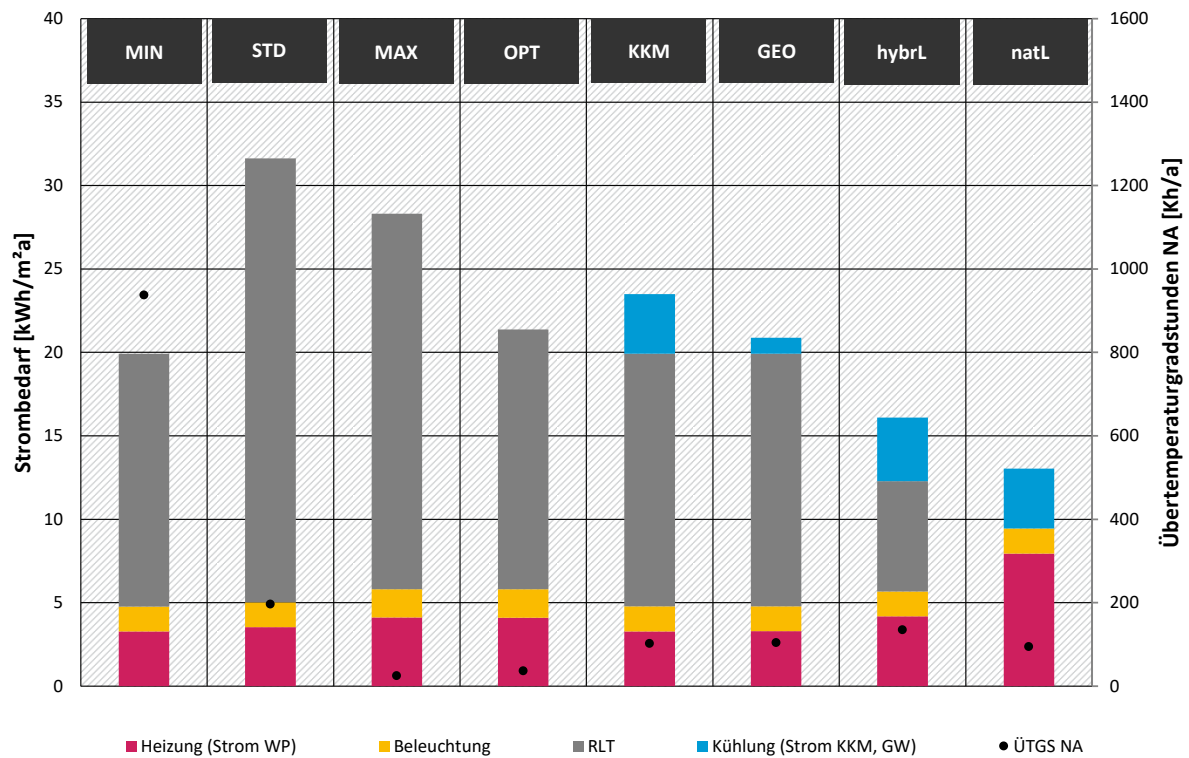
Zur weiteren Diskussion wird obiges Diagramm nachfolgend noch durch folgende zwei Varianten hinsichtlich Lüftungskonzept ergänzt:

- **hybrL:** hybrides Lüftungskonzept mit einem Grundluftwechsel von 2 h⁻¹ und zusätzlicher Fensterlüftung mit 1 h⁻¹, ansonsten wie Maßnahmenpaket KKM
- **natL:** natürliche Lüftung über Fenster, abgebildet über einen Luftwechsel von 3 h⁻¹, ansonsten wie Maßnahmenpaket KKM

Wichtiger Hinweis: Hinsichtlich der Luftqualität (empfohlene Einhaltung im Mittel einer Unterrichtseinheit die 1.000 ppm)²⁴ sind die beiden Varianten hybrL und natL nicht mit den anderen Maßnahmenpaketen vergleichbar. Es kann abgeschätzt werden, dass diese jedoch im Unterrichtsstunden-Mittel unter 1.500 ppm bleiben.

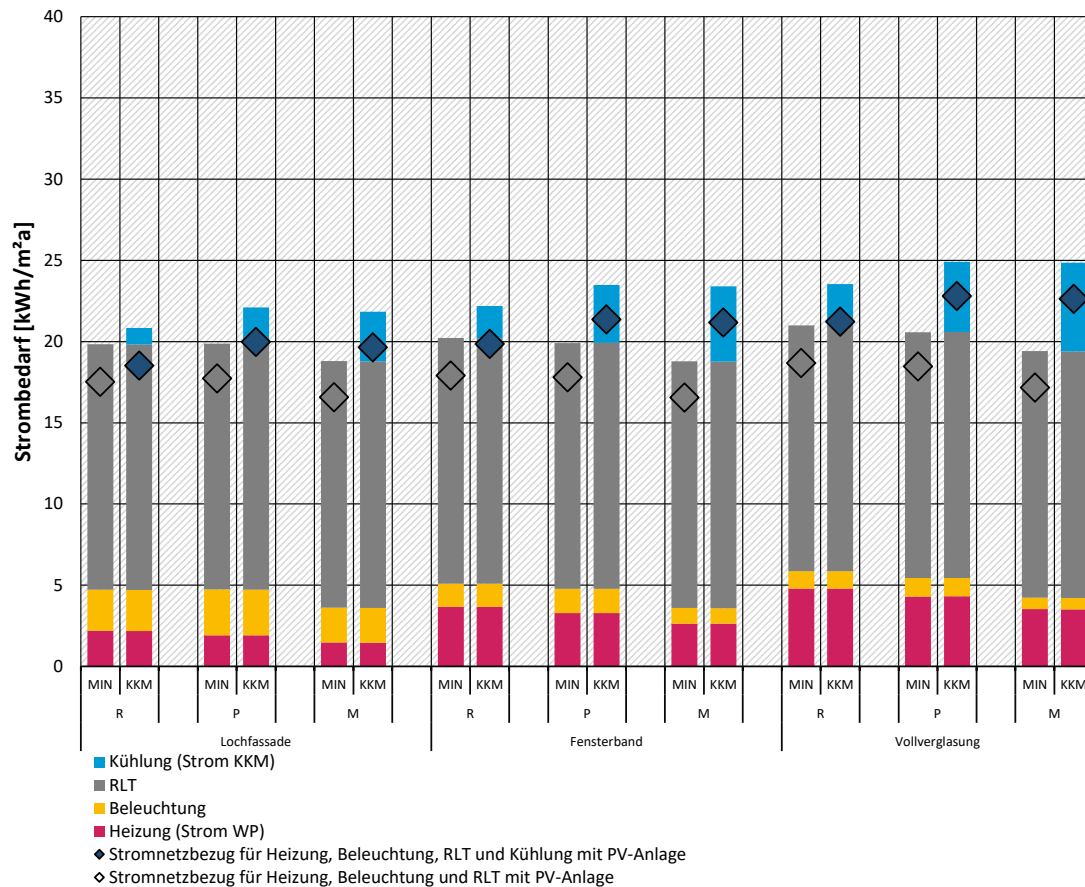
Die Ergebnisse für diese beiden Varianten zeigen, dass diese hinsichtlich Energiebedarfs und auch ÜTGS interessante Alternativen darstellen. Sie können, wie schon hingewiesen, nicht mit der Innenluftqualität und auch hinsichtlich winterlichen Komforts nicht mit den anderen Varianten verglichen werden. Es muss beim Erstellen des Lüftungskonzeptes zwischen Strombedarf und Komfort abgewogen werden, wobei das hybride Lüftungskonzept gegebenenfalls einen Kompromiss ermöglichen kann.

²⁴ Nach UBA-Veröffentlichung „Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden- Teil I : Bildungseinrichtungen“

Abbildung 98: Endenergiebedarf für die Fensterband-Varianten mit Standort Potsdam –westorientiertes Klassenzimmer (TRY2045)

Quelle: eigene Darstellung, IBH

In Abbildung 99 sind die Auswirkungen einer PV-Anlage bei der Schule zu sehen. Da die Lüftungsanlage auch hohen Strombedarf zu Zeiten der PV-Stromproduktion hat, ist die Abminderung durch die PV-Anlage für die Varianten MIN und KKM gleich hoch und liegen zwischen 2,1 bis 2,3 kWh/m²a.

Abbildung 99: Endenergiebedarf mit PV für die MIN- und KKM-Variante – westorientiertes Klassenzimmer (TRY2045)

Hinweis: Nicht dargestellt ist der in der jeweiligen Variante in das öffentliche Netzeingespeiste PV-Strom.

Quelle: eigene Darstellung, IBH

5.5.3 Diskussion

5.5.3.1 Strombedarf für mechanische Nachtlüftung

Die Ergebnisse zeigen die hohe Relevanz einer mechanischen Nachtlüftung für den Energiebedarf. Auf dieser Basis müsste die Empfehlung ausgesprochen werden, dass wegen des hohen Energiebedarfs eine mechanische Nachtlüftung nicht umgesetzt werden sollte und folgerichtig auch nicht zu den passiven Maßnahmen zählen sollte (vgl. Kapitel 5.5.2). Aber gilt diese Aussage generell oder gibt es Fälle, bei denen die mechanische Nachtlüftung besser abschneidet?

Um dieser Frage nachzugehen, sollen ergänzend energieeffiziente Varianten hinsichtlich Ventilatorconfiguration und Regelung untersucht werden. Dies soll am Beispiel des Büroraums mit Fensterband kombiniert mit dem TRY2045 für Potsdam und dem STD-Maßnahmenpaket erfolgen. Allerdings wird in dieser Betrachtung abweichend vom STD-Maßnahmenpaket der übrigen Untersuchungen von mechanischer Nachtlüftung statt freier Nachtlüftung ausgegangen. (Das MAX-Maßnahmenpaket, welches die mechanische Nachtlüftung enthält, wurde aufgrund der zusätzlichen Adiabatik nicht gewählt). In Tabelle 38 sind die Randbedingungen der mechanischen Nachtlüftung zusammengestellt, die analog der vorangegangenen Energiebedarfsanalyse festgelegt sind.

Tabelle 38: Übersicht Randbedingungen und Strombedarf der Nachtlüftung (Büro Fensterband, Potsdam TRY2045)

	Randbedingungen und Strombedarf
Anlagentyp	Zentrale Lüftungsanlage
Luftwechsel Nachtlüftung	2 h ⁻¹
Zeitraum mit Nachtlüftung	25.03. – 06.10. (ergibt sich aus Simulation)
Regelung Nachtlüftung	Zwischen 18 -7 Uhr geht die Nachtlüftung nur an, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind: Die Raumtemperatur ist über 21,5 °C und die Außenlufttemperatur liegt unter der Raumtemperatur.
Druckverlust Zuluft	960 Pa (Standardwert nach DIN 18599)
Druckverlust Abluft	750 Pa (Standardwert nach DIN 18599)
Gesamtwirkungsgrad Ventilator	0,7 (verbesserte Effizienz im Vergleich zum DIN 18599-Standardwert von 0,6)
Leistungsaufnahme gesamt	0,68 Wh/m ³

Für den ausgewählten Ausgangsfall ergibt sich ein Stromverbrauch von 7,2 kWh/m²a für die mechanische Nachtlüftung. Nachfolgende energieeffiziente Varianten sollen bezüglich einer möglichen Reduktion des Strombedarfs untersucht werden:

1. Einsatz einer sehr energieeffizienten RLT-Anlage (zentrale RLT-Anlage)

Maßnahme: Absenkung der externen Druckverluste (erreichbar durch wenig Einbauten mit geringen Druckverlusten²⁵ und ein kurzes Kanalnetz mit großen Kanalquerschnitten) und Absenkung der internen Druckverluste (erreichbar durch Einsatz von sehr effizienten Lüftungsggeräten).

Annahme: Durch diese Maßnahmen lässt sich die Leistungsaufnahme gesamt auf 0,55 Wh/m³ (Druckverlust Zuluft 790 Pa, Druckverlust Abluft 590 Pa) absenken.

2. Einsatz bionischer Ventilatoren (zentrale RLT-Anlage)

Maßnahme: Dies stellt ebenso wie (1) eine Effizienzmaßnahme dar. Durch neu entwickelte, speziell geformte „bionische“ Ventilatoren lässt sich der Strombedarf der Ventilatoren reduzieren.

Annahme: Durch diese Maßnahmen lässt sich die Leistungsaufnahme gesamt auf 0,64 Wh/m³ absenken.²⁶

3. Energieeffiziente Regelung (zentrale RLT-Anlage)

Maßnahme: Die Steuerung sorgt dafür, dass die Nachtlüftung erst angeht, wenn die Außenluft 5 K kälter ist als die Raumtemperatur. Durch den Temperaturunterschied von mindestens 5 K ist

²⁵ Typische Druckverluste werden in der zurückgezogenen DIN EN 13779 angegeben und sind nun vermutlich nur noch in der TR 16798-4 zu finden. Ein Verzicht auf Heiz- und Kühlregister bedeutet beispielsweise ca. 200 Pa weniger internen Druckverlust der Zuluft.

²⁶ Referenzprodukt HR50I-ZID.GG.CR (Hersteller Ziehl-Abegg SE) mit SFP-Wert 1300 Ws/m³ (Auslegung für 7500 m³/h Volumenstrom und 960 Pa Gesamtpressungsgrad)

die Nachtlüftung effektiver. Allerdings hat diese Maßnahme dadurch, dass die Nachtlüftung seltener läuft, auch Auswirkung auf die Absenkung der Übertemperaturgradstunden.

Annahme: Die Lüftungsanlage geht zwischen 18 -7 Uhr an, wenn die Raumtemperatur über 21,5 °C ist und gleichzeitig die Außenluft um 5 K unter der Raumtemperatur liegt.

4. Einsatz raumweiser Ventilatoren (dezentrale RLT-Anlagen)

Maßnahme: Durch den Einsatz dezentraler Geräte ist kein Kanalnetz erforderlich, die externen Druckverluste entfallen.

Annahme: Durch diese Maßnahmen lässt sich die Leistungsaufnahme gesamt auf 0,20 Wh/m³ (Druckverlust Zuluft 216 Pa, Druckverlust Abluft 216 Pa) absenken.

5. Einsatz dezentraler Abluftgeräte mit Nachströmung über Fenster oder Nachströmelemente (dezentrale Abluft - ohne WRG-Möglichkeit)

Maßnahme: Bei Verzicht auf eine Lüftungsanlage kann die natürliche Nachtlüftung durch Abluftgeräte unterstützt werden (hybride Nachtlüftung)

Annahme: Durch diese Maßnahmen lässt sich die Leistungsaufnahme gesamt auf 0,10 Wh/m³ (Druckverlust Abluft 216 Pa) absenken.

In Tabelle 39 sind die spezifischen Stromverbräuche für die beschriebenen Varianten und die Reduktion bezogen auf den Ausgangsfall zusammengestellt.

Tabelle 39: Spezifischer Strombedarf für die mechanische Nachtlüftung bei verschiedenen Energieeffizienzmaßnahmen (Büro Fensterband, Potsdam TRY2045)

	Spezifischer Strombedarf Nachtlüftung	Reduktion bzgl. Ausgangsfall
Ausgangsfall (Büro-FB, P, TRY45)	7,2 kWh/m ² a	
(1) Einsatz einer sehr energieeffizienten RLT-Anlage	5,8 kWh/m ² a	19 %
(2) Einsatz bionischer Ventilatoren	6,8 kWh/m ² a	5 %
(3) Effiziente Regelung (bei 6% ÜTGS-Zunahme)	6,2 kWh/m ² a	14 %
(4) Einsatz raumweiser Ventilatoren	2,1 kWh/m ² a	71 %
(5) Einsatz raumweiser Abluftgeräte	1,0 kWh/m ² a	86 %

Die zusätzliche Untersuchung zu möglicher Effizienzsteigerung bei der mechanischen Nachtlüftung zeigt eine große Schwankungsbreite. Bei einer zentralen RLT-Anlage hängt der Strombedarf vor allem von der Konfiguration der Lüftungsanlage ab. Gelingt es die Stromeffizienz z.B. durch Reduktion von Druckverlusten auf 0,55 Wh/m³ zu verbessern, hätte dies eine Verminderung des Strombedarfs um knapp 20 % zur Folge, der Einsatz von bionischen Ventilatoren um 5 % und die energieeffizientere Regelung (bei einem Anstieg der ÜTGS um 6 %) von 14 %. Nur eine Kombination von derartigen Effizienzmaßnahmen könnte gegebenenfalls zu einem niedrigeren Strombedarf als eine aktive Kühlung mit 4,7 kWh/m²a führen. Letztere hätte jedoch immer noch deutliche Vorteile bei der Absenkung der ÜTGS.

Ein weiteres generelles Problem bei dem Einsatz zentraler Lüftungsanlagen zur Nachtlüftung ist deren Regelfähigkeit. Handelt es sich um Konstantvolumenstrom-Anlagen, kann auf raumweise

Volumenstromreglern mit entsprechend hohem Installations-, Regelungs- und Wartungsaufwand verzichtet werden. Auf der anderen Seite ist aber keine raumweise bedarfsabhängige Regelung möglich. Da die Überhitzungsgefahr der Räume häufig sehr unterschiedlich innerhalb eines Gebäudes sind (z.B. bei Eckräume mit höheren grundflächenbezogenen Fensterflächenanteilen und unterschiedlicher Nutzung), führt dies in der Praxis entweder zu einem unnötigen Lüfterstrombedarf, wenn sich die Regelung der Lüftungsanlage am ungünstigsten Raum orientiert. Häufiger trifft man aber auf eine auf den Mittelwert der Ablufttemperatur eingestellte Regelung. Bei dieser wird der ungünstigste Raum seltener nachts belüftet als nötig wäre.

Anders sieht es bei einer dezentralen Lüftungsanlage aus, die kein Kanalnetz benötigt und raum- oder zonenweise geregelt wird. In der untersuchten Variante ergibt sich ein Strombedarf für die mechanische Nachtlüftung von nur 2,1 kWh/m²a. Sinnvoll könnte auch eine durch Abluftventilatoren gestützte hybride Nachtlüftung sein, die zwar im Vergleich zu einer freien Nachtlüftung einen Energiebedarf hat, dieser liegt aber im Vergleich zu Lüftungsanlagen mit Zu- und Abluft deutlich niedriger.

Es lässt sich also festhalten, dass es Fälle gibt, in denen eine mechanische Nachtlüftung einen geringeren Energiebedarf aufweist als der für eine aktive Kühlung, aber insbesondere bei größeren Gebäuden und zentralen Lüftungsanlagen ist von einer mechanische Nachtlüftung abzuraten, wenn nicht günstigere Bedingungen erreicht werden können.

5.5.3.2 Was ist passive Kühlung?

Die Ergebnisse der Energiebedarfsanalyse zeigen, dass der Strombedarf für aktive Kühlung geringer sein kann als von passiver Kühlung. Dies wirft die Frage der Definition von passiver Kühlung erneut auf.

In der Fachliteratur finden sich folgende Kriterien für die Definition von „passiver Kühlung“. Beispielsweise werden folgende Definitionen genannt:

Passive Kühlung ist eine Kühlung

- ▶ ohne mechanischen Antrieb (Zimmermann 1998)
- ▶ mit geringem Energieaufwand (Lain et al. 2008)
- ▶ ausschließlich mit Energie aus natürlicher Umwelt erzeugt (Geetha, Velraj 2012)

Im Grundlagen-Kapitel, in Abschnitt 3.2.2.1, wird „passive Kühlung“ im Rahmen dieser Studie als passive Maßnahme definiert, bei welcher ein kühlendes Medium bewegt und verteilt wird, wobei jegliche aktive Kälteerzeugung auszuschließen ist. Und nach Kapitel 3.2.3 ist unter „aktiver Kühlung“ in Kältemaschinen oder Klimageräten erzeugte Kälte zu verstehen. DIN 4108-2:2013-02 definiert passive Kühlung als zur Raumkühlung eingesetzte Systeme, bei denen Energie ausschließlich zur Förderung des Kühlmediums erforderlich ist. Bei diesen beiden Definitionen spielt der Energiebedarf demnach keine Rolle.

Bei der Energiebedarfsanalyse wurden zwei Arten passiver Kühlung einbezogen, und zwar Grundwasser-Kühlung und mechanische Nachtlüftung. Zieht man nun sinnvollerweise den Energieaufwand mit in die Bewertung ein, lässt sich feststellen: während der Strombedarf für die Grundwasser-Kühlung deutlich unter dem einer aktiven Kühlung über eine Kompressionskältemaschine liegt, ergeben sich im Vergleich für die mechanische Nachtlüftung deutlich höhere Werte. Auch unter Einbeziehung möglicher Effizienzsteigerungen bleibt die mechanische Nachtauskühlung über eine zentrale RLT-Anlage energieintensiv (vgl. Kapitel 5.5.3.1). In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass es sich bei der konventionellen Kälteerzeugung über

Kompressionskältemaschinen - analog einer Wärmepumpe zur Wärmebereitstellung – schon um ein effektives Erzeugungssystem handelt.

Mit diesem Hintergrund wird klar, dass die Definition von passiver Kühlung so zukünftig (z.B. bei der Novellierung der DIN 4108-2) nicht beibehalten werden kann. Sinnvoll wäre, einen Grenzwert für die Stromeffizienz passiver Kühlung festzulegen, der unter dem einer aktiven Kühlung liegen muss. Kühlung sollte dann nur bei Grenzwert-Unterschreitung für den Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz als „passiv“ angesetzt werden dürfen.

Gleichzeitig wird empfohlen, über Monitoring tatsächliche Stromverbräuche von passiven Kühlsystemen zusammenzustellen und auszuwerten.

5.5.3.3 Kombination aus aktiver Kühlung und PV-Anlage

Im Kapitel 5.5.1 wird unter anderem die Kombination aus aktiver Kühlung und PV-Anlage untersucht. Was die Kombination vorteilhaft macht, ist die Gleichzeitigkeit von hoher PV-Stromausbeute und Kältemaschinenbetrieb (vgl. Abbildung 94). Auch bei der Kombination von aktiver Kühlung und PV ist der Einsatz von passiven Maßnahmen sinnvoll, um Kühlbedarfsspitzen und den damit verbundenen Strombedarf gering zu halten. Mit diesen Erkenntnissen könnte man diese Kombination als sinnvolle ressourcenschonende Option einschätzen. Aber es ist nicht ganz so einfach: wie schon aus dem Beispiel mit PV-Erzeugung beim Klassenzimmer abzuleiten war, hat bei diesem Beispiel der erzeugte PV-Strom nicht ausgereicht, um die RLT-Anlage und gleichzeitig noch die Kältemaschine mit PV-Strom zu versorgen (s. Abbildung 99).

Es sollte daher vermieden werden, dass Kältemaschinen in Verbindung mit einer PV-Anlage als solches als ressourcenschonend bewertet werden. Wichtig ist, dass über den Nutzer- und Anlagenstrom hinaus auch noch die Kältemaschine mit PV-Strom gedeckt werden kann. Hierfür sind u.U. sehr große PV-Anlagen mit entsprechend großem Platzbedarf auf dem Gebäudedach und der Fassade nötig. Genügend PV-Strom zu erzeugen, könnte noch schwieriger werden, wenn zukünftig weitere Strom-Verbraucher hinzukommen, wie z.B. Elektro-Mobilität. In diesem Zusammenhang spricht man dann von Sektorkopplung, d.h. weitere Verbraucher aus anderen Sektoren, wie Mobilität oder auch Wärmeerzeugung, müssen, um auch noch mit (PV-)Strom gedeckt werden.

Zu bedenken ist ferner, dass erzeugter PV-Strom in der Bewertung nicht als „gratis“ im Sinne des Energieaufwands (und natürlich auch nicht monetär) zu verstehen ist. Und zwar aus zwei Gründen: zum einen wegen des Energieaufwands zur Herstellung von PV-Anlagen²⁷ und zum anderen würde der Strom, wenn nicht am Gebäude verwendet, ins öffentliche Stromnetz eingespeist und dort anderweitig genutzt werden oder Strom aus fossilen Energieträgern verdrängen.

Die rein gebäudebezogene Sichtweise greift daher zu kurz und ist in einem größeren Kontext zu führen. Kann es bei PV-Stromeinspeisung ins öffentliche Netz an sonnigen Tagen ein „Zuviel“ geben? Bei „zu viel“ ins Niederspannungsnetz eingespeistem PV-Strom, also wenn die Stromproduktion den Stromverbrauch in diesem Netz-Abschnitt übersteigt, speisen Transformatoren die überschüssige Leistung weiter ins Mittelspannungsnetz. Bei sehr hohen Anlagendichten kann die Transformatorstation dabei an ihre Leistungsgrenze stoßen, in diesen Fällen müsste Strom abgeregelt werden und sodann das Verteilnetz und die Trafostation ausgebaut werden. Im Jahr 2020 wurde eine regenerativ erzeugte Strommenge von 6,1 TWh abgeregelt, davon 2,7 % Solarstrom und 96,7 % Windstrom (BNA 2021, zitiert nach Wirth 2022, S. 28f) Das bedeutet, schon jetzt ist nicht zu viel PV-Strom das Problem. Stromseitig ist absehbar, dass PV-Strom von den Hausdächern Deutschlands für ein künftiges Stromsystem wichtig sein wird. In den meisten

²⁷ Die energetische Amortisationszeit von PV-Anlagen hat sich in den letzten Jahrzehnten stark reduziert und liegt mittlerweile bei 2,1 Jahren für einen deutschen PV-Anlagenstandort mit monokristallinem Silizium (Hengstler et al. 2021)

Szenarien ist entsprechend nicht die Autarkie von Einzelgebäuden, sondern die vernetzte Anbindung der Gebäude ans Stromsystem wichtig. Von einer zukünftig regenerativen Stromerzeugung aus gedacht, würde daher ein für Kühlung verwendeter, am Haus erzeugter PV-Strom dem künftigen erneuerbaren Stromsystem fehlen. Für Zukunfts-Szenarien ist von der PV-Strom-Speicherung beispielsweise über Umwandlung per Elektrolyse zu Wasserstoff und dessen Einspeisung in ein zukünftiges Gasnetz o.ä. auszugehen.

Bei der Diskussion über Kühlen mit PV-Strom ist also die Unterscheidung zwischen einer gebäudebezogenen versus einer stromnetzbezogenen, einer derzeitigen versus einer zukünftigen Sichtweise wichtig.

5.5.4 Weiterführende Überlegungen zur Energieeffizienz

Passive Maßnahmenpakete können Überhitzung vermeiden bzw. abmildern. Dennoch kann eine weitergehende Temperierung der Innenräume in manchen Fällen sinnvoll oder auch notwendig sein. In diesen Fällen ist die Kühllast so gering wie möglich zu halten (ca. 40 W/m²), um die Kälte mit Flächenkühlsystemen möglichst unter Verwendung von Umweltkälte einbringen zu können. Der für die verbleibende Kühlung notwendige Strombedarf könnte wiederum gebäudenah von einer PV-Anlage erzeugt werden. Auch saisonale Speicher (z.B. Eisspeicher) wären eine Option zur Sicherung einer hohen Energieeffizienz. Es gibt also noch weiteres Potenzial, den energetischen Kühlaufwand zu verringern und zu guten Lösungen mit geringem Energieeinsatz zu kommen.

Grundsätzlich ist es zentral, dass Maßnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes, die Energie benötigen, auch in die energetische Bilanzierung des Gebäudes eingehen. Das ist derzeit (z.B. für mechanische Nachtlüftung) nicht der Fall und sollte dringend geändert werden. Ansonsten besteht die Gefahr, dass der sommerliche Wärmeschutz zu Lasten der Energieeffizienz des Gebäudes geht. Die Integration in die Energiebilanzierung würde zudem eine höhere Wahlfreiheit der Maßnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes eröffnen. Auf diese Weise könnten energieeffiziente Konzepte eingefordert und der Energiebedarf zum sommerlichen Wärmeschutz und regenerative Erzeugung zusammengeführt werden.

Die Thematik der Energieeffizienz von passiver oder auch aktiver Kühlung konnte in diesem Projekt nur punktuell untersucht werden und bedarf weiterer Vertiefung (vgl. Kapitel 8.7).

5.6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Hintergrund dieses Kapitels ist neben der wichtigen Analyse der mit dem sommerlichen Wärmeschutz verbundenen ökonomischen Auswirkungen auch das im GEG und insbesondere auch im §14 verankerte Wirtschaftlichkeitsgebot, das detailliert in Kapitel 6 analysiert und eingeschätzt wird. Im Rahmen dieser Parameterstudie werden aufbauend auf die Systematik und die Strombedarfsermittlung der Energiebedarfsanalyse (s. Kapitel 5.4) hinsichtlich ihrer ökonomischen Auswirkungen untersucht. Hierbei werden die Maßnahmenkombinationen MIN, STD, MAX, OPT und KKM betrachtet.²⁸

5.6.1 Vorgehensweise

Nachfolgend werden die gewählte Berechnungsmethode, der Umfang der Untersuchung sowie die betrachteten Kostengruppen und weitere Randbedingungen erläutert.

²⁸ Die Maßnahmenkombination GEO wird bei der Wirtschaftlichkeit ausgeklammert, da die zusätzlichen Kosten für die passive Kühlung über Geothermie eine zu große Streuung - abhängig vom jeweiligen System und den geologischen Bedingungen - aufweisen.

5.6.1.1 Berechnungsmethode

Die Berechnung wird nach der VDI Richtlinie 2067 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ anhand der Annuitätenmethode durchgeführt. Dabei wird zunächst der Kapitalwert einer Investition durch die Diskontierung (Abzinsung) aller Ein- und Auszahlungen innerhalb des Betrachtungszeitraums ermittelt. Abhängig vom Betrachtungszeitraum und dem gewählten Kalkulationszinssatz ergibt sich ein Annuitätenfaktor, anhand dessen der Gesamtkapitalwert auf gleichmäßige jährlich wiederkehrende Zahlungen (Annuitäten) umgerechnet werden kann. (Holm 2021)

5.6.1.2 Untersuchungsumfang

Betrachtet werden die Kosten, die für die sommerlichen Wärmeschutz-Maßnahmenpakete im Laufe des Gebäudelebenszyklus für die Erstellungs- und Nutzungsphase entstehen. Kosten, die am Ende des Lebenszyklus der jeweils getroffenen Maßnahme in Form von Abbruch, Rückbau, Recycling oder Entsorgung anfallen, werden im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet, da deren Anteil an den Gesamtlebenszykluskosten vernachlässigbar gering ist. (vgl. hierzu (DGNB 2018b), S. 277) Kosten, die unabhängig von der untersuchten sommerlichen Wärmeschutzmaßnahme für das Gebäude innerhalb der betrachteten Lebenszyklusphasen anfallen, werden nicht einbezogen. Wenn in einer Variante jedoch eine Komponente eingesetzt wird, die dem sommerlichen Wärmeschutz dient, wird die entsprechende Komponente, sofern vorhanden, auch in den anderen Varianten berücksichtigt (natürlich - wie in der jeweiligen Variante angesetzt - ohne Mehraufwendungen für den sommerlichen Wärmeschutz), so dass ein vergleichbarer Bilanzrahmen entsteht und die Mehrkosten für die jeweilige Sommerliche-Wärmeschutz-Maßnahme als Kostendifferenz ersichtlich werden. Nachfolgend werden einige Beispiele zur Erläuterung der Vorgehensweise angeführt:

- ▶ Der Einsatz einer Sonnenschutzverglasung in einer Variante führt dazu, dass die Verglasungskosten in allen Varianten betrachtet werden, um den Kostenvergleich zwischen Wärmeschutz- und Sonnenschutzverglasung zu ermöglichen. Hierbei werden nur die Verglasungskosten berücksichtigt, nicht der Fensterrahmen, da dieser bei allen Varianten gleich ist und keine Maßnahme darstellt.
- ▶ Beim opaken Lüftungselement hingegen, das allein als Maßnahme zum sommerlichen Wärmeschutz dient, wird das gesamte Element inklusive Rahmen und Öffnungselement für die Varianten mit freier Nachtlüftung berücksichtigt, bei den anderen Varianten entstehen keine diesbezüglichen Kosten, weil kein Lüftungselement vorhanden ist.
- ▶ Lüftungsanlagen werden auch bei der Schulnutzung angesetzt, obwohl sie hier dem hygienischen Mindestluftwechsel und nicht dem sommerlichen Wärmeschutz dienen. Da es aber Adiabatik (indirekte Verdunstungskühlung) als Maßnahme für den sommerlichen Wärmeschutz gibt, für die eine RLT-Anlage Voraussetzung ist, werden für alle Varianten die mit der RLT-Anlage verbundenen Kosten berücksichtigt.

In Tabelle 40 findet sich eine Übersicht, welche Komponenten einbezogen werden (vgl. Maßnahmenpakete Tabelle 25).

Tabelle 40: Übersicht über berücksichtigte Komponenten

Tabellenkopf	MIN	STD	MAX	OPT	KKM
Verglasung	WSV	WSV	SSV	SSV	WSV
Außenliegende Jalousie inkl. Zubehör	Jalousie	Jalousie	Jalousie	Jalousie	Jalousie

Tabellenkopf	MIN	STD	MAX	OPT	KKM
Nachtlüftungselement (NLE) (Büro)	-	NLE	-	NLE	-
Nachtlüftungselement (NLE) (Schule)	-	-	-	NLE	-
RLT-Anlage inkl. Zubehör (Büro)	-	-	RLT+AD	RLT+AD	-
RLT-Anlage inkl. Zubehör (Schule)	RLT	RLT	RLT+AD	RLT+AD	RLT
KKM inkl. Zubehör	-	-	-	-	KKM

Umwelt-Folgekosten (z.B. durch das GWP von Kältemitteln verursachte Umweltschäden) sind nicht Bestandteil dieser Untersuchung. Eine Einbeziehung könnte jedoch dazu beitragen, mit Investitionsentscheidungen einhergehende Umweltauswirkungen monetär zu quantifizieren und sollten in die Entscheidungsfindung einbezogen werden. (vgl. Kapitel 6.1.2.1.2 letzter Absatz)

Die aktuelle Entwicklung der CO₂-Bepreisung von Energieträgern wird indirekt über die Energiepreissteigerung abgebildet. Da der in allen Varianten angesetzte Energieträger Strom dem internationalen Zertifikathandel unterliegt, wird die Bepreisung der CO₂-Emissionen indirekt an den Endverbrauchenden über Endverbraucherpreise weitergegeben und damit berücksichtigt.

5.6.1.3 Randbedingungen

Die der Berechnung zugrunde gelegten Randbedingungen sind in Tabelle 41 zusammengefasst.

Tabelle 41: Angesetzte Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Berechnungsparameter	Angesetzter Wert	Quelle
Betrachtungszeitraum	50 Jahre	(DGNB 2018b)
Kalkulationszinssatz	3,0 %	(DGNB 2018b)
Preisänderungsraten für kapital- und betriebsgebundene Kosten	2,0 %	(DGNB 2018b)
Preissteigerung für Energiekosten (Strompreissteigerung)	5,0 %	(DGNB 2018b)
Preissteigerung für Wasser (für adiabates Kühlen)	1,5 %	(Statista 2021a)
Gewerbestrompreis	23,23 ct/kWh	(Statista 2021b*)
Gewerbewasserpreis	2,00 €/m ³	(Destatis 2020)

*bei einem Jahresverbrauch von ca. 50 MWh

5.6.1.4 Kostengruppen

Die im Rahmen dieser Studie untersuchten Kostenbestandteile werden den nach VDI 2067 Blatt 1 vorgesehenen drei Kostengruppen kapital-, betriebs- und bedarfsgebunden Kosten zugeordnet. Sonstige Kosten, die nach VDI die Planung, Versicherung, Steuern etc. umfassen, sind nicht Teil der Bewertung.

5.6.1.4.1 Kapitalgebundene Kosten

Unter kapitalgebundenen Kosten werden die Erst- und Reinvestitionskosten der baulichen oder technischen Anlagen zusammengefasst, die einen Einfluss auf das sommerliche Wärmeverhalten der Zone haben und im Rahmen dieser Untersuchung variiert werden.

► Bauliche Maßnahmen

Die Preisannahmen für Verglasung, Sonnenschutz und Lüftungselement stammen vom Architekturbüro Bieling Architekten, Kosten für den Sonnenschutzstellantrieb und die automatische Steuerung für Sonnenschutz und Nachtlüftungselement entsprechen Erfahrungswerten der Abteilungen TGA (Technische Gebäudeausrüstung) und MSR (Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik) des Ingenieurbüro Hausladen (IBH)²⁹. Die angesetzten Kosten für die baulichen Komponenten sind in Tabelle 42 zusammengestellt.

Tabelle 42: Angesetzte Kosten baulicher Komponenten

Parameter	Komponente	Preis je Element [€/Stk.]	Preis je m ² [€/m ²]	Quelle
Verglasung	Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung $g = 0,62$; $U_g = 1,0$ bis $1,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		45,0	Bieling 2022
	Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung $g = 0,38$; $U_g = 1,0$ bis $1,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		65,0	Bieling 2022
Sonnenschutz	außenliegender Sonnenschutz (automatisch gesteuert), 70 mm breite Lamellen, 70 mm Abstand von der Fassade, um 45° geneigt		115,0	Bieling 2022
	Stellantrieb Sonnenschutz	100,0		IBH 2022
	Steuerung, Verkabelung, Anschluss an die Gebäudeautomation	150,0		IBH 2022
Nachtlüftungselement	opakes Lüftungselement	1.032,4		Bieling 2022
	Stellantrieb Nachtlüftungselement	820,0		Bieling 2022
	Steuerung, Verkabelung, Anschluss an die Gebäudeautomation	100,0		IBH 2022
	Außenwandreduktion Lüftungselement		-147,4	(BKI 2021)

Die Angaben zur Verglasung gelten lediglich für die Kosten der Verglasung selbst, ohne Berücksichtigung des Rahmens, da dieser im Laufe der Studie nicht variiert wird und nicht den sommerlichen Wärmeschutz betrifft. Alle in Tabelle 42 aufgeführten Angaben sind als Durchschnittswerte zu verstehen und maßgeblich abhängig von den tatsächlich benötigten Mengen. Dadurch können sich Toleranzen von bis zu 20 % ergeben³⁰.

Außenliegende Jalousien können auch die Funktion eines Blendschutzes übernehmen. Dieser Zusatznutzen wird in der Berechnung nicht betrachtet.

²⁹ Die Kostenschätzungen von Bieling Architekten und vom Ingenieurbüro Hausladen wurden im Februar und März 2022 aufgestellt.

³⁰ H. Sparbrodt, Bieling Architekten, Korrespondenz 18.02.2022

► Anlagentechnische Komponenten

Die Kostenannahmen für Anlagentechnische Komponenten stammen von bürointernen Erfahrungswerten der Abteilung für Technische Gebäudeausrüstung des Ingenieurbüro Hausladen, die auf zahlreichen Büro- und Schulprojekten beruhen. Die kapitalgebundenen Kosten der raumluftechnischen Anlagen sind auf den Nennvolumenstrom bezogen angegeben, also auf die Luftmenge, die durch die Anlage im Auslegungsfall innerhalb einer Stunde ausgetauscht werden kann (s. Tabelle 43).

Tabelle 43: Angesetzte Kosten der RLT-Komponenten

RLT-Komponente	Preis je RLT-Komponente [€/m ³ /h]	Preis je RLT-Komponente mit Adiabatik [€/m ³ /h]
RLT-Anlage (Ventilator, Nachheizregister, Kühlregister/adiabate Rückkühlung, Wärmerückgewinnung)	4,75	5,25
Luftfilter (Grob- und Feinfilter)	0,25	0,25
Wasseraufbereitungsanlage	-	0,60
Kanalnetz (Zu- und Abluftkanal, Volumenstromregler, Schalldämpfer, Brandschutzklappen)	11,50	11,50
Wärmedämmung	4,50	4,50
Luftauslässe	4,00	4,00
MSR (Anlagenregelung)	2,50	2,50

Quelle: IBH 2022

Da die Wärmerückgewinnung in der raumluftechnischen Anlage im Heizfall Einfluss auf den Heizenergiebedarfe hat, wirkt sich die RLT-Anlage ganzjährig auf den Energiebedarf aus. Aus diesem Grund werden die kapital- und betriebsgebundenen Kosten der RLT-Anlage nicht nur betriebsabhängig für den Sommerfall, sondern voll angesetzt. Im Gegenzug wird - wie auch bei der Energiebedarfsanalyse - die Einsparung für den geringeren Heizwärmebedarf berücksichtigt.

Die Preisangaben der Kompressionskälteanlage umfassen die Erzeugung und die Verteilung (s. Tabelle 44). Dabei ist zu beachten, dass die von der Kälteleistung abhängigen Investitionskosten stark nach Hersteller, Wettbewerbssituation und Gebäudegegebenheiten variieren können. Der Berechnung einzeln zugrunde gelegt ist die spezifische Kälteleistung, welche den Kühllast-Simulationen der jeweiligen KKM-Variante entstammt (s. Tabelle 51 für den Büroraum und Tabelle 53 für das Klassenzimmer).

Tabelle 44: Angesetzte Kosten der KKM-Komponenten

KKM-Komponente	Preis je Komponente [€/kW]
Kompressionskälteanlage	400
Rückkühler (trocken)	240
Verteilung (Rohrleitungen, Dämmung, Pumpen, Armaturen, Ausdehnungsgefäße)	160

Quelle: IBH 2022

Für die Dimensionierung der Anlagentechnik wird ein fiktives Gebäudevolumen mit den getroffenen Randbedingungen in Tabelle 45 zugrunde gelegt, die sich an je einem Referenzprojekt des Ingenieurbüro Hausladen orientieren.

Tabelle 45: Angesetzte Gebäuderandbedingungen für Anlagendimensionierung

Randbedingung	Büro	Schule
BGF	3.000 m ²	3.600 m ²
NGF	2.550 m ²	3.060 m ²
Netto-Luftvolumen (bei 3,0 m lichter Raumhöhe)	7.650 m ³	9.180 m ³
Luftwechsel	1,33 h ⁻¹	4,59 h ⁻¹
Auslegungsvolumenstrom	10.175 m ³ /h	42.136 m ³ /h

5.6.1.4.2 Betriebsgebundene Kosten

Unter die betriebsgebundenen Kosten fallen alle Aufwände für die Instandsetzung, die Wartung, die Inspektion, die Reinigung und die Bedienung der betrachtungsrelevanten baulichen Komponenten bzw. der technischen Anlagen. Die Aufwände dafür erfolgen in Anlehnung an die VDI 2067 anteilig an den Herstellkosten pro Jahr und sind in Tabelle 46 aufgeführt.

Tabelle 46: Rechnerische Nutzungsdauer und jährliche Aufwände

Anlagenkomponente	Rechnerische Nutzungsdauer [a]	Aufwand für Instandsetzung [%/a]	Aufwand für Wartung und Inspektion [%/a]	Aufwand für Bedienen und Reinigen [h/a]	Quelle
Verglasung: Zweischeiben-Wärmeschutz-Isolierglas, Sonnenschutz-Isolierglas	30	0,35	0,1	0	(BMI 2015)
Jalousien: Kunststoff, Aluminium	25	0,35	0,1	Reinigungsflächen abhängig	(BMI 2015)
Stellgeräte	10	10	1	0	VDI 2067
Gebäudeautomation, Sensoren (z.B. Temperaturfühler)	10	10	2	0	VDI 2067
Raumlufttechnische Anlagentechnik mit adiabater Abluftbefeuchtung*	15	3	4	0	VDI 2067
Kanalnetz*	30	0	2	0	VDI 2067
Filter	8	15	2	0	VDI 2067
Luftdurchlass	20	0	1	0	VDI 2067
Wärmedämmung für Rohrleitungen	20	1	0	0	VDI 2067
MSR (Anlagenregelung)	10	10	2	0	VDI 2067
Wasseraufbereitungsanlage	15	1	2	1	VDI 2067
Kompressionskälteanlage	15	2	1,5	1	VDI 2067
Rückkühlwerk	20	2	1,5	0	VDI 2067
Verteilung der KKM*	15	2	1,5	0	IBH 2022

*da hierzu die Kostenangaben zusammengefasst als Komponentenpaket vorliegen (s. Tabelle 43 und Tabelle 46), werden die Aufwandswerte von maßgebenden Einzelkomponenten dieser Komponentenkombination aus der VDI 2067 herangezogen.

Der Bedienungsaufwand technischer Anlagen wird mit einem Stundensatz von 70 €/h (Ansatz IBH 2022) der Reinigungsaufwand für den Sonnenschutz mit 17 €/h (BMI 2015) verrechnet.

5.6.1.4.3 Bedarfsgebundene Kosten

Die bedarfsgebundenen Kosten berücksichtigen die Endenergiebedarfe aus Kapitel 5.5.2. Diese werden lediglich mit dem Arbeitspreis des Energietarifs verrechnet, da der bedarfsunabhängige Grundpreis der Stromkosten nur für die Bereitstellung anfällt und damit keinen Erkenntnismehrwert zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit einzelner passiver Maßnahmen liefert. Um den Wasserbedarf in der Maßnahme mit der in der adiabater Abluftbefeuchtung zu beachten, wird die Betriebszeit des Befeuchters in [h/a] zugrunde gelegt.

Der Nutzungsstrom sowie Trinkwasserbedarfe werden nicht berücksichtigt.

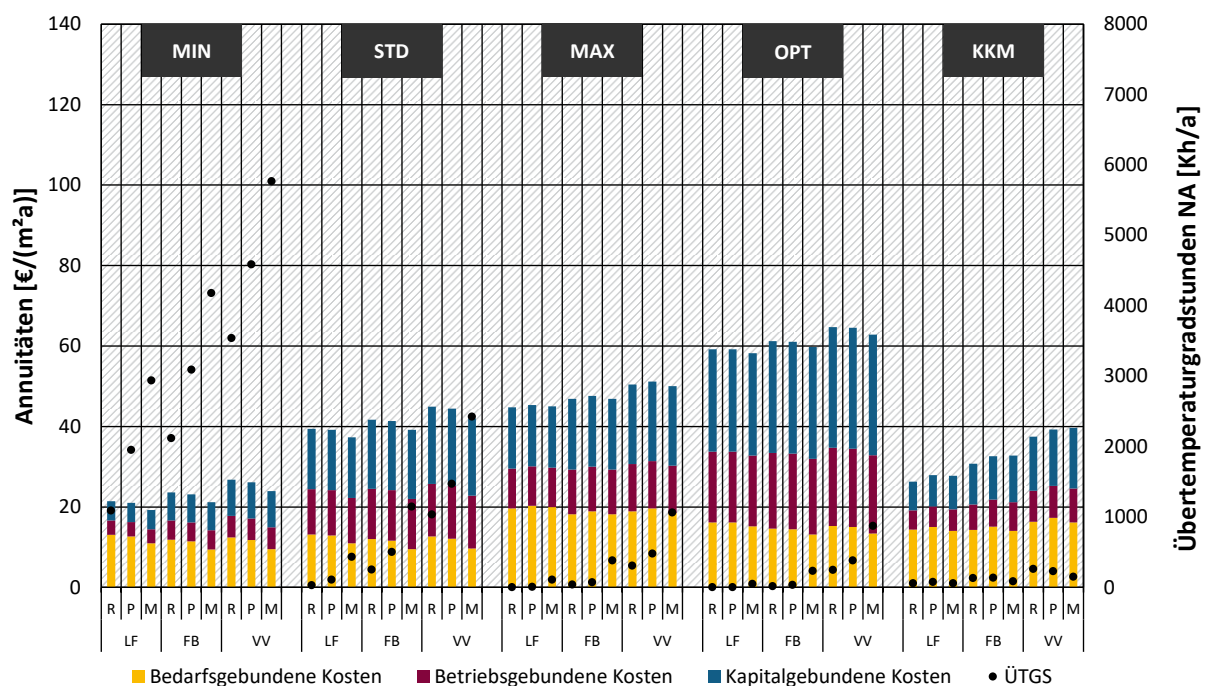
Die Energiepreise unterliegen derzeit einer hohen Volatilität, was eine zu erwartende Preissteigerung der Energiekosten schwer beziffern lässt. Im Rahmen dieser Untersuchung wird sie mit 5,0 % angesetzt (s. Tabelle 41).

Für die folgende Kostengegenüberstellung der fünf Maßnahmenpakete sei darauf hingewiesen, dass diese hinsichtlich der recherchierten Preisannahmen Unsicherheiten unterliegt. Insbesondere für die Bewertung der bedarfsgebundenen Kosten passiver Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz ist der angesetzte Energiepreis entscheidend. Sowohl die Annahmen der Preisentwicklung für Energie als auch die Preisänderung für kapital-, betriebs- und bedarfsgebundene Kosten können von den hier gemachten Annahmen abweichen, beeinflussen die Ergebnisse aber entscheidend.

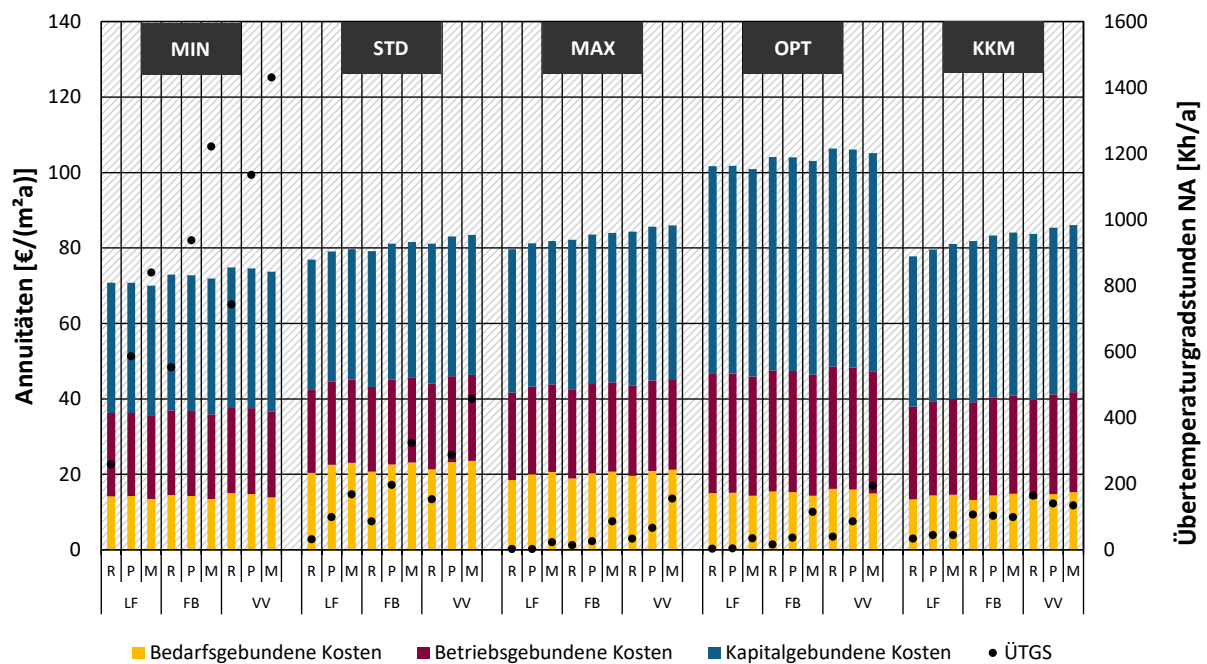
5.6.2 Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbewertung für das Büro in Abbildung 100 und das Klassenzimmer in Abbildung 101 dargestellt. Informativ ist die ÜTGS-Anzahl für jede Variante als schwarzer Punkte eingezeichnet.

Abbildung 100: Wirtschaftlichkeit - westorientiertes Büro (TRY2045)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

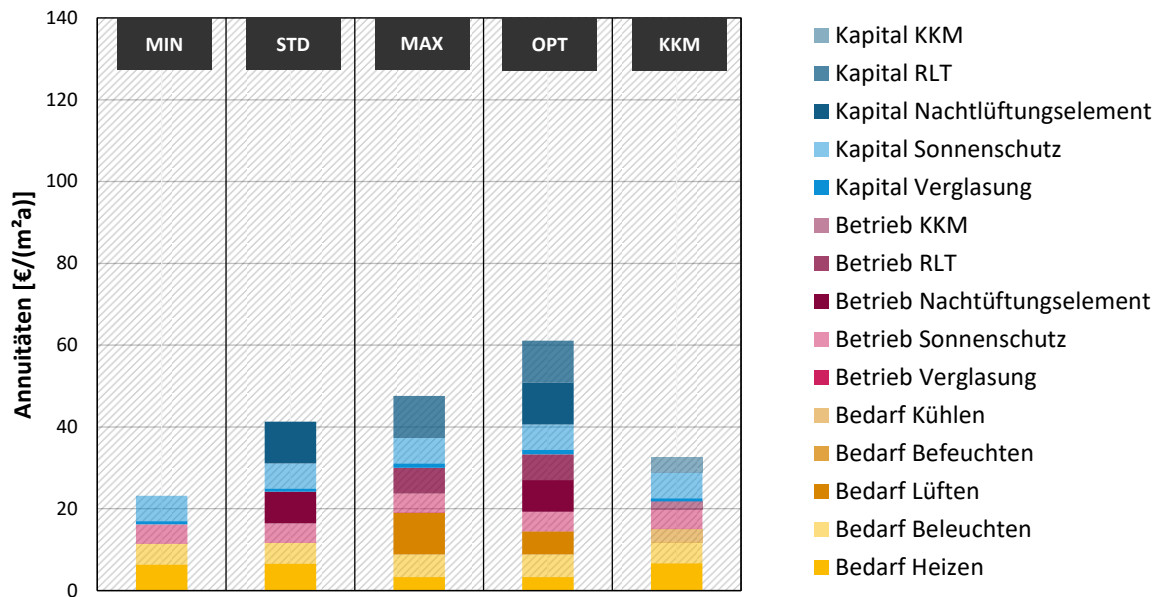
Abbildung 101: Wirtschaftlichkeit - westorientiertes Klassenzimmer (TRY2045)

Quelle: eigene Darstellung, IBH

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergeben sich deutliche Verschiebungen hinsichtlich der Aussagen im Vergleich zur Analyse von energetisch günstigen Varianten (vgl. Kapitel 5.4). Unter ökonomischen Gesichtspunkten schneidet die OPT-Variante sowohl beim Büro als auch bei der Schule am schlechtesten ab. Beim Büro ist das STD-Maßnahmenpaket deutlich kostenintensiver als das MIN-Maßnahmenpaket.

Für das Klassenzimmer fallen die bedarfs-, betriebs- und kapitalgebundenen Kosten in allen fünf Maßnahmenpaketen weit höher aus als für das Büro, was in erster Linie auf die RLT-Anlage in der Schule zurückzuführen ist, die in jeder Schul-Variante berücksichtigt wird.

Die Ergebnisse sollen nachfolgend noch detaillierter auf Basis der Aufsplittung in Kostengruppen und Kostenträger analysiert werden. In Abbildung 102 (Büro) und Abbildung 103 (Klassenzimmer) wird am Beispiel der Variante Fensterband Potsdam für das TRY2045 gezeigt, wie sich die drei Kostengruppen auf die jeweiligen Kostenträger aufteilen.

Abbildung 102: Wirtschaftlichkeit für die Fensterband-Varianten mit Standort Potsdam – westorientiertes Büro (TRY2045)

Quelle: eigene Darstellung, IBH

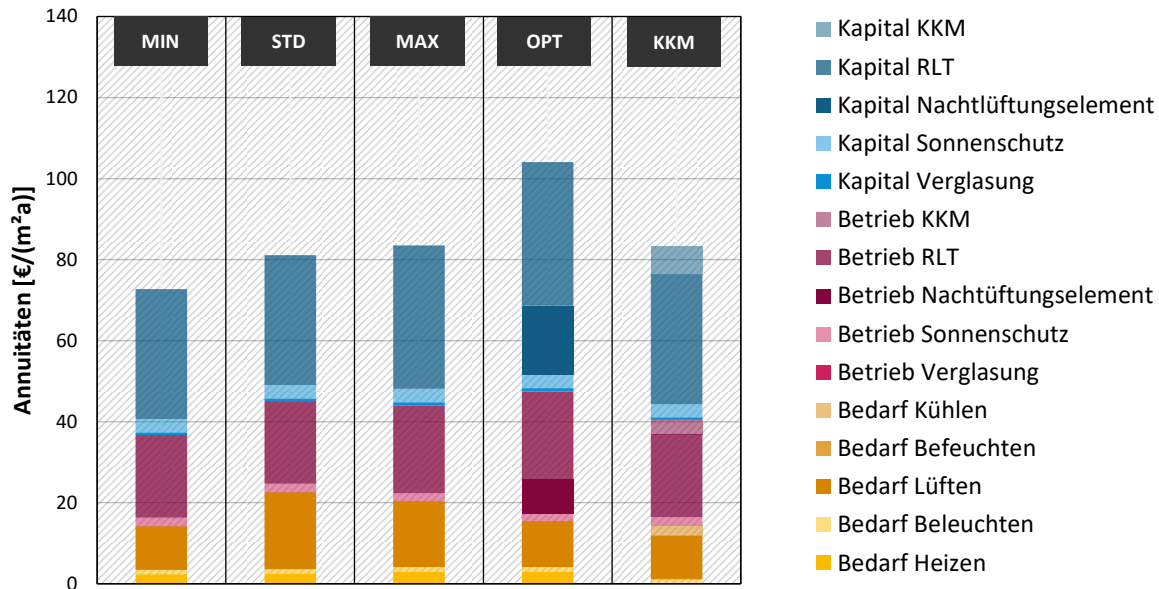
Folgende Punkte fallen bei den Varianten auf:

- ▶ Bei der MIN-Variante des Büros sind die Kosten insgesamt gering, wobei die bedarfsgebundenen Kosten beinahe so hoch ausfallen wie die betriebs- und kapitalgebundenen Kosten zusammen.
- ▶ Beim STD-Maßnahmenpaket sind die bedarfsgebundenen Kosten gleich hoch wie im MIN-Fall, allerdings führen die automatisch betriebenen Nachtlüftungselemente zu einem erheblichen Sprung in den betriebs- und kapitalgebundenen Kosten. Günstiger würde diese Variante ausfallen, wenn das Nachtlüftungselement nicht automatisch gesteuert, sondern manuell bedient würde. Für diesen Fall wäre ein Einbruchs- und Witterungsschutz erforderlich. Insgesamt könnte bei manueller Bedienung eine Kosteneinsparung von 34 % im Vergleich zum automatisch gesteuerten Nachtlüftungselement erreicht werden.
- ▶ Bei der MAX-Variante sind die bedarfsgebundenen Kosten besonders hoch, insbesondere für die mechanische Lüftung.
- ▶ Bei der Variante OPT mit insgesamt den höchsten Kosten wird ersichtlich, dass die kapitalgebundenen Kosten für das automatisch gesteuerte Nachtlüftungselement (10,21 €/m²) fast so hoch liegen wie die für die RLT zur mechanischen Taglüftung (10,26 €/m²).
- ▶ In der Variante der KKM, die den zweitgünstigsten Fall abbildet, sind die kapital- und betriebsgebundenen Kosten stark abhängig von der zugrunde liegenden spezifischen Kälteleistung. Hier zugrunde gelegt wurde für jede KKM-Variante die jeweils simulierte Kühllast (s. Kapitel 5.6.1.4.1).

Die in der OPT-Kombination hervorgerufene Reduktion der bedarfsgebundenen Kosten im Vergleich zur MAX Variante können die Mehrkosten in Betrieb und Kapital nicht ausgleichen, was an der Vielzahl an kapital- und betriebsrelevanten Komponenten liegt, die dem sommerlichen Wärmeschutz dienen. Die Nachtlüftungselemente weisen die höchsten Betriebskosten auf

(7,73 €/m²). Sie liegen selbst höher als die der RLT (6,28 €/m²). Für die Nachtlüftungsflügel stellen der Stellantrieb und die instandhaltungs- und wartungsintensive automatische Steuerung und Sensorik die kostentreibenden Faktoren dar. Dagegen zeichnen sich bei den bedarfsgebundenen Kosten die Wasserkosten der Adiabatik nur marginal ab, da der Bedarf aufgrund der niedrigen Befeuchtungsdauer sehr gering ist.

Abbildung 103: Wirtschaftlichkeit – Klassenzimmer mit Fensterband TRY2045 (Potsdam)



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Die Bedarfs-, Betriebs- und Kapitalkosten für die mechanische Lüftung sind beim Klassenzimmer in allen fünf Maßnahmenkombinationen dominierend. Folgende Aspekte aus dem Variantenvergleich sind ferner erwähnenswert:

- Im Fall des Klassenzimmers unterscheiden sich die Kosten für das MIN- und STD-Maßnahmenpaket allein in den Mehrkosten des zusätzlichen Strombedarfs, der durch die mechanische Nachtlüftung beim STD-Fall zustande kommt.
- Beim MAX-Maßnahmenpaket steigt der Bedarf um die zusätzliche adiabate Kühlung, was im Vergleich zur STD- und MIN-Variante auch zu höheren Kosten in Betrieb und Kapital der RLT-Anlage führt.
- Alle fensterbezogenen Kosten für Sonnenschutz-Verglasung und außenliegenden Sonnenschutz sind verglichen mit den RLT-verbundenen Kosten gering. Auch im Vergleich zum Büro fallen sie aufgrund der geringeren grundflächenbezogenen Fensterflächenanteile niedriger aus.
- Die Höhe der Gesamt-Annuitäten der fünf Maßnahmenpakete sind wie im Büro aufsteigend von MIN, über STD und MAX bis OPT, die Variante KKM liegt bei der Schule mit 83,3 €/m² ähnlich hoch wie MAX mit 83,5 €/m².

5.6.3 Diskussion

Hintergrund der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung war die Annahme, dass die rechtlichen Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz nach GEG, dem Wirtschaftlichkeitsgebot des Energieeinspargesetzes bzw. des Gebäudeenergiegesetzes unterliegen. Deshalb sollte eine Einschätzung erfolgen, welche Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz wirtschaftlich sind. Die Annahme, wonach die Vorschriften zum sommerliche Wärmeschutz nach GEG dem Wirtschaftlichkeitsgebot unterliegen, hat sich jedoch nicht bestätigt (s. Kapitel 6): Das Wirtschaftlichkeitsgebot findet im Einzelfall ausschließlich im Rahmen von 14 Abs. 4 GEG Anwendung, also nur, wenn Anlagen zur Kühlung eingesetzt werden. Für alle anderen Fälle gelten die geforderten baulichen Maßnahmen zur Minderung des Sonneneintrags nach § 14 Abs. 2 GEG generell als wirtschaftlich vertretbar.

Im Rahmen dieser Studie werden passive Maßnahmen ohne Anlagen zur Kühlung untersucht. Für diese gibt es aber per se keine Möglichkeit der Wirtschaftlichkeit im Sinne einer Amortisation. Eine Investition wird nämlich als wirtschaftlich bewertet, wenn die Investitionsmehrkosten durch künftige Minderkosten im Betrieb kompensiert werden können. Grundsätzliches Problem bei den passiven Maßnahmen ohne aktive Kühlung ist, dass keine Energieeinsparung erfolgt, die gegengerechnet werden könnte. Ob diese Art der Wirtschaftlichkeitsbewertung auch für sommerliche Wärmeschutzmaßnahmen heranzuziehen ist, bleibt zu diskutieren. Es stellt sich die Frage, welche Minderkosten im Betrieb gegebenenfalls ansetzbar wären. Überlegungen hierzu werden getrennt für gekühlte und ungekühlte Gebäude geführt:

► Passive sommerliche Wärmeschutzmaßnahmen in ungekühlten Gebäuden

Da nicht aktiv gekühlt wird, kommt es durch die passiven Maßnahmen zwar zu einer Reduktion von Übertemperaturgradstunden, aber zu keiner (Kühl-)Energieeinsparung. Aber auch indirekte und subjektive Parameter wie Komforterhöhung spielen bei Investitionsentscheidungen eine Rolle, die gegebenenfalls monetär bewertet werden könnten. Zu solchen Parametern gehören beispielsweise: Aufrechterhaltung der Nutzbarkeit.

- Unbehaglich hohe Temperaturen können zu Klagen bzw. Mietminderung³¹ führen. Passiven Maßnahmen, die dazu beitragen, dass es nicht zu Klagen oder Mietausfällen kommt, könnte dies gutgeschrieben werden.
- Zu hohe sommerliche Raumtemperaturen senken die Leistungsfähigkeit und Produktivität. Es bestünde die Möglichkeit den Leistungsabfall der Mitarbeiter in Geldeinheiten bewertbar zu machen.³²
- Auch eine Wertsteigerung von Immobilien durch erhöhten thermischen Komfort (bei geringen Energiekosten) infolge von passiven Maßnahmen könnte bewertet werden.
- Schließlich könnte auch eine monetäre Bewertung der Vermeidung von körperlicher Hitzebelastung mit Krankheitsfolgen erfolgen.

³¹ Nach einem Urteil des Bielefelder Landgerichtes vom 26.03.2003 (Landgericht Bielefeld, 3 O 411/01) beispielsweise darf als Mindestanforderung für die Gebrauchstauglichkeit von Büroräumen bei einer Außentemperatur von bis zu 32 °C die Innentemperatur 26 °C nicht übersteigen. Bei höheren Temperaturen muss die Innentemperatur mindestens 6 K unter der Außentemperatur liegen muss. In (Fahrion 2015) sind einige gerichtlich bestätigte Minderungsquoten zusammengestellt: diese liegen zwischen 16,5 % und 33 %, gelten aber nur für Zeiträume, in denen es tatsächlich zu einer Überhitzung kam. Die Frage, wann von einem Mangel auszugehen ist, wird in der Rechtsprechung nicht einheitlich bewertet.

³² Eine an einem Bestandsgebäude ohne Kühlung durchgeführte Bewertung der Leistungssteigerung anhand der Arbeitskosten zeigte, dass auch hohe Sanierungskosten für baukonstruktive Anpassungsmaßnahmen auf diese Weise wirtschaftlich darstellbar sein können (Fahrion 2015).

Auch wenn ein Versuch unternommen wird, obige Punkte monetär zu bewerten, wird es auf dieser Basis kaum möglich sein, eine Wirtschaftlichkeit nachzuweisen. Der monetäre Nutzen von passiven sommerlichen Wärmeschutzmaßnahmen ist hierfür zu schwer greifbar.

► Passive sommerliche Wärmeschutzmaßnahmen in gekühlten Gebäuden

Das Wirtschaftlichkeitsgebot findet, wenn Anlagen zur Kühlung eingesetzt werden, im Rahmen von 14 Abs. 4 GEG Anwendung. Um die Wirtschaftlichkeit von passiven Maßnahmen in Gebäuden mit Kühlung einschätzen zu können, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes eine Masterarbeit mit dem Titel „Wirtschaftlichkeitsbewertung passiver Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz von Bürogebäuden auf Basis dynamisch-thermischer Gebäudesimulation“ (Schmitteckert 2022) erstellt. Hier sei eine kurze Zusammenfassung gegeben:

Als Vergleichsbasis wird ein Referenzfall mit einer aktiven Kühlung und außenliegendem Sonnenschutz für einen Musterbüroraum (Standort Potsdam, TRY2045 und TRY2045x) definiert, in welchen passive Einzelmaßnahmen implementiert werden. Erwartungsgemäß führen alle zehn Maßnahmen zu einer Reduktion des Kühlbedarfs. Ganzjährig betrachtet beeinflussen die getroffenen Maßnahmen auch den Heizbedarf, den Beleuchtungsbedarf oder den mechanischen Lüftungsstrombedarf, so dass nur noch fünf der passiven Maßnahmen einen geringeren Gesamtenergiebedarf als der zugrunde liegende Basisfall aufweisen. Diese umfassen die moderate Sonnenschutzverglasung, einen verringerten Fensterflächenanteil sowie unterschiedliche Ausführungen von freien manuell öffnbaren oder automatisch gesteuerten Nachtlüftungselementen. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden die resultierenden bedarfs-, kapital- und betriebsgebundenen Kosten mittels der Annuitätenmethode nach der VDI Richtlinie 2067 über einen Zeitraum von 50 Jahren bewertet und in Vergleich zum zugrunde liegenden Basisfall gesetzt. Komponentenreiche Maßnahmen wie die raumluftechnischen Anlagen, insbesondere aber die automatisch betriebenen Nachtlüftungsflügel resultieren dabei in hohen kapital- und betriebsgebundenen Kosten. Ausschließlich der reduzierte Fensterflächenanteil und – für die Variante mit erhöhtem Fensterflächenanteil (Eckraumposition) – die moderate Sonnenschutzverglasung stellen sich wirtschaftlicher dar als der zugrundeliegende Basisfall. Alle anderen einzelnen passiven Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz weisen höhere Kosten in Investition und Betrieb auf, als dass sie durch eine etwaige Reduktion in den Strombedarfskosten kompensiert werden könnten³³.

Für die in (Schmitteckert 2022) untersuchten Varianten hat sich demnach herausgestellt, dass – abgesehen von der Reduzierung des Fensterflächenanteils³⁴ – keine Wirtschaftlichkeit bei Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz erreichbar ist. Ausnahme bildet eine Sonnenschutzverglasung bei hohem Verglasungsanteil (grundflächenbezogener FFA 67 %). Ferner können passive Maßnahmen den Gesamtenergiebedarf erhöhen (z.B. bei der Sonnenschutzverglasung durch mehr Energiebedarf für Heizwärme und Beleuchtung, bei mechanischer Nachtlüftung oder passiver Kühlung durch mehr Hilfsstrombedarf).

Eine weitere Schwierigkeit besteht in der Allokation von Kosten, die nicht eindeutig Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz zugeordnet werden können (z.B. Rollläden, RLT-Anlage). Diese Maßnahmen führen zur Reduktion des Kühlbedarfs, können aber auch gleichzeitig für

³³ Dies gilt auch für die Variante ohne außenliegenden Sonnenschutz, deren Lebenszykluskosten knapp unter dem Basisfall mit Sonnenschutz liegt. Hierbei wurde mit einer Energiepreissteigerung von 5 % gerechnet. Ergäben sich höhere Energiepreissteigerungen, würde sich für den außenliegenden Sonnenschutz eine Wirtschaftlichkeit ergeben.

³⁴ Eine Reduzierung der Fensterflächen führt zu geringeren Investitionskosten, andererseits steigen die Stromkosten für Beleuchtung und Heizung in der Nutzungsphase. Gesamtergebnis war jedoch, dass die Kostenreduktion durch die geringeren Fensterflächen die Mehrkosten im Strombedarf für Beleuchten und Heizen übertrifft, so dass sich auch im Lebenszyklus eine Einsparung ergibt.

andere Zwecke dienen (z.B. Rollläden dienen auch der Verdunkelung, als Sicht- und Einbruchschutz oder eine RLT-Anlage mit WRG, die die Luftqualität verbessert und im Winter den Heizwärmebedarf vermindert.)

Zusätzlich führt die aktive Kühlung, auch in Kombination mit passiven Maßnahmen, zu nicht monetären Nutzen, wie schon beim Punkt „Passive sommerliche Wärmeschutzmaßnahmen in ungekühlten Gebäuden“ beschrieben. Es stellt sich die Frage, ob und wie diese bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung einbezogen werden können bzw. sollen.

Ein erweiterter Betrachtungsansatz auch unter Einbeziehung eines CO₂-Preises ist schließlich notwendig (vgl. Kapitel 6.1.2.1.2 letzter Absatz).

Schlussendlich lässt sich durch diese Diskussion erkennen, dass es auch unter wirtschaftlichen Aspekten am besten ist, wenn durch gute Planung wenig zusätzliche passive Maßnahmen erforderlich sind. Und hier steht ein moderater Fensterflächenanteil an erster Stelle, der im Vergleich zu einer Vollverglasung neben geringeren Investitionen für zusätzliche Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz zu geringeren Heiz- und ggf. Kühlenergiekosten führt.

5.7 Exkurs – Ökobilanz (Eberle 2021)

Im Sinne des Klimaschutzes ist es Ziel des Einsatzes passiver Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz, den Kühlenergiebedarf zu reduzieren bzw. Kältemaschinen verzichtbar zu machen. Der Fokus bei der Energiebedarfsanalyse liegt klar auf dem Einfluss passiver Maßnahmen auf den Energiebedarf während der Nutzungsphase. Das Treibhauspotential, welches mit dem Einsatz passiver Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz in anderen Lebenszyklusphasen von der Herstellung bis zur Entsorgung einhergeht, wurde nicht betrachtet. Ergänzend wurde daher in Masterarbeit (Eberle 2021) im Rahmen dieses Forschungsprojekt das Treibhauspotential einzelner passiver Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz über den gesamten Lebenszyklus untersucht und ins Verhältnis zu ihrer Wirksamkeit gesetzt. Zielstellung, Methodik und Ergebnisse sollen nachfolgend - stark verkürzt und auf einige Varianten beschränkt - vorgestellt werden.

Mithilfe von thermisch-dynamischen Simulationen wird u.a. anhand eines vollverglasten Büromusterraums das Potential von Maßnahmen aus den Bereichen Sonnenschutz, Lüftung und passive Kühlung, die Überhitzung des Musterraums zu begrenzen, ermittelt. Ebenso wird das Treibhauspotential, das durch diese Maßnahmen bei Herstellung und Entsorgung sowie während der Nutzung (inkl. Hilfsstrombedarf und Einfluss auf Heiz- oder Beleuchtungsenergiebedarf) entsteht, in einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren bilanziert.

Der ausgewählte Musterraum entspricht in seiner Raumgeometrie dem in Kapitel 4.3 beschriebenen vollverglasten Büroraum³⁵. Weitere Randbedingungen sind: Westorientierung, leichte Bauweise, Standort Potsdam. Die Bauteile sind am Energiestandard des Effizienzgebäudes 55 angelehnt. Als Klimarandbedingungen werden das TRY2045 des DWD (DWD 2020b), und mit Meteonorm erstellte Klimadatensätze für das Jahr 2080 nach den Emissionspfaden RCP4.5 und RCP8.5 verwendet (Meteonorm 2021).

Um die Wirksamkeit der Sonnenschutzvarianten zu untersuchen, wird von oben genannten Musterraum, allerdings ohne außenliegenden Raffstoren, als Basisfall ausgegangen. Für diesen

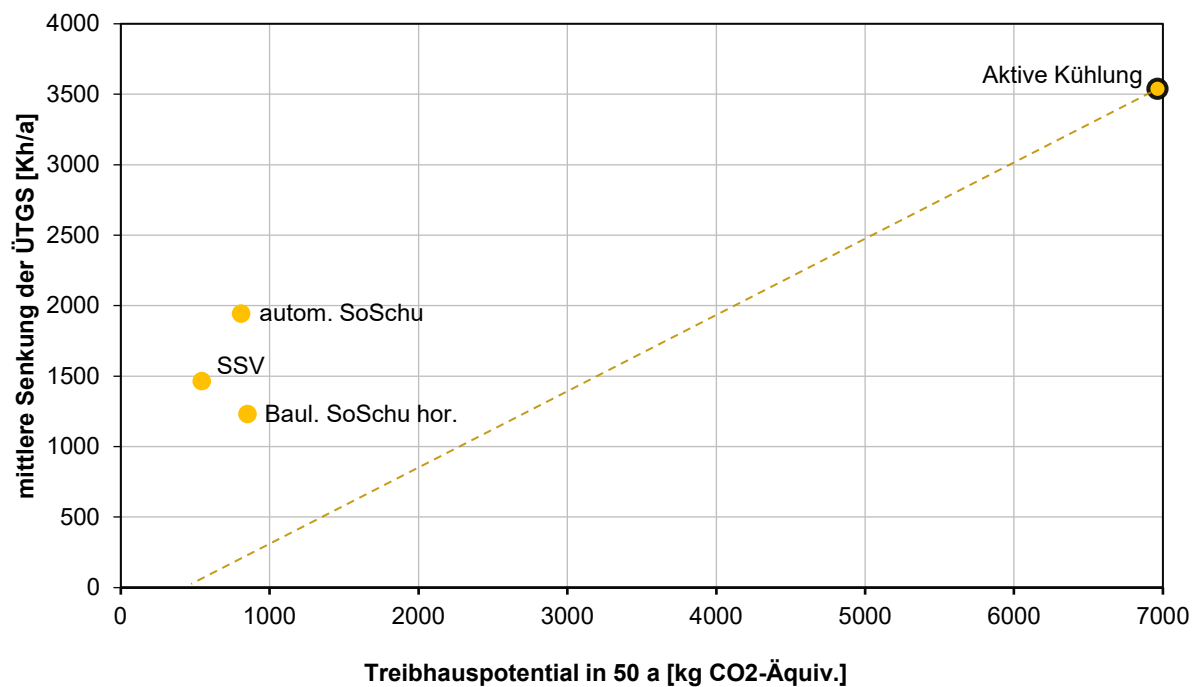
³⁵ Die internen Lasten betragen durchschnittlich 144 Wh/m², aufgeteilt in Wärmeabgabe durch zwei Personen, technische Geräte und tageslichtabhängiger Beleuchtung. Belüftet wird der Raum mechanisch mit einem nach DIN EN 16798-1:2021-04 erforderlichen Außenluftvolumenstrom von 4,97 m³/(hm²) für einen schadstoffarmen Raum mit zwei Personen nach Kategorie II an Arbeitstagen von 7 – 20 Uhr, und außerhalb dieser Zeiten mit 0,5 m³/(hm²). Bei operativen Innenraumtemperaturen über 25,5 °C besteht bei Anwesenheit die Möglichkeit, durch Fensteröffnung die Raumtemperatur auf bis zu 21,5 °C abzusenken. Außenliegende Lammellenraffstoren werden bei einer Solarstrahlung von 200 W/m² und gleichzeitiger Innenraumtemperatur von über 24 °C geschlossen.

wird ermittelt, um wie viel Kelvinstunden pro Jahr die Überhitzung des Raums durch den Einsatz jeweils einer Sonnenschutzmaßnahme reduziert werden kann. Ebenfalls wird das Treibhauspotential der jeweiligen Maßnahme, sowie vergleichend einer aktiven Kühlung des Basisfalls ermittelt.

Es wird die Wirksamkeit einer **Sonnenschutzverglasung (SSV)** mit einem verringerten Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) von 0,3 im Vergleich zum Basisfall mit einer Wärmeschutzverglasung (g-Wert = 0,54) untersucht. Der **horizontale, bauliche Sonnenschutz (Baul. SoSchu hor.)** stellt eine horizontale Auskragung von 1,5 m oberhalb der Fenster als Edelstahl- und Holz-Lamellenkonstruktion dar. Beim **automatisch gesteuerten, außenliegenden Sonnenschutz (autom. SoSchu)** wird von einer schienengeführten Außenraffstoreanlage mit Aluminiumlamellen ausgegangen, die bei einer auf die Fassade auftreffenden Globalstrahlung von 200 W/m^2 und einer Innenraumtemperatur größer 24 °C automatisch betätigt wird.

In Abbildung 104 ist die mittlere Senkung der Übertemperaturgradstunden bei Verwendung der drei Wetterdatensätze durch Verwendung der Sonnenschutzmaßnahmen im Vergleich zum Basisfall ohne jegliche Sonnenschutzeinrichtung an der y-Achse, sowie das mit ihnen einhergehende Treibhauspotential durch Herstellung, Entsorgung und Betrieb an der y-Achse ablesbar. Alle drei Sonnenschutzmaßnahmen weisen ein deutlich niedrigeres Treibhauspotential auf als die aktive Kühlung des Basisfalls ohne Sonnenschutzmaßnahme, allerdings können sie die Übertemperaturgradstunden nur um rund 35 – 55 % reduzieren. Die gestrichelte Linie verbindet die Werte der aktiven Kühlung der Basisfalls bei vollständiger Vermeidung von ÜTGS mit dem Treibhauspotential, das durch Herstellung und Entsorgung der Kältemaschine ohne Nutzung entsteht, auf der x-Achse. Liegt eine Maßnahme linksseitig bzw. oberhalb der entsprechenden Linie, weist sie ein besseres Verhältnis zwischen Wirksamkeit und Klimarelevanz auf als die aktive Kühlung des Basisfalls. Liegt sie jedoch rechtsseitig bzw. unterhalb der entsprechenden Linie, so weist sie ein schlechteres Verhältnis als die aktive Kühlung auf, die aktive Kühlung könnte also gleiche Wirksamkeit bei geringerem Treibhauspotential erreichen.

Alle drei Sonnenschutzmaßnahmen liegen links oberhalb der Linie und weisen damit ein besseres Verhältnis zwischen Wirksamkeit und Treibhauspotential auf als die aktive Kühlung des Raums.

Abbildung 104: Verhältnis von Wirksamkeit zu Treibhauspotential – Sonnenschutzmaßnahmen im 2-Personen-Bürraum

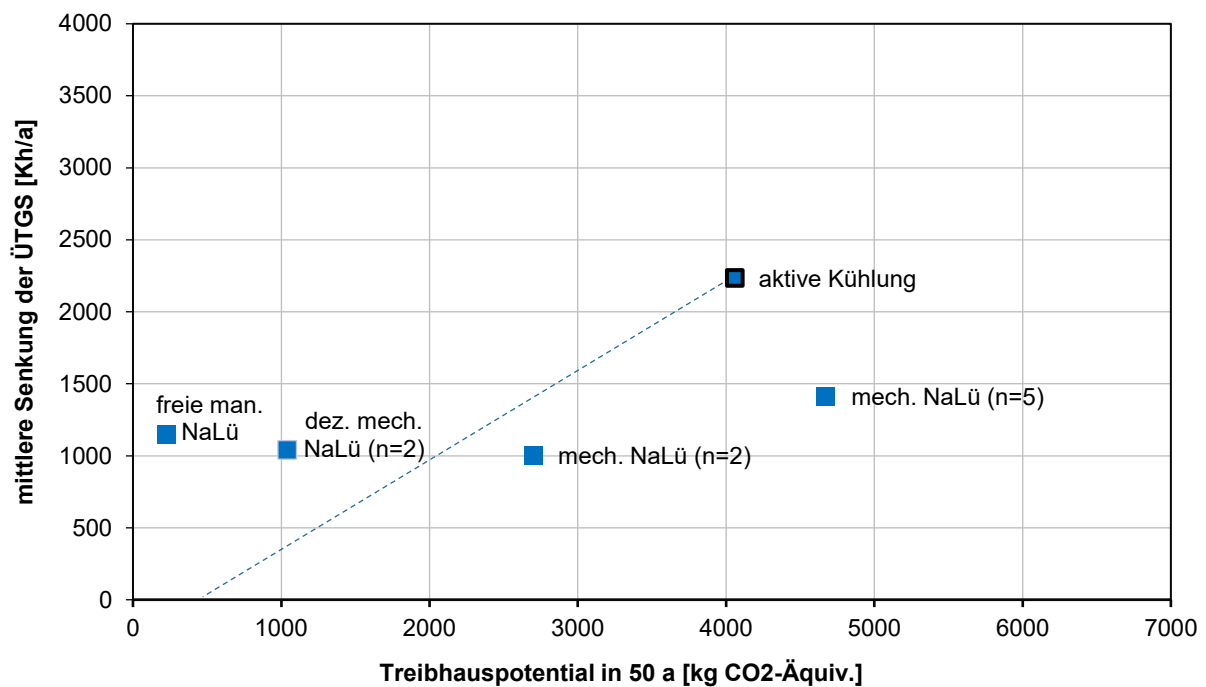
Quelle: (Eberle 2021)

In Abbildung 105 sind die Wirksamkeit und das zugehörige Treibhauspotential verschiedener Nachtlüftungsmaßnahmen sowie der aktiven Kühlung des Raums ohne Nachtlüftung dargestellt.

Bei der **freien (manuellen) Nachtlüftung (freie man. NaLü)** können witterungs- und einbruchgeschützte Lüftungsflügel von den Gebäudenutzenden nach eigenem Ermessen geöffnet werden. Es wird angenommen, dass die Lüftungsflügel bei Feierabend um 18 Uhr geöffnet werden, falls die operative Raumtemperatur über 24,5 °C zu diesem Zeitpunkt. Die Lüftungsflügel bleiben bis 8 Uhr des folgenden Werktags geöffnet. Die Öffnungsfläche der Lüftungsflügel beträgt mit 0,6 m² etwa 3 % der Grundfläche. Der Einbruchs- und Witterungsschutz wird als Aluminiumrahmen mit Zedernholzlamellen für den Bereich der Öffnungsfläche angenommen. Er hat in der Simulation keinen verschattenden Einfluss.

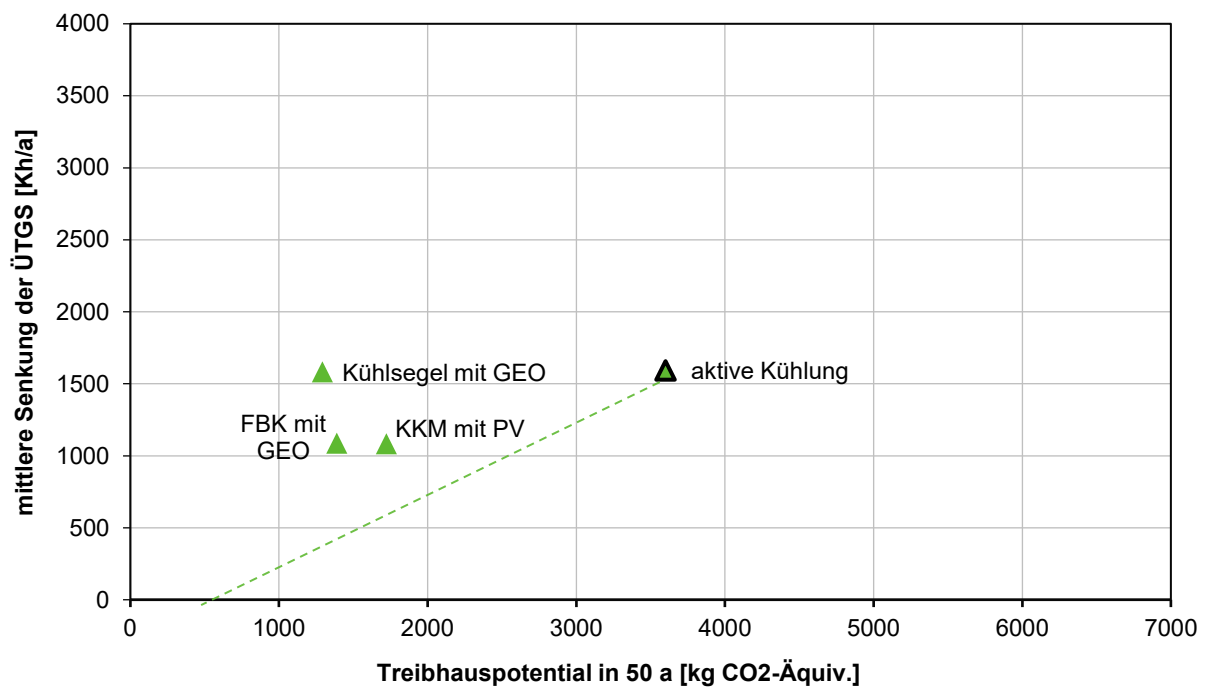
Bei der **mechanischen Nachtlüftung** wird durch die Lüftungsanlage ein erhöhter Luftwechsel zwischen 18 und 7 Uhr eingestellt, wenn die Innenlufttemperatur von Mai bis September über 23,5 °C bis zu einer Raumtemperaturabsenkung auf 19,5 °C bzw. von Oktober bis April über 24,5 °C bis zu einer Raumtemperaturabsenkung auf 21,5 °C liegt. Es werden die beiden Varianten eines erhöhten 2-fachen Nachtluftwechsels (**mech. NaLü n=2**) und eines hohen 5-fachen Nachtluftwechsels (**mech. NaLü n=5**) betrachtet. Für die zentrale Lüftungsanlage werden Druckerhöhungen durch die Ventilatoren von 600 Pa bzw. 375 Pa bei jeweils 60 % Gesamtwirkungsgrad angenommen. Für die **dezentrale mechanische Nachtlüftung (dez. mech. NaLü n=2)** beträgt die Druckerhöhung für Zu- und Abluftventilator jeweils 216 Pa mit 60 % Gesamtwirkungsgrad.

Alle Nachtlüftungsvarianten sind ähnlich wirksam, unterscheiden sich aber stark in ihrem Treibhauspotential, was vor allem im Strombedarf der Ventilatoren begründet liegt. Bei gleicher Senkung der Übertemperaturgradstunden wäre eine aktive Kühlung energiesparender und klimaschonender als die betrachtete mechanische Nachtlüftung mit zentraler Lüftungsanlage. Besonders die freie manuelle Nachtlüftung fällt durch ihr geringes Treibhauspotential bei ähnlicher Wirksamkeit zu den mechanischen Varianten positiv auf.

Abbildung 105: Verhältnis von Wirksamkeit zu Treibhauspotential – Nachtlüftungsmaßnahmen im 2-Personen-Bürraum

Quelle: (Eberle 2021)

In Abbildung 106 sind die Ergebnisse passiver Kühlmaßnahmen dargestellt. Hier wird eine passive **Gebäudekühlung mithilfe von Grundwasserkälte** untersucht. Es wird von 20 m tiefen Grundwasserbrunnen ausgegangen, die für diese Bilanz lediglich zur Kühlung genutzt werden. Im Kühlmodus wird von einer EER von 15 ausgegangen. Für die **Fußbodenkühlung (FBK mit GEO)** wird eine spezifische Nennleistung von 45 W/m² bei 26 °C Raumtemperatur angenommen. In der Variante mit **Kühlsegel** als Wärmeübergabesystem (**Kühlsegel mit GEO**) beträgt die angenommene Nennleistung 120 W/m². Beide Kühlsysteme sollen die Raumlufttemperatur auf 24 °C kühlen. Mit der **aktiven Kühlung mit Photovoltaik (KKM mit PV)** wird zusätzlich ein Fall untersucht, bei dem der Raum nur dann aktiv gekühlt wird, wenn aus der hauseigenen PV-Stromproduktion nach der PV-Stromnutzung für Beleuchtung, Nutzerstrom und Hilfsstrom für Gebäudetechnik noch darüber hinaus PV-Strom verfügbar ist. Dabei wird von einer anteiligen Modulfläche für den Musterraum von 6,8 m² und einer Gesamteffizienz der PV-Anlage von 10 % ausgegangen. In die Berechnung des Treibhauspotentials geht keine Gutschrift des Solarstroms ein, der für Beleuchtung, Nutzerstrom und Gebäudetechnik genutzt wird. Am Ergebnis in Abbildung 106 wird ersichtlich, dass der überschüssige PV-Strom im betrachteten Beispiel nicht ausreicht, um den Raum vollständig zu kühlen. Auch die begrenzte Leistung der Fußbodenkühlung reicht in diesem Beispiel aufgrund der Vollverglasung und der Zukunftsklimadatensätze nicht zur vollständigen Kühlung, im Gegensatz zu den Kühlsegeln mit höherer Kühlleistung. Das Treibhauspotential ist jedoch bei allen drei Systemen deutlich geringer als das der entsprechenden aktiven Kühlung.

Abbildung 106: Verhältnis von Wirksamkeit zu Treibhauspotential – Passive Kühlung im 2-Personen-Büroraum

Quelle: (Eberle 2021)

Fast alle passiven Maßnahmen haben ein besseres Verhältnis von Wirksamkeit zu Treibhauspotential als aktive Kühlung und sind damit aus ökologischer Sicht empfehlenswert. Ausnahmen stellen die zentralen Nachtlüftungen aufgrund ihres hohen Energiebedarfs während der Nutzung dar. Nur bei den hier nicht vorgestellten Varianten mit ohnehin vorhandener Kältemaschine und sehr geringem Fensterflächenanteilen wird das Treibhauspotential, das durch Sonnenschutzmaßnahmen verursacht wird, nicht durch deren Senkung des Kühlenergiebedarfs kompensiert. Bei größeren Fensterflächenanteilen sind Sonnenschutzmaßnahmen aber aus ökologischer Sicht generell sinnvoll.

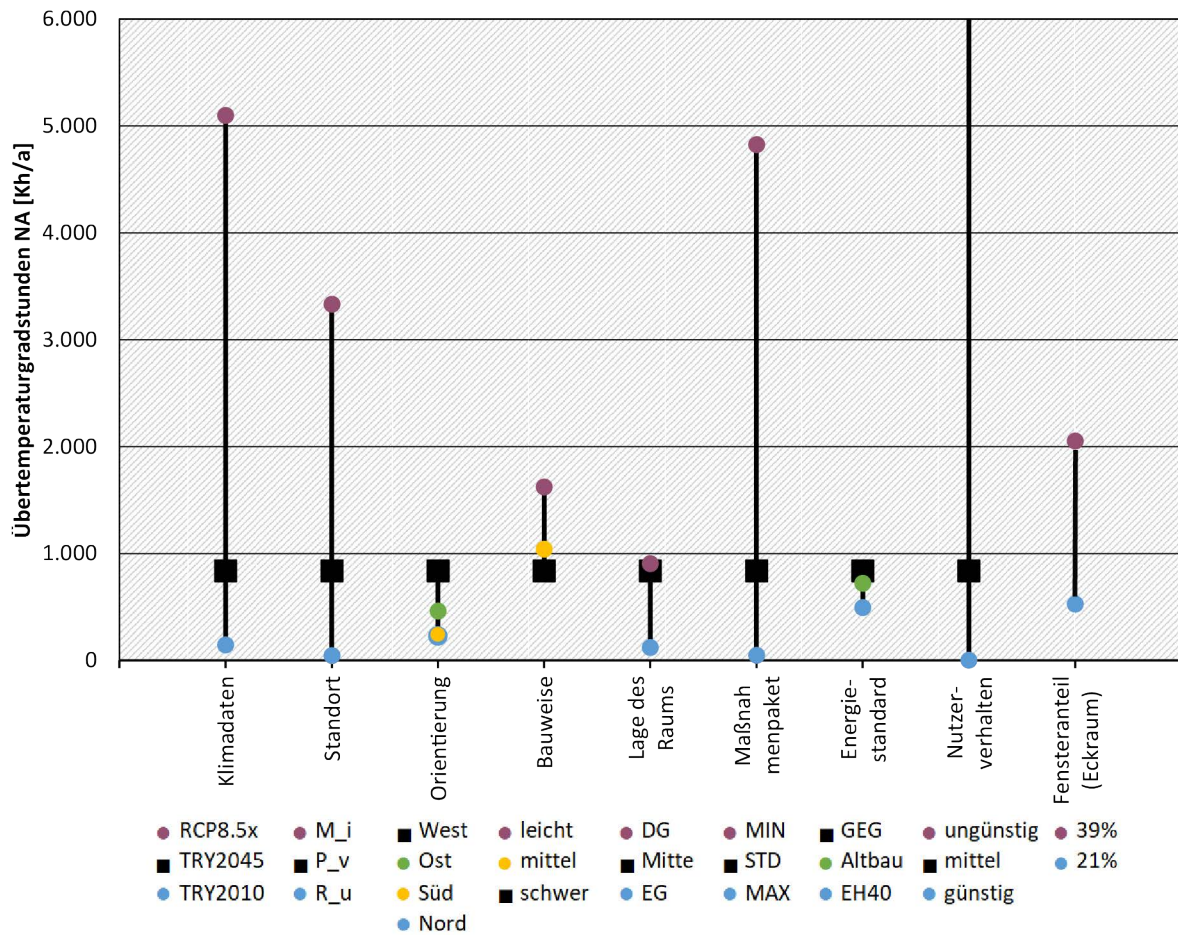
5.8 Fazit

Die Parameterstudie dient der Einschätzung der Sensitivität einzelner Parameter, was durch die Basis- und Detailuntersuchung ermöglicht wird. Für einen abschließenden Überblick werden die Ergebnisse der Basis- und der Detailuntersuchung für ausgewählte Beispiele zusammengeführt.

Abbildung 107 zeigt - ausgehend vom Muster-Wohnzimmer, TRY 2045, Standort Potsdam, STD-Maßnahmenpaket und Westorientierung - die sich bei den ÜTGS ergebende Spannweite bei Variation einzelner Parameter. Das schwarze Viereck stellt hierbei immer den „Ausgangsfall“ dar. Es gelten die gleichen Randbedingungen und variierten Parameter, wie in Kapitel 4 und 5 beschrieben.

Abbildung 107: Einfluss verschiedener Parameter auf die Überhitzung - Wohnzimmer

Ausgangsfall: Muster-Wohnzimmer, TRY 2045, Standort Potsdam, STD-Maßnahmenpaket, Westorientierung



Hinweise:

Beim Nutzungsverhalten entspricht „günstig“ dem in 5.3.7 beschriebenen Fall „extrem günstiges Verhalten“ und „ungünstig“ dem Fall „extrem ungünstiges Verhalten“.

Der Fensterflächenanteil des Muster-Wohnraums wurde nicht variiert, stattdessen ist der entsprechende Eckraum mit Süd-Westorientierung dargestellt. Der Fensterflächenanteil ist grundflächenbezogen als fWG angegeben.

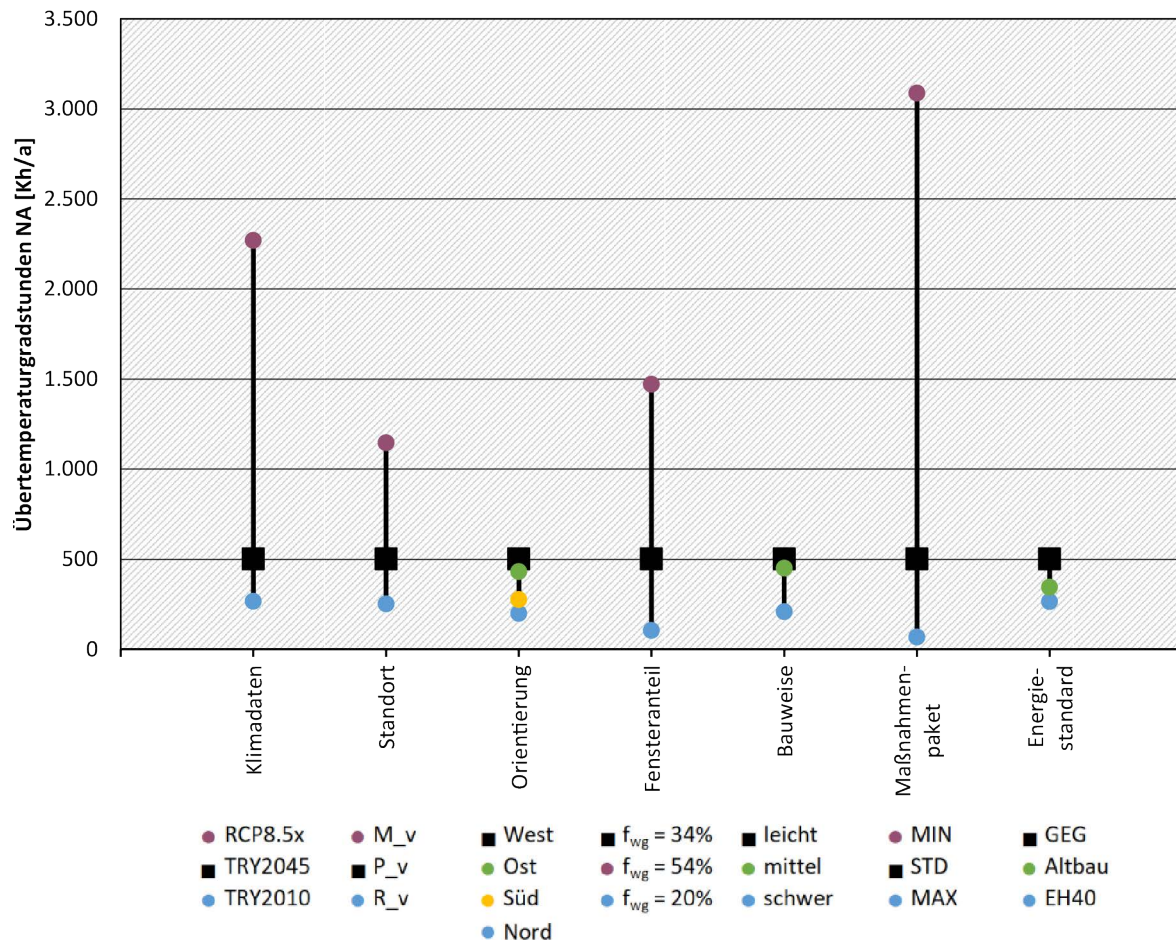
Quelle: eigene Darstellung, IBH

Größten Einfluss hat das Nutzerverhalten. Bei sich extrem auswirkendem Klimawandel (RCP8.5 2050) haben die Klimadaten den zweitgrößten Einfluss, gefolgt von den Maßnahmenpaketen und dem Standort. Der grundflächenbezogene Fensterflächenanteil, der auf Basis des Muster-Eckraums abgebildet ist, hat aufgrund der geringen Variationsbreite von 21 bis 39 % geringeren Einfluss. Der Energiestandard hat den geringsten Einfluss der untersuchten Parameter.

In Abbildung 108 ist die entsprechende Auswertung für den Büroraum zu sehen. Ausgangsfall ist hier der Muster-Büroraum (3-Achser) mit Fensterband simuliert mit den TRY 2045, Standort Potsdam, STD-Maßnahmenpaket und Westorientierung.

Abbildung 108: Einfluss verschiedener Parameter auf die Überhitzung - Büroraum

Ausgangsfall: Muster- Büroraum mit Fensterband, TRY 2045, Standort Potsdam, STD-Maßnahmenpaket, Westorientierung



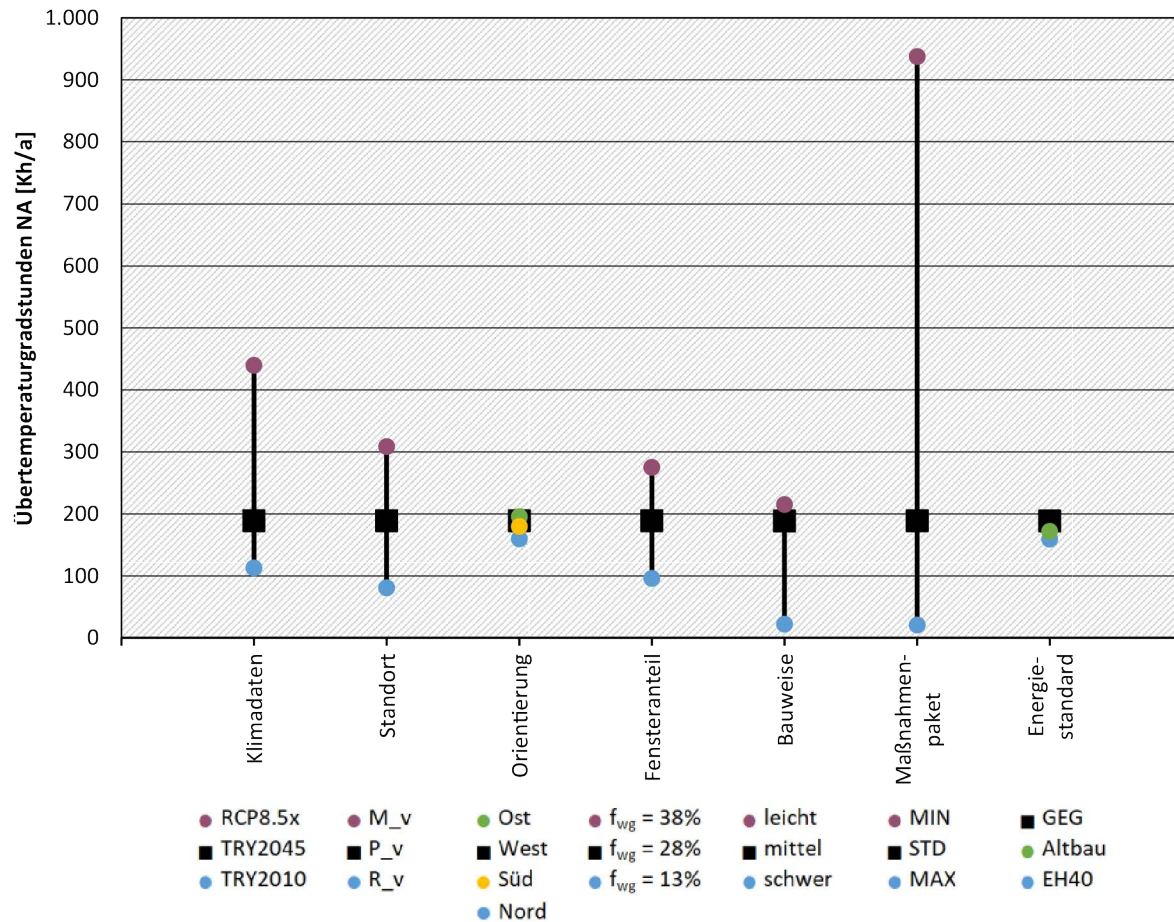
Quelle: eigene Darstellung, IBH

Beim Büroraum zeigt das Maßnahmenpaket den größten Einfluss zur Vermeidung einer Überhitzung, gefolgt vom extremen Klimawandel und dem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil und dem Standort. Die anderen Parameter haben deutlich geringeren Einfluss.

Abbildung 109 ist das Diagramm für den Klassenraum zu entnehmen. Den Ausgangsfall bildet das Muster-Klassenzimmer mit Fensterband, TRY 2045, Standort Potsdam, STD-Maßnahmenpaket und Westorientierung.

Abbildung 109: Einfluss verschiedener Parameter auf die Überhitzung - Klassenzimmer

Ausgangsfall: Muster-Klassenzimmer mit Fensterband, TRY 2045, Standort Potsdam, STD-Maßnahmenpaket, Westorientierung



Quelle: eigene Darstellung, IBH

Wie schon in der Basisuntersuchung festgestellt, hat beim Klassenzimmer das Maßnahmenpaket den mit Abstand größten Einfluss auf die Überhitzung, gefolgt von Klimadaten, Standort, Bauweise und Fensterflächenanteil.

Die komplexen Zusammenhänge machen es nicht möglich, die Aussagen zu verallgemeinern. Dennoch sind bezugnehmend auf obige Diagramme nachfolgend wichtige Aussagen zusammengestellt. Gleichzeitig werden die Aussagen auf in den Diagrammen nicht abgebildete Varianten der Parameterstudie erweitert und Hinweise gegeben, wenn besondere Einschränkungen für die Verallgemeinerung gelten.

- Der Einfluss der Klimadaten ist sehr relevant und der Unterschied zwischen den TRY2010 und den TRY2045 (noch deutlicher beim TRY 2045x) und ebenso des Standorts deutlich erkennbar. Zu einer dominierenden Einflussgröße auf die Überhitzung werden die Klimadaten aber erst bei Verwendung der für das Szenario RCP 8.5 generierten Klimadaten. Auch für diesen extremen Fall können die ÜTGS durch das STD-Maßnahmenpaket (und vor allem beim MAX- Maßnahmenpaket) abgesenkt werden. Durch die Kombination von passiven Maßnahmen lässt sich also die Erwärmung des Innenraums auch bei heißen Außentemperaturen deutlich abschwächen. Der ÜTGS-Anforderungswert lässt sich aber in den meisten Fällen beim RCP8.5-Szenario nicht mehr einhalten. Dies trifft auf alle für den Standort Mannheim untersuchten Fälle zu.

- ▶ Das Maßnahmenpaket gehört zu den dominierenden Einflussgrößen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Kombination passiver Maßnahmen effektiv ist, um sich vor Überhitzung in Räumen zu schützen. Allerdings ist die Bandbreite hinsichtlich Absenkung von ÜTGs noch größer als mit dem MAX-Maßnahmenpaketen dargestellt, wenn die Möglichkeit einer passiven Kühlung besteht.
- ▶ Dass die Orientierung für alle Nutzungstypen so geringen Einfluss hat, ist dem STD-Maßnahmenpaket geschuldet, das für alle Orientierungen einen außenliegenden Sonnenschutz vorsieht.
- ▶ Der grundflächenbezogene Fensterflächenanteil hat wesentlichen Einfluss auf die Überhitzung. Dieser würde ohne Sonnenschutz noch stärker ins Gewicht fallen.
- ▶ Der Einfluss der Bauweise hängt vom Potential Wärme abzuführen ab (z.B. durch Nachtlüftung) und ist bei den Maßnahmenpaketen ohne Nachtlüftung (MIN-Maßnahmenpaket Büro und Schule) gering oder nicht vorhanden.
- ▶ Der Einfluss des Energiestandards ist bei allen Nutzungen gering, obwohl die Variationsbreite von unsaniertem Altbau bis hin zu EH40-Standard eine größtmögliche Varianten-Bandbreite abdeckt. Lediglich bei besonders sonnenexponierten Räumen mit Bauteilen wie Steildächern mit dunklen Außenoberflächen wirkt sich mehr Dämmung merklich positiv aus.

Aufbauend auf der Basis- und Detailuntersuchung wird der mit passiven Maßnahmen verbundene Energiebedarf - auch im Vergleich zu einer aktiven Kühlung - für den Büro- und den Klassenraum untersucht. Auswirkungen einer Sonnenschutzverglasung führen zum Anstieg des Heizwärme- und Kunstlichtbedarfs, ähnliche Folgen hat ein kälterer, sonnenscheinärmerer Standort. Ein geringer Fensterflächenanteil führt ebenfalls zu höherem Kunstlichtbedarf, aber zu geringerem Heizwärmebedarf. Diese Verschiebungen beim Energiebedarf sind zwar relevant, aber gering im Vergleich zum Strombedarf für die mechanische Nachtlüftung. Zum Beispiel erhöht sich bei der Variante FB-Büro, P, TRY2045 der Strombedarf für Kunstlicht aufgrund der Sonnenschutzverglasung um $0,8 \text{ kWh/m}^2$, für eine mechanische Nachtlüftung um $6,2 \text{ kWh/m}^2$. Für denselben Fall liegt der Strombedarf für eine passive Kühlung über Grundwasser bei $1,3 \text{ kWh/m}^2$ und für eine aktive Kühlung bei $4,7 \text{ kWh/m}^2$. Im Hinblick auf einen energieeffizienten Energie- und Ressourceneinsatz wird an den Ergebnissen der Energiebedarfsanalyse klar, dass die Definition von passiver Kühlung auch einen Grenzwert für die Stromeffizienz enthalten sollte, der unter dem einer aktiven Kühlung liegen muss.

In einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Maßnahmenpakete im Rahmen einer Lebenszykluskostenberechnung schneidet das MIN-Maßnahmenpaket erwartungsgemäß am kostengünstigsten ab. Beim Klassenzimmer liegen danach die Varianten mit STD- und MAX-Maßnahmenpaket und die Vergleichsvariante mit aktiver Kühlung ungefähr gleich auf. Deutlich am teuersten ist die Variante mit automatisch betriebenen Nachtlüftungselementen. Ähnlich sind die Ergebnisse beim Büro, nur liegt hier die Variante mit aktiver Kühlung kostenmäßig zwischen dem MIN- und dem STD-Maßnahmenpaket. Da bei den Maßnahmenpaketen MIN, STD und MAX nicht gekühlt wird, kommt es durch die passiven Maßnahmen zwar zu einer Reduktion von Übertemperaturgradstunden, aber zu keiner (Kühl-)Energieeinsparung. Indirekte Kosten bzw. Einnahmehausfälle, wie beispielsweise Mietminderung oder Leistungsabfall bei unbehaglich hohen Temperaturen, oder subjektive Parameter wie Komforterrhöhung wurden nicht in die Betrachtung einbezogen.

6 Zur Bedeutung des Wirtschaftlichkeitsgebots für die Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz

Aufgabenstellung der nachfolgenden, von Prof. Dr. jur. Stefan Klinski verfassten, rechtsgutachtlichen Stellungnahme ist zu klären, welche Bedeutung das im Gebäudeenergiegesetz (GEG) verankerte Wirtschaftlichkeitsgebot für die Anforderungen des GEG zum sommerlichen Wärmeschutz hat. Beantwortet werden sollen neben der übergreifenden allgemeinen Kernfrage nach der Bedeutung des Wirtschaftlichkeitsgebots für die Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz als solcher folgende Einzelfragen:

- ▶ In welchen Fällen findet das Wirtschaftlichkeitsgebot Anwendung bei den Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz bei Neubauten?
- ▶ Ist das Wirtschaftlichkeitsgebot nur anzuwenden, wenn es auch eine monetäre Einsparung gibt (Gebäude mit Kühlung)?
- ▶ Kann der Gesetzgeber in zukünftiger Gesetzgebung (z.B. bei der Aktualisierung des GEG) Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz stellen und dabei das Wirtschaftlichkeitsgebot umgehen?
- ▶ Wie ist damit umzugehen, dass es sich beim sommerlichen Wärmeschutz, sofern Gebäude nicht aktiv gekühlt werden, in der Regel nur um einen nicht-monetären Nutzen (Steigerung von Behaglichkeit, Produktivität bis hin zur Vermeidung von Hitzetoten) handelt, für den jedoch Investitionskosten anfallen?
- ▶ Könnte der Gesetzgeber gegebenenfalls zukünftig auch Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz von Bestandsgebäuden stellen?

Zur Durchdringung der Fragestellungen beleuchtet die Stellungnahme in ihrem ersten Hauptteil (siehe Kapitel 6) zunächst den größeren Regelungskontext. Sie befasst sich darin mit dem Wirtschaftlichkeitsgebot im Allgemeinen, klärt also dessen rechtlichen Gehalt und dessen Rolle im Vorschriftengefüge des GEG sowie den verfassungs- und EU-rechtlichen Hintergrund. Diese umfassende Betrachtung bildet die Grundlage, um die Bedeutung und die Besonderheiten der Bestimmungen für den sommerlichen Wärmeschutz im nachfolgenden zweiten Hauptteil (siehe Kapitel 6.2) herausarbeiten und nachvollziehen zu können. Denn die Konturen und Konsequenzen des Wirtschaftlichkeitsgebots sind auch über den speziellen Kontext der Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz hinaus nur teilweise geklärt. Ohne deren Klärung lassen sich für den sommerlichen Wärmeschutz keine hinreichend belastbaren Folgerungen ableiten. Deshalb bedarf es dieses gestuften Aufbaus. In Kapitel 6.3 beantwortet die Stellungnahme die darüber hinaus gestellten konkreten Einzelfragen, bevor sie die Erkenntnisse im Schlusskapitel (Kapitel 6.4) zusammenfasst.

6.1 Das Wirtschaftlichkeitsgebot des Gebäudeenergierechts

6.1.1 Die einschlägigen Bestimmungen im Überblick

Die Wirtschaftlichkeit der Anforderungen und Pflichten im Hinblick auf die Gebäudeenergie wird im Gebäudeenergiegesetz (GEG)³⁶ an mehreren Stellen angesprochen. Schon in der

³⁶ Gesetz vom 8.8.2020 (BGBl. I 1728).

Zweckbestimmung des GEG werden die Regelungen einem „Wirtschaftlichkeitsgrundsatz“ unterstellt. So heißt es in § 1 Abs. 2 GEG:

„Unter Beachtung des Grundsatzes der Wirtschaftlichkeit soll das Gesetz im Interesse des Klimaschutzes, der Schonung fossiler Ressourcen und der Minderung der Abhängigkeit von Energieimporten dazu beitragen, die energie- und klimapolitischen Ziele der Bundesregierung sowie eine weitere Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte zu erreichen und eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen.“

Was unter dem „Grundsatz der Wirtschaftlichkeit“ zu verstehen sein soll, umschreibt der den konkreten gesetzlichen Anforderungen vorangestellte § 5 GEG wie folgt:

„§ 5 Grundsatz der Wirtschaftlichkeit

Die Anforderungen und Pflichten, die in diesem Gesetz oder in den auf Grund dieses Gesetzes erlassenen Rechtsverordnungen aufgestellt werden, müssen nach dem Stand der Technik erfüllbar sowie für Gebäude gleicher Art und Nutzung und für Anlagen oder Einrichtungen wirtschaftlich vertretbar sein. Anforderungen und Pflichten gelten als wirtschaftlich vertretbar, wenn generell die erforderlichen Aufwendungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauer durch die eintretenden Einsparungen erwirtschaftet werden können. Bei bestehenden Gebäuden, Anlagen und Einrichtungen ist die noch zu erwartende Nutzungsdauer zu berücksichtigen.“

In der Funktion eines gesetzesleitenden Obersatzes kann aus dem „Grundsatz“ abgeleitet werden, dass die Anforderungen des Gesetzes an der Wirtschaftlichkeit in dem bezeichneten Sinne orientiert sein sollen. Unbeantwortet lässt die Vorschrift indessen die Frage, welche Bedeutung dem „Grundsatz“ im konkreten Einzelfall der Gesetzesanwendung zukommt. „Grundsätze“ zeichnen sich allerdings gemeinhin dadurch aus, dass sie nicht absolut gelten, sondern Abweichungen möglich sind, die sich typischerweise etwa dadurch ergeben, dass typisiert oder mit Schwellenwerten operiert wird.

Für die Ebene der Einzelfallanwendung enthält das Gesetz in § 102 Abs. 1 GEG eine Bestimmung, aus der sich ergibt, dass von den Anforderungen aus Gründen mangelnder Wirtschaftlichkeit unter Umständen auf Antrag zu befreien ist. § 102 GEG lautet vollständig:

„§ 102 Befreiungen

- (1) Die nach Landesrecht zuständigen Behörden haben auf Antrag des Eigentümers oder Bauherren von den Anforderungen dieses Gesetzes zu befreien, soweit
1. die Ziele dieses Gesetzes durch andere als in diesem Gesetz vorgesehene Maßnahmen im gleichen Umfang erreicht werden,
 2. die Anforderungen im Einzelfall wegen besonderer Umstände durch einen unangemessenen Aufwand oder in sonstiger Weise zu einer unbilligen Härte führen
- Eine unbillige Härte liegt insbesondere vor, wenn die erforderlichen Aufwendungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauer, bei Anforderungen an bestehende Gebäude innerhalb angemessener Frist durch die eintretenden Einsparungen nicht erwirtschaftet werden können
- (2) Absatz 1 ist auf die Vorschriften von Teil 5 nicht anzuwenden.
- (3) Die Erfüllung der Voraussetzungen nach Absatz 1 Satz 1 Nummer 1 hat der Eigentümer oder der Bauherr darzulegen und nachzuweisen. Die nach Landesrecht zuständige Behörde kann auf Kosten des Eigentümers oder Bauherrn die Vorlage einer Beurteilung der Erfüllung der Voraussetzungen nach Absatz 1 Satz 1 Nummer 1 durch qualifizierte Sachverständige verlangen.“

Die Bestimmungen haben ihr Vorbild und ihren Ursprung in den früheren Regelungen des **Energieeinsparrechts**, die in das GEG weitgehend übereinstimmend übernommen wurden:

Der Grundsatz des § 5 GEG entspricht seinem Inhalt nach § 5 Abs. 1 des früheren Energieeinsparungsgesetzes (EnEG).³⁷ Dort hieß es:

³⁷ Ursprungsfassung v. 22.7.1976 (BGBl. I 1976 S. 1873). Letzte Fassung: Gesetz v. 1.9.2005 (BGBl. I 2684), zul. geänd. 4.7.2013 (BGBl. I S. 2197).

„(1) Die in den Rechtsverordnungen nach den §§ 1 bis 4 aufgestellten Anforderungen müssen nach dem Stand der Technik erfüllbar und für Gebäude gleicher Art und Nutzung wirtschaftlich vertretbar sein. Anforderungen gelten als wirtschaftlich vertretbar, wenn generell die erforderlichen Aufwendungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauer durch die eintretenden Einsparungen erwirtschaftet werden können. Bei bestehenden Gebäuden ist die noch zu erwartende Nutzungsdauer zu berücksichtigen.“

Zu beachten ist, dass sich die Stellung des Grundsatzes im Regelungsgefüge des Gebäudeenergierechts geändert hat: Die Vorschrift des früheren § 5 Abs. 1 EnEG richtete sich an den Verordnungsgeber der EnEV. Sie befand sich in der Ermächtigung für den Erlass der EnEV. Ihre Funktion lag darin, dem Verordnungsgeber einen Maßstab an die Hand zu geben, nach welchem die in der Verordnung aufgestellten Anforderungen am Maßstab des Wirtschaftlichkeitsgrundsatzes ausgerichtet werden sollten. Einer Vorschrift mit dieser Funktion bedarf es im heutigen Gebäudeenergierecht an sich nicht mehr, da die Anforderungen nun direkt auf der gesetzlichen Ebene vorgegeben werden (wie auch im früheren Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – EEWärmeG³⁸).

Darüber hinaus fällt im Vergleich auf, dass sich der Grundsatz in § 5 GEG nun erweiternd nicht nur auf die „Anforderungen“ erstreckt, sondern zusätzlich auch die Worte „und Pflichten“ eingefügt worden sind. Eine Begründung liefert der Gesetzentwurf des GEG dafür nicht. Er geht von einer Übereinstimmung mit dem früheren Recht aus.³⁹

Die Formulierung des § 102 Abs. 1 Satz 2 GEG nimmt den Wortlaut von § 25 Abs. 1 Satz 2 der früheren Energieeinsparverordnung (EnEV)⁴⁰ auf. Die betreffende Vorschrift lautete:

„(1) Die nach Landesrecht zuständigen Behörden haben auf Antrag von den Anforderungen dieser Verordnung zu befreien, soweit die Anforderungen im Einzelfall wegen besonderer Umstände durch einen unangemessenen Aufwand oder in sonstiger Weise zu einer unbilligen Härte führen. Eine unbillige Härte liegt insbesondere vor, wenn die erforderlichen Aufwendungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauer, bei Anforderungen an bestehende Gebäude innerhalb angemessener Frist durch die eintretenden Einsparungen nicht erwirtschaftet werden können.“

Eine spezielle Bestimmung zur Wirtschaftlichkeit enthält schließlich **§ 14 Abs. 4 GEG**, wiederum in Übereinstimmung mit der Vorgängervorschrift, in diesem Falle dem § 3 Abs. 4 EnEV. Diese Bestimmung betrifft speziell die Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz. Sie lautet:

„(4) Wird bei Gebäuden mit Anlagen zur Kühlung die Berechnung nach Absatz 3 durchgeführt, sind bauliche Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 4.3 insoweit vorzusehen, wie sich die Investitionen für diese baulichen Maßnahmen innerhalb deren üblicher Nutzungsdauer durch die Einsparung von Energie zur Kühlung unter Zugrundelegung der im Gebäude installierten Anlagen zur Kühlung erwirtschaften lassen.“

Auf die Bedeutung dieser Vorschrift wird weiter unten zurückzukommen sein, denn diese erschließt sich nur im Kontext des später zu besprechenden § 14 GEG (siehe unten, Kapitel 6.2.2).

6.1.2 Zum Inhalt des Wirtschaftlichkeitsgebots

Inhaltlich werfen die gesetzlichen Formulierungen zum Wirtschaftlichkeitsgebot einige Fragen auf. Insbesondere die Grundformel des § 5 GEG und die dessen Wortlaut weitgehend aufnehmende Befreiungsbestimmung des § 102 GEG sind sehr allgemein gehalten. Deshalb bedarf es zu diesen einiger ergänzender Klärungen. Zu beachten ist, dass beide Vorschriften unterschiedliche

³⁸ Gesetz. V. 7.8.2008 (BGBl. I 2008, 1658), zul. geänd. 19.7.2020 (BGBl. I S. 1328).

³⁹ Vgl. BT-Drs. 19/16716, S. 112 f.

⁴⁰ Ursprungsfassung v. 16.11.2001 (BGBl. I S. 3085). Letzte Fassung: Verordnung v. 24.7.2007 (BGBl. I S. 1519), zul. geänd. 19.7.2020 (BGBl. I S. 1328).

Funktionen und Anwendungsbereiche haben. Deshalb muss in der Analyse zwischen beiden differenziert werden.

6.1.2.1 Zum Regelungsgehalt von § 5 GEG

6.1.2.1.1 Funktion: Orientierungsleitlinie für die Festlegung des Anforderungsniveaus

§ 5 GEG wurde aus dem früheren § 5 Abs. 1 EnEG entwickelt, der als Vorgabe an den Verordnungsgeber für die Festlegung von konkreten Anforderungen in der EnEV fungierte. In Ermangelung einer Rechtsetzungsdelegation an die Verordnungsebene im GEG ist die ausdrückliche Vorgabe eines Leitmaßstabes für die Festlegung der konkreten Anforderungen an sich nicht mehr erforderlich. Der Gesetzgeber hielt dessen Aufnahme in das neue Gesetz jedoch offenbar für (politisch) sinnvoll, um zu signalisieren, dass es hinsichtlich des Anforderungsniveaus durch das neue GEG keine Verschärfung gegenüber dem früheren Recht geben sollte.⁴¹ Dem Charakter nach ließe sich daher auch von einer Selbstverpflichtung des Gesetzgebers sprechen, sich nach wie vor an den Wirtschaftlichkeitsgrundsatz halten zu wollen.

Dem Wirtschaftlichkeitsgrundsatz des § 5 GEG kommt daher nur die Rolle einer Orientierungsleitlinie zu. Nach früherem Recht begrenzte der Wirtschaftlichkeitsgrundsatz als verbindliche Vorgabe die Regelungsspielräume des Verordnungsgebers insoweit, als diesem untersagt war, etwas zu verlangen, das sich im Sinne des Wirtschaftlichkeitsgrundsatzes als unwirtschaftlich darstellen würde. Es musste daher im Einzelnen hergeleitet werden, was genau mit den Anforderungen des § 5 Abs. 1 EnEG gemeint war. Im heutigen Recht fehlt die begrenzende Funktion der Vorgabe an den Verordnungsgeber. Dem Gesetzgeber kommt innerhalb der (großzügigeren) Grenzen des verfassungsrechtlichen Verhältnismäßigkeitsgebots (siehe dazu unten, Kapitel 6.1.3.1) folglich ein sehr viel weitergehender Beurteilungs- und Gestaltungsspielraum zu als zuvor dem Verordnungsgeber der EnEV. Deshalb haben auch die Auslegungsfragen zum rechtlichen Gehalt des Wirtschaftlichkeitsgrundsatzes im Kontext des § 5 GEG ein geringeres Gewicht. Anders ist das demgegenüber bei § 102 GEG, bei dem es um die rechtliche Bewertung von konkreten Grundrechtseingriffen im Einzelfall geht.

6.1.2.1.2 Kerngehalt: Amortisierbarkeitsgebot

Der inhaltliche Kern des Wirtschaftlichkeitsgebots lässt sich als Amortisierbarkeitsgebot verstehen. Gegenüberzustellen sind einerseits der durch die Energieanforderungen bedingte finanzielle (Mehr-) Aufwand und andererseits die Kostensenkungen, die durch die zur Einhaltung der Energieanforderungen erforderlichen Maßnahmen erzielt werden können. Erstere müssen sich durch Letztere „erwirtschaften“ lassen, also mindestens ebenso hoch liegen.

Zu berücksichtigen sein sollen auf der Einsparungsseite auch indirekt entstehende Kostenminderungen – etwa dadurch, dass durch die Einhaltung von Wärmedämmanforderungen Heizkessel geringer dimensioniert werden können.⁴² Betont wird in der Kommentarliteratur zu § 5 EnEG außerdem, dass es nicht darauf ankomme, bei wem die Einsparungen einträten, so dass bei Mietobjekten auch Einsparungen zu berücksichtigen seien, die bei den Mietern entstehen und nicht bei den jeweiligen Investoren.⁴³

Erhebliche Unklarheiten bringt § 5 GEG – wie bereits § 5 Abs. 1 EnEG – insofern mit sich, als nicht eindeutig ist, was unter der bei der Kostengegenüberstellung zugrunde zu legenden

⁴¹ So ausdrücklich der Gesetzentwurf, BT-Drs. 19/16716, S. 113.

⁴² So Müller-Kuhlmann, in: Theobald, Energierecht (EL 74, 04/2012), § 5 EnEG Rn. 18, dem folgend Frenz/Lülsdorf, EnEG/EnEV (2015), § 5 EnEG Rn. 42.

⁴³ Müller-Kuhlmann, in: Theobald, Energierecht (EL 74, 04/2012), § 5 EnEG Rn. 20; dem folgend Frenz/Lülsdorf, EnEG/EnEV (2015), § 5 EnEG Rn. 43.

„üblichen Nutzungsdauer“ zu verstehen ist. In dieser Hinsicht lässt die Formulierung Mehreres offen:

- ▶ Nicht eindeutig ist bereits, ob und ggf. inwiefern es auf das Gebäude *als Ganzes oder auf die einzelnen Bauteile* ankommt. Naheliegend ist, insoweit danach zu unterscheiden, ob es bei der jeweiligen Betrachtung um die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Einzelmaßnahme (oder sämtlicher Maßnahmen zur Einhaltung der gebäudebezogenen Anforderungen insgesamt) geht. Im Hinblick auf die Kernanforderungen des Gesetzes an die Gesamtenergieeffizienz von *Neubauten* dürfte hierbei sinnvollerweise nur auf das gesamte Gebäude abgestellt werden können⁴⁴, denn die gesetzlichen Anforderungen an neu zu errichtende Gebäude (einerseits zum Primärenergiebedarf, andererseits zum baulichen Wärmeschutz) basieren nach Maßgabe der insoweit einschlägigen Regelungen (siehe §§ 15 und 16 sowie §§ 17 und 18 nebst in Bezug genommener Anlagen zum GEG) auf Summenwerten, die aus einer Vielzahl von Komponenten errechnet werden. Diesem Konzept würde es widersprechen, Einzelanforderungen isoliert zu betrachten, da andernfalls das Gesamtergebnis verzerrt würde.⁴⁵ Anders dürfte es nur liegen, soweit es um „echte“ Einzelanforderungen des Gesetzes geht, etwa bei der Änderung bestehender Gebäude um die Wärmeschutzmindestanforderungen beim Austausch von Bauteilen nach § 48 i.V.m. Anlage 7 GEG.
- ▶ Eine zweite bedeutsame Frage ist, welcher Zeitraum als „übliche Nutzungsdauer“ zu verstehen ist. Hierfür gibt es weder im Gesetz noch in den Dokumenten zum Gesetzgebungsverfahren klärende Hinweise. Im Gesetzentwurf des EnEG 1976 hieß es lediglich ähnlich ungenau, es sei der „übliche Verwendungszweck“ zu berücksichtigen.⁴⁶ In der Kommentarliteratur zum EnEG wird erörtert, ob bei neuen Wohngebäuden insoweit der einkommensteuerrechtlich maßgebende Zeitraum für die sogenannte Abschreibung der Neubaukosten von 50 Jahren herangezogen werden könne, dies aber verneint, weil das bei Wohngebäuden über den Zeithorizont einer Nutzungsgeneration hinausgehen würde, der in einer Größenordnung von 30 Jahren liege, so dass ein Zeitraum von maximal 30 Jahren anzulegen sei.⁴⁷ Diese Herangehensweise überzeugt jedoch nicht, denn die gesetzlichen Formulierungen geben ebenso wenig wie die Gesetzmaterialien einen Hinweis darauf, dass es auf die Nutzungsdauer durch die jeweils das Objekt tatsächlich nutzenden Personen und damit auf subjektive Aspekte ankomme. Vielmehr geht es um die gewöhnliche Nutzungsdauer des Gebäudes unabhängig von etwaigen Nutzerwechseln.⁴⁸ Wesentlich kürzere Zeiträume wurden indessen in der Vergangenheit regelmäßig von den für die EnEV verantwortlichen Ministerien angelegt: Zu den jeweiligen Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Vorfeld von EnEV-Novellierungen wurde die Vorgabe gemacht, lediglich ein Zeitraum von 20 Jahren zugrunde zu legen.⁴⁹ Dieser Zeitraum liegt offenkundig weit unter der real üblichen durchschnittlichen Nutzungsdauer von neuen Gebäuden – selbst bei Nichtwohngebäuden – und führt zu einer massiven systematischen Verschiebung des Wirtschaftlichkeitsgrundsatzes zu Lasten der Energieeffizienz. Richtigerweise dürfte darauf abzustellen sein und hätte für die betreffenden Untersuchungen

⁴⁴ Eingehend in diesem Sinne mit Bezug zu § 25 EnEV OVG Koblenz, Beschluss v. 6.11.2019 - 8 A 10289/19, BeckRS 2019, 36094, Rn. 14 ff.

⁴⁵ Undeutlich Müller-Kuhlmann, in: Theobald, Energierecht (EL 74 04/2012), § 5 EnEG Rn. 14, nach der es auf die Einzelkomponenten ankommen soll.

⁴⁶ BT-Drs. 7/4575, S. 11.

⁴⁷ Müller-Kuhlmann, in: Theobald, Energierecht (EL 74 04/2012), § 5 EnEG Rn. 15; vgl. auch Frenz/Lülsdorf, EnEG/EnEV (2015), § 5 EnEG Rn. 37 f.

⁴⁸ Ähnlich Frenz/Lülsdorf, EnEG/EnEV (2015), § 5 EnEG Rn. 36.

⁴⁹ Vgl. BMVBS (Hrsg.): Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Gebäude mit der EnEV 2012 – Anforderungsmethodik, Regelwerk und Wirtschaftlichkeit. BMVBS-Online-Publikation 05/2012, S. 31. Vgl. dort auch die nachfolgenden Berechnungen.

ermittelt werden müssen, auf welche Nutzungsdauern neue Gebäude der jeweiligen Art im Durchschnitt objektiv ausgelegt werden – wobei der etwaige vorzeitige Austausch von einzelnen für die Energieeffizienz maßgebenden Komponenten zu berücksichtigen gewesen wäre. Alternativ könnte auch die Anrechnung von Restwerten in Betracht kommen, was für die Untersuchungen zur Festlegung der EnEV-Anforderungen aber ausdrücklich ausgeschlossen wurde.⁵⁰

- Speziell hinsichtlich der Anforderungen im Hinblick auf *bestehende Gebäude* stellt sich die zusätzliche Frage, was unter einer „angemessenen Nutzungsdauer“ zu verstehen ist. Insofern wird in der Kommentarliteratur davon ausgegangen, dass es um die verbleibende Restnutzungsdauer gehe, für die verallgemeinerbare Konkretisierungen jedoch wiederum nicht möglich seien, so dass mit Abschätzungen gearbeitet werden müsse.⁵¹
- Eine weitere, rechtspolitisch hoch bedeutsame Frage richtet sich darauf, was das *maßgebliche Vergleichsobjekt* ist – oder mit anderen Worten: mit welcher Alternative bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu vergleichen ist. In den von den zuständigen Bundesministerien veranlassten wissenschaftlichen Untersuchungen zur Fortschreibung des Anforderungsniveaus der EnEV für Neubauten wurde auf Grundlage des früheren § 5 Abs. 1 EnEG stets danach gefragt, ob die in Aussicht genommenen neuen Anforderungen sich *im Vergleich zu den jeweils zuvor geltenden Anforderungen* als wirtschaftlich – und damit diesen gegenüber als wirtschaftlicher – darstellen.⁵² Diese Verfahrensweise begegnet indessen erheblichen rechtlichen Bedenken. Die gesetzliche Vorschrift stellt nach ihrem eindeutigen Wortlaut darauf ab, ob die „erforderlichen Aufwendungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauer durch die eintretenden Einsparungen erwirtschaftet werden können“. Dort ist nicht davon die Rede, dass ein Anforderungsniveau mit einem anderen zu vergleichen sei – bzw. die Mehraufwendungen eines erwogenen neuen Anforderungsniveaus mit den durch das erhöhte Niveau erreichbaren zusätzlichen Einsparungen. Es kommt vielmehr darauf an, ob die erforderlichen Aufwendungen zur Einhaltung der energiebezogenen Anforderungen die dadurch zu erwartenden Einsparungen übersteigen. Aus dem Blickwinkel der gesetzlichen Formulierung ist daher der Vergleich zwischen der Situation mit den in Betracht gezogenen Anforderungen und einer fiktiven Situation ohne jegliche Anforderungen maßgebend (praktisch also mit einem Wärmeschutz entsprechend dem bauphysikalisch notwendigen bzw. bauordnungsrechtlich geforderten Minimum). Der stattdessen angestellte Vergleich des neuen mit dem jeweils vorhandenen Anforderungsniveau führt demgegenüber zu einer Verzerrung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, die wiederum zu Lasten der Energieeffizienz geht und mit dem Wortlaut der zugrunde liegenden Vorschrift nicht zu vereinbaren ist.

Weitere erhebliche Unsicherheiten ergeben sich daraus, dass die gesetzliche Bestimmung nur hinsichtlich der energiebedingten Mehr- und Minderkosten eine Forderung aufstellt, alle anderen in die erforderliche Prognose einzustellenden Faktoren jedoch unberücksichtigt lässt und auch berechnungsmethodisch keine Vorgaben macht. Je nachdem, welche der verschiedenen betriebswirtschaftlich anerkannten Berechnungsmethoden für die Wirtschaftlichkeit angewandt wird und welche Annahmen beispielsweise zur Energiekostenentwicklung oder zu dem zu

⁵⁰ Ebenda, S. 32.

⁵¹ Frenz/Lülsdorf, EnEG/EnEV (2015), § 5 EnEG Rn. 38. Undeutlich insoweit Müller-Kuhlmann, in: Theobald, Energierecht (EL 74 04/2012), § 5 EnEG Rn. 14 ff.

⁵² Ebenda, S. 29. Vgl. auch die nachfolgenden Berechnungen sowie die weitere Studie BMVBS (Hrsg.): Ergänzungsuntersuchungen zum Wirtschaftlichkeitsgutachten für die Fortschreibung der Energieeinsparverordnung. BMVBS-Online-Publikation 30/2012, S. 4 f.

berücksichtigenden Kapitalzins getroffen werden⁵³, kann die Berechnung zu stark differierenden Ergebnissen führen. Diese Problematik veranlasste den Gesetzgeber (ehedem) des EnEG und heute des GEG jedoch nicht dazu, weiterführende Vorgaben zur Berechnung aufzustellen. Daraus kann in der Konsequenz nur geschlossen werden, dass der Gesetzgeber insoweit früher dem Ordnungsgeber und heute sich selbst weitgehende Beurteilungsspielräume belassen wollte oder will, deren Anwendung in den Grenzen der wissenschaftlichen Vertretbarkeit und des Willkürverbots unbeeinflusst bleiben soll.

Zu beachten ist, dass in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen spätestens seit dem Inkrafttreten des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG)⁵⁴ auch der sich aus diesem Gesetz ergebende CO₂-Preis prognostisch zu berücksichtigen ist (was in den bereits 2018 fertiggestellten Gutachten zur Festlegung des Anforderungsniveaus im GEG 2020 schon aus zeitlichen Gründen nicht berücksichtigt werden konnte, so dass diese insofern als überholt anzusehen sind). Das ergibt sich unmittelbar aus dem Umstand, dass der CO₂-Preis Bestandteil der zu erwartenden Energiekosten ist. Hierzu bedarf es keiner Änderung oder Ergänzung des GEG. Hinsichtlich der Höhe ist anzumerken, dass die im BEHG für die Jahre bis 2025 festgelegten Festpreise und die Preisspanne für 2026 nur für diese jeweiligen Jahre in die Berechnung eingestellt werden dürfen. Für den nachfolgenden längeren Zeitraum muss eine realistische Prognose angestellt werden, die zumindest einer wissenschaftlichen Plausibilitätsprüfung standhalten können muss. Vor dem Hintergrund der inzwischen festgesetzten sehr weitreichenden Zielsetzungen des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG)⁵⁵ zur CO₂-Minderung dürfte in längerfristiger Perspektive mit einem sehr hohen Knappheitspreis für CO₂ emittierende Brennstoffe zu rechnen sein. Es dürfte aber sehr schwer sein, diesen in die Zukunft hinein belastbar abzuschätzen, weshalb es nahe liegt, im Rahmen einer Gesetzesnovelle des GEG hierzu genauere Vorgaben zu machen.⁵⁶

6.1.2.1.3 Typisierung – Fallgruppenbildung

Nach § 5 GEG kommt es – wie bereits nach dem früheren § 5 Abs. 1 EnEG – darauf an, ob sich die Anforderungen (bzw. Pflichten) auf Grundlage der anzuwendenden Maßstäbe „generell“ als wirtschaftlich vertretbar darstellen. Die Verwendung des Begriffes „generell“ wirft die Frage auf, ob damit gemeint ist, es müsse für jeden einzelnen Anwendungsfall der Anforderungen die Wirtschaftlichkeit im Sinne der Formel sichergestellt werden. Auf diesen Gedanken ließe sich kommen, denn der Begriff „generell“ wird in juristischen Zusammenhängen anders als „grundsätzlich“ oft dahin verstanden, es dürfe keine Ausnahmen geben.

Schon die Gesetzesbegründung zu § 5 Abs. 1 EnEG gab jedoch unter Betonung des Umstands, dass es um Maßstäbe für „Gebäude gleicher Art und Nutzung“ gehe, zu erkennen, dass insoweit typisierende „Fallgruppen“ zu betrachten sein sollen.⁵⁷ Ähnlich heißt es in der Begründung des Gesetzentwurfs zum GEG, durch den Begriff „generell“ werde „klargestellt, dass sich die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit auf Fallgruppen beziehen kann“.⁵⁸ Dem folgt für § 5 EnEG auch die

⁵³ Zu den bei der Fortschreibung der EnEV angewandten Parametern siehe als Beispiel BMVBS (Hrsg.): Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Gebäude mit der EnEV 2012 – Anforderungsmethodik, Regelwerk und Wirtschaftlichkeit. BMVBS-Online-Publikation 05/2012, S. 29 ff.

⁵⁴ Gesetz v. 12.12.2019 (BGBl. I S. 2728), zul. geänd. 3.11.2020 (BGBl. I S. 2291).

⁵⁵ Gesetz v. 12.12.2019 (BGBl. I S. 2513), zul. geänd. 18.08.2021 (BGBl. I S. 3905).

⁵⁶ Eine solche könnte z.B. dahin gehen, anknüpfend an die vom UBA entwickelte Methodenkonvention die Anwendung eines sog. CO₂-Schattenpreises in Höhe von (aktuell) 195 Euro pro Tonne CO₂ vorzugeben (siehe UBA, Methodenkonvention 3.1, abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-umweltkosten).

⁵⁷ Vgl. BT-Drs. 7/4575, 1 f.

⁵⁸ BT-Drs. 19/16716, S. 113.

Kommentarliteratur.⁵⁹ Das Gesetz geht also insoweit von einer typisierenden Betrachtungsweise aus, die es nicht erforderlich macht, für jeden einzelnen Anwendungsfall die Wirtschaftlichkeit sicherzustellen.

6.1.2.2 Zum Regelungsgehalt von § 102 Abs. 1 GEG

6.1.2.2.1 Allgemeines: Funktion, Rechtsfolge, Antragserfordernis

Im Unterschied zu § 5 GEG fokussiert die Befreiungsbestimmung des § 102 GEG auf die Ebene der konkreten Einzelfallanwendung. Das Wirtschaftlichkeitskriterium ist hier als eine der Voraussetzungen für die Erteilung einer Befreiung von Anforderungen des GEG in einen größeren Regelungskontext eingebettet, bei dem es um den Umgang mit besonders gelagerten Einzelfällen geht. Welche Rolle diese Einbettung spielt, wird sogleich näher zu betrachten sein.

Formelle Voraussetzung für die Erteilung der Befreiung ist ein Antrag des/der von der jeweiligen gesetzlichen Verpflichtung Betroffenen.

Sofern die Voraussetzungen der Befreiungsvorschrift gegeben sind, sieht die Bestimmung vor, dass die nach Landesrecht zuständigen Behörden von den Anforderungen dieses Gesetzes zu befreien „haben“. Den Behörden steht auf der Rechtsfolgenseite also kein Ermessensspielraum zu. So lag es auch schon bei dem früheren § 25 EnEV, der seinerseits auf der speziellen Verordnungsermächtigung des § 5 Abs. 2 EnEG beruhte. Nach dieser war in den Regelungen auf Verordnungsebene vorzusehen, „dass auf Antrag von den Anforderungen befreit werden kann, soweit diese im Einzelfall wegen besonderer Umstände durch einen unangemessenen Aufwand oder in sonstiger Weise zu einer unbilligen Härte führen.“ Der Verordnungsgeber der EnEV normierte im Kontrast dazu weitergehend einen Befreiungsanspruch. Der heutige § 102 GEG hat den Befreiungsanspruch übernommen.

Neu ist im Unterschied zum früheren § 25 EnEV der – hier nicht entscheidende – § 102 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 GEG, nach dem eine Befreiung auch zu erteilen ist, wenn „die Ziele dieses Gesetzes durch andere als in diesem Gesetz vorgesehene Maßnahmen im gleichen Umfang erreicht werden“. Auch derartige Fälle sprach die frühere EnEV bereits an, unterstellte die damals als „Ausnahme“ eingeordnete positive Behördenentscheidung jedoch in § 24 Absatz 2 EnEV einem behördlichen Ermessen, während nun einheitlich ein Befreiungsanspruch vorgesehen ist.⁶⁰

In § 102 GEG wurde außerdem speziell zu dieser Klausel zusätzlich ein weiterer dritter Absatz verankert, in dem geregelt ist, dass die Erfüllung der Voraussetzungen „nach Absatz 1 Satz 1 Nummer 1“ durch den Eigentümer oder Bauherrn darzulegen und nachzuweisen ist und die zuständige Behörde insoweit die Darlegung durch Sachverständige verlangen kann. Die betreffende Klausel umfasst ihrem Wortlaut nach zwar nicht auch die hier entscheidende Nummer 2, so dass die Frage aufkommen könnte, ob Entsprechendes auch für diese gilt. Allerdings ist auf Basis der allgemeinen Regeln des Verwaltungsverfahrensrechts ohnehin davon auszugehen, dass die jeweils den Befreiungsantrag stellende Person darlegungspflichtig ist, da es hier um ausschließlich ihrem Einflussbereich zuzuordnende Tatsachen geht.⁶¹ Es kann daher festgehalten werden, dass die den Antrag stellende Person auch in dem hier besprochenen Kontext darlegen und belegen muss, warum aus ihrer Sicht eine Befreiung geboten ist. Darlegungsmängel führen dazu, dass der Antrag abgelehnt werden muss.

⁵⁹ Müller-Kuhlmann, in: Theobald, Energierecht (EL 74 04/2012), § 5 EnEG Rn. 12; vgl. auch Frenz/Lülsdorf, EnEG/EnEV (2015), § 5 EnEG Rn. 28.

⁶⁰ Der Gesetzentwurf zum GEG begründet diese Änderung nicht. Er spricht stattdessen davon, die Vorschrift führe das bisherige Recht ohne inhaltliche Änderung fort, vgl. BT-Drs. 19/16716, S. 158.

⁶¹ Vgl. Kallerhoff/Fellenberg, in: Stelkens/Bonk/Sachs, Verwaltungsverfahrensgesetz (9. Aufl. 2018), § 24 Rn. 54 m.w.N. Das schließt erforderlichenfalls auch die Vorlage eines privaten Sachverständigengutachtens ein (siehe ebenda, Rn. 49).

6.1.2.2.2 Zur Voraussetzung der Amortisierbarkeit

Nach § 102 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 GEG ist von den Anforderungen dieses Gesetzes zu befreien, soweit „die Anforderungen im Einzelfall wegen besonderer Umstände durch einen unangemessenen Aufwand oder in sonstiger Weise zu einer unbilligen Härte führen“. Satz 2 der Bestimmung ergänzt: „Eine unbillige Härte liegt insbesondere vor, wenn die erforderlichen Aufwendungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauer, bei Anforderungen an bestehende Gebäude innerhalb angemessener Frist durch die eintretenden Einsparungen nicht erwirtschaftet werden können.“

Sofern es zur Anwendung von Satz 2 der Bestimmung kommt, ist in dem jeweiligen Einzelfall folglich zu prüfen, ob die erforderlichen Aufwendungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauer erwirtschaftet werden können (so bei Anforderungen an neue Gebäude). Speziell bei Anforderungen an bestehende Gebäude kommt es demgegenüber darauf an, ob die erforderlichen Aufwendungen innerhalb angemessener Frist durch die eintretenden Einsparungen erwirtschaftet werden können. Dem Wortlaut nach stimmen diese Maßstäbe mit den nach § 5 GEG anzulegenden Kriterien überein. Der entscheidende Unterschied liegt darin, dass im Rahmen des § 5 GEG für die Beurteilung (realitätsnahe) Fallgruppen für verschiedene Gebäudearten gebildet werden, während hier das einzelne Gebäude bzw. Bauvorhaben zu betrachten ist.

Folglich kann hinsichtlich der Frage, welche Vergleichsmaßstäbe bei der Prüfung der Amortisierbarkeit anzulegen sind, grundsätzlich auf die Ausführungen zu § 5 GEG verwiesen werden (siehe oben, Kapitel 6.1.2.1.2). Zu beachten ist dabei jedoch die unterschiedliche Funktion der beiden Vorschriften. § 5 GEG richtet sich an den Gesetzgeber, dem die Aufgabe zukommt, allgemeine Vorgaben zu formulieren, wobei ihm von Verfassungswegen ein großer Beurteilungs- und Gestaltungsspielraum zusteht. Anders ist es bei der Befreiungsvorschrift. Hier geht es um einen konkreten Eingriff in das Eigentumsgrundrecht (Art. 14 Abs. 1 des Grundgesetzes – GG). Die gesetzliche Bestimmung gibt einen Anspruch auf Befreiung, wenn die Voraussetzungen erfüllt sind. Folglich muss exakt festgestellt werden, ob die Voraussetzung der fehlenden Amortisierbarkeit gegeben ist. Insoweit bestehen seitens der zuständigen Behörde keine Beurteilungsspielräume. Anders läge es, wenn die Vorschrift Ermessen eröffnen würde. Dann könnte die Behörde beispielsweise eine Entscheidungspraxis entwickeln, bei der es zu einer Befreiung nur bei nicht unerheblich negativer Vergleichsbilanz kommt. Das Gesetz sieht ein behördliches Ermessen jedoch nicht vor.

In Anbetracht dieser gänzlich anderen Ausgangssituation bei § 102 GEG als bei § 5 GEG stellt sich die Frage, wie mit den diversen nur allgemein ausgedrückten Tatbestandskriterien und den etwaigen Unsicherheiten hinsichtlich der zu bewertenden Sachlage umzugehen ist. Unsicherheiten auf der tatbestandlichen Seite – also etwa hinsichtlich der Frage, was die „übliche Nutzungsdauer“ ist oder im Hinblick darauf, ob auf einzelne Gebäudekomponenten oder auf das Gesamtgebäude abzustellen ist – müssen in Ermangelung eines behördlichen Beurteilungsspielraums eindeutig geklärt werden. Im Falle eines Rechtsstreits würden darüber die Gerichte zu entscheiden haben. Das bringt die Gefahr mit sich, dass Behörden zur Vermeidung eines Rechtsstreits an solche Fragen tendenziell großzügig herangehen. Anlass zur Großzügigkeit bietet darüber hinaus insbesondere der Umstand, dass die Bestimmung eine Maßgabe allein für den Vergleich zwischen Aufwand und Einsparungen der jeweiligen Maßnahmen enthält, aber nichts darüber aussagt, wie bei dem Vergleich im Übrigen methodisch vorzugehen ist und welche Entwicklung von Energiepreisen oder Zinsen zugrunde zu legen ist. In Bezug auf derartige Aspekte bleibt der Behörde gar nichts anderes übrig, als jede plausible oder vertretbare Berechnung zu akzeptieren, da ihr die maßgeblichen Vorschriften keine Berechtigung dazu verleihen, insoweit bestimmte Vorgaben zu machen. Lediglich willkürlich oder offenkundig nicht belastbare bzw. unrealistische Annahmen wird die Behörde deshalb insofern ablehnen können.

Auf der anderen Seite kann eine bedeutende Rolle spielen, dass die Darlegungslast bei der jeweils den Antrag stellenden Person liegt. Unvollständige Berechnungen, fehlende Belege oder ein (in relevanten Teilen) unklarer Vortrag führen dazu, dass dem Antrag nicht stattgegeben werden kann, da nicht feststeht, dass die betreffende Voraussetzung erfüllt ist. Das kann insbesondere bei den Neubauanforderungen wichtig sein, denn hier kommt es – wie aufgezeigt – auf die Gesamtenergieeffizienz des Gebäudes an. Das GEG belässt den Bauherren bzw. Eigentümern wie früher die EnEV insoweit sehr weite Handlungsspielräume; es gibt nicht die Wahl bestimmter konkreter Materialien oder Gebäudekomponenten vor.⁶² Klimapolitisch ist das problematisch, bisher jedoch geltende Rechtslage⁶³ (siehe hierzu die Ausführungen in Kapitel 6.1.3.1).

Allerdings ist es unter verfassungsrechtlichen Aspekten zumutbar, ein Bauwerk „möglichst so zu planen, dass die gesetzlichen Anforderungen erfüllt werden“.⁶⁴ Daher wird im Einzelfall nicht nur darzulegen sein, dass es nicht möglich sei, die zur Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen erforderlichen Aufwendungen bei der jeweils gewählten Bauweise und den gewählten Einzelkomponenten durch die betreffenden Einsparungen zu erwirtschaften. Vielmehr wird weitergehend zu belegen sein, dass eine Erwirtschaftung des Aufwands durch die Einsparungen auch dann ausgeschlossen ist, wenn auf andere (mögliche) Weise gebaut würde oder andere Komponenten eingesetzt würden. Darzulegen und zu belegen ist also, dass es *überhaupt* nicht möglich ist, ein Gebäude entsprechender Funktion und Größe an dem betreffenden Standort unter Einhaltung des Wirtschaftlichkeitserfordernisses zu errichten, ggf. also auch unter Veränderung der Bauweise sowie der Bauteile und der eingesetzten Technik.

6.1.2.2.3 Zur Voraussetzung „besonderer Umstände“

Die Bedeutung des Amortisierungsgebots aus § 102 Abs. 1 Satz 2 GEG relativiert sich noch durch einen weiteren Umstand – und zwar grundlegend. Die Bestimmung steht nämlich unter der in Satz 1 der Vorschrift formulierten *vorgelagerten* Voraussetzung, dass „besondere Umstände“ vorliegen, die „durch einen unangemessenen Aufwand oder in sonstiger Weise zu einer unbilligen Härte führen“.

Entgegen dem möglichen ersten Anschein⁶⁵ ist die nachfolgende Formel des Satzes 2, nach der eine unbillige Härte insbesondere vorliegt, „wenn die erforderlichen Aufwendungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauer [...] nicht erwirtschaftet werden können“ nicht so zu verstehen, als definiere sie, unter welchen Voraussetzungen wirtschaftlich von „besonderen Umständen“ auszugehen sei. Vielmehr beschreibt sie lediglich, wann aus wirtschaftlichem Blickwinkel von einer „unbilligen Härte“ in solchen Fallkonstellationen auszugehen ist, bei denen „besondere Umstände“ vorliegen, die eine Abweichung von den Anforderungen des Gesetzes rechtfertigen. Vorgelagert ist also zu prüfen, ob überhaupt „besondere Umstände“ im Sinne der Vorschrift vorliegen. Ohne „besondere Umstände“ im Sinne von Satz 1 der Vorschrift kann es zur Anwendung von Satz 2 der Bestimmung nicht kommen. Aus der fehlenden Amortisierbarkeit kann also nicht auf das Vorliegen „besonderer Umstände“ geschlossen werden. Vielmehr ist es umgekehrt: Es müssen „besondere Umstände“ vorliegen, und nur wenn diese bejaht werden, spielt die Prüfung der Amortisierbarkeit eine Rolle.

⁶² Vgl. Halstenberg/Nusser: Energieeinsparung und Energieeffizienz im Bau- und Planungsrecht, EnWZ 2013, 343, 348.

⁶³ Zur Illustration: Die hohe Komplexität des GEG-Nachweisverfahrens über ein Referenzgebäude (§§ 15,16, 18 GEG) bzw. mittlere U-Werte (§ 19 GEG) ist der Aufrechterhaltung der weiten Handlungsspielräume geschuldet. Dies führt z.B. zur Möglichkeit des Baus von hochverglasten Gebäuden mit einem entsprechend weit überdurchschnittlich hohen Energiebedarf (Winter wie Sommer). Verursacht wird das dadurch, dass den Berechnungen des Vergleichs-Referenzgebäudes gleicher Geometrie, Gebäudenutzung und Ausrichtung dann ebenfalls ein verglastes Gebäude zugrunde zu legen ist.

⁶⁴ Ausdrücklich OVG Münster, Beschluss v. 2.10.2019 - 2 A 1846/19, BeckRS 2019, 25473, Rn. 7. Vgl. auch OVG Koblenz, Beschluss v. 6.11.2019 - 8 A 10289/19, BeckRS 2019, 36094, Rn. 19.

⁶⁵ Einen solchen Anschein erweckt auch die ungenaue Begründung des Gesetzentwurfs zu § 102 GEG, vgl. BT-Drs. 19/16716, S. 158.

Von diesem Verständnis gehen auch die beiden (offenbar) einzigen zur Problematik vorliegenden obergerichtlichen Entscheidungen aus (betreffend § 25 EnEV).⁶⁶ Das OVG Koblenz führt dazu aus:⁶⁷

„Die Befreiung setzt hiernach voraus, dass die Anforderungen der Energieeinsparverordnung im Einzelfall wegen besonderer Umstände durch einen unangemessenen Aufwand oder in sonstiger Weise zu einer unbilligen Härte führen. Eine Befreiung kann hiernach nicht bereits dann erteilt werden, wenn Maßnahmen zur Einhaltung der Energieeinsparverordnung einen unangemessenen Aufwand oder in sonstiger Weise eine unbillige Härte zur Folge haben. Vielmehr setzt dies in Umsetzung des § 5 Abs. 2 EnEG voraus, dass der unangemessene Aufwand oder sonstige Gründe auf im Einzelfall vorliegenden besonderen Umständen beruhen. Dies erfordert aber, dass bei dem Betroffenen entweder besondere subjektive Umstände vorliegen oder eine atypische objektive Sachlage gegeben ist. Dies kann etwa der Fall sein, wenn Topografie, Grundstückszuschnitt, Raumaufteilung und geplante Nutzung Besonderheiten aufweisen, die besonders hohe Aufwendungen erfordern, um die Anforderungen der Energieeinsparverordnung einhalten zu können (vgl. zum Vorstehenden: OVG NRW, Beschluss vom 2. Oktober 2019 - 2 A 1846/19 -, juris, Rn. 10; Frenz/Lülsdorf, Energieeinsparungsgesetz, 2015, § 5, Rn. 44; Begründung zum Gesetzentwurf der Bundesregierung vom 14. Januar 1976, BT-Drs. 7/4575, S. 12). Dass es insoweit auf die Besonderheiten des Einzelfalls ankommt, wird auch aus der Systematik des Gesetzes ersichtlich. Während § 5 Abs. 1 EnEG bestimmt, dass die in den Rechtsverordnungen zu diesem Gesetz gestellten Anforderungen generell wirtschaftlich vertretbar sein müssen, soll mit der Einräumung einer Befreiungsmöglichkeit nach § 5 Abs. 2 EnEG die Möglichkeit eröffnet werden, auf Besonderheiten des Einzelfalls einzugehen (vgl. Frenz/Lülsdorf, a.a.O., § 5 EnEG, Rn. 45).“

In der Konsequenz führt diese Auslegung dazu, dass für eine Anwendung des in § 102 Abs. 1 Satz 2 GEG formulierten Amortisierbarkeitsgebots kein Raum ist, wenn das jeweilige Bau- oder Änderungsvorhaben keine Besonderheiten aufweist, die von den bei der Festlegung der gesetzlichen Anforderungen zugrunde gelegten Regelfällen (Fallgruppen) abweichen. Solche Abweichungen können subjektiv begründet oder auf objektive Umstände zurückzuführen sein. Subjektive Gründe dürften wohl nur im Falle von verlangten Einzeländerungen in Betracht kommen – etwa wenn diese kurzfristig durchzuführen wäre, dies den Bewohnenden aber aus gesundheitlichen Gründen nicht zugemutet werden kann. Objektive Gründe wird es häufiger auch bei Neubauten geben können, insbesondere in den vom OVG Koblenz genannten Fällen wie einer ungewöhnlichen Topographie oder außergewöhnlicher Grundstücksverhältnisse. Handelt es sich jedoch um ein gewöhnliches Gebäude üblicher Art, Größe und Raumaufteilung an einem Standort ohne atypische Gegebenheiten, so kann eine Anwendung der Befreiungsvorschrift somit von vornherein nicht in Betracht kommen.

Hierzu sei nochmals das OVG Koblenz zitiert, dessen Überlegungen sich auch auf andere Fälle übertragen lassen, in denen sich der Bauherr selbst dazu entschließt, sein Bauwerk – z.B. aus ästhetischen Gründen – auf besondere Weise zu bauen und zu gestalten und der finanzielle Aufwand zur Einhaltung der Energieanforderungen deshalb besonders groß ist:⁶⁸

„Im Falle der Kläger sind indessen keine besonderen subjektiven Umstände oder atypischen objektiven Sachlagen erkennbar, die eine unbillige Härte zur Folge hätten. Insoweit ist den Klägern zwar zuzugestehen, dass die Energieeinsparverordnung ausführungsneutral ist (vgl. Halstenberg/Nusser: Energieeinsparung und Energieeffizienz im Bau- und Planungsrecht, EnWZ 2013, 343, 348). Der Bauherr genießt indessen keine völlige Freiheit in der Auswahl des Materials. Vielmehr muss gewährleistet sein, dass durch die vorgesehene Bauausführung die Werte der Energieeinsparverordnung eingehalten werden können. Bevorzugt der Bauherr hiernach, ohne dass hierfür besondere Umstände ersichtlich sind, – etwa wegen der bauphysikalischen Eigenschaften – ein bestimmtes Material, das die Anforderungen der Energieeinsparverordnung nicht erfüllt, so kann ihm ein höherer Aufwand

⁶⁶ Eingehend OVG Münster, Beschluss v. 2.10.2019 - 2 A 1846/19, BeckRS 2019, 25473, Rn. 5 ff., ferner OVG Koblenz, Beschluss v. 6.11.2019 - 8 A 10289/19, BeckRS 2019, 36094, Rn. 18 ff.

⁶⁷ OVG Koblenz, Beschluss v. 6.11.2019 - 8 A 10289/19, BeckRS 2019, 36094, Rn. 18.

⁶⁸ OVG Koblenz, Beschluss v. 6.11.2019 - 8 A 10289/19, BeckRS 2019, 36094, Rn. 19.

abverlangt werden, um die maßgeblichen Werte einzuhalten. Insoweit liegt kein Härtefall vor. Für den dem Bauherrn entstehenden Mehraufwand sind letztlich nicht die Anforderungen der Energieeinsparverordnung ursächlich. Vielmehr beruhen sie auf seiner Entscheidung für die Verwendung eines bestimmten Baumaterials. Wollte man diesen Umstand als Härtefall anerkennen, so könnte die Energieeinsparverordnung - gerade in Bezug auf Neubauten - ihre Regelungswirkung nur eingeschränkt entfalten (vgl. OVG NRW, a.a.O., juris, Rn. 9).

Die dargestellte Auslegungsweise kann zu dem Eindruck einer gewissen Wertungsdiskrepanz führen. Denn in denjenigen Fällen, in denen „besondere Umstände“ bejaht werden, wird im zweiten Schritt ein großzügiger einzelfallbezogener Wirtschaftlichkeitsmaßstab angelegt, während außerhalb dieser Sonderfälle hingenommen werden muss, dass sich die Anforderungen im Einzelfall als nicht amortisierbar darstellen. Diese Diskrepanz ist jedoch dem in § 5 GEG angelegten gesetzlichen Konzept geschuldet, nach dem hinsichtlich der wirtschaftlichen Vertretbarkeit grundsätzlich typisierend auf Fallgruppen abzustellen ist (siehe oben, Kapitel 6.1.2.1.3). Dieses Konzept verlöre seinen Sinn, wenn auf der Einzelfallebene jeder auch nur kleine wirtschaftliche Nachteil einen Befreiungsanspruch auslösen würde. Es erscheint vom Gesetzeskonzept her daher durchaus konsistent, als zusätzliche Schranke für die ausnahmsweise Anwendung eines einzelfallbezogenen Wirtschaftlichkeitsmaßstabes das Vorliegen eines ungewöhnlich gelagerten Falles zu fordern, der sich von den bei Festlegung der gesetzlichen Anforderungen angenommenen Regelfällen (erkennbar) abhebt.⁶⁹

Somit kann festgehalten werden, dass die fehlende Amortisierbarkeit allein das Vorliegen einer „unbilligen Härte“ und damit eines Befreiungsanspruches nicht begründen kann. Auf das Kriterium der Amortisierbarkeit kommt es vielmehr nur in ungewöhnlich gelagerten Einzelfällen an, bei denen von „besonderen Umständen“ im Sinne des § 102 Abs. 1 Satz 1 GEG auszugehen ist. Das dürfte äußerst selten vorkommen.

6.1.2.2.4 Anwendbarkeit des Amortisierbarkeitskriteriums auf Anforderungen, die nicht zu (Energie-) Kosteneinsparungen führen können?

Der Anwendungsbereich des in § 102 Abs. 1 Satz 2 GEG aufgestellten Tatbestandmerkmals der Amortisierbarkeit im Einzelfall erfährt demnach bereits durch das Erfordernis „besonderer Umstände“ eine weitreichende Einschränkung. Hinzu könnte noch eine weitere Einschränkung kommen: Es fragt sich, ob die Vorschrift überhaupt angewandt werden kann, soweit es um Anforderungen geht, die sozusagen naturgemäß überhaupt nicht zu Kosteneinsparungen führen können oder darauf jedenfalls nicht zielen.

Nach § 102 Abs. 1 Satz 2 GEG liegt eine unbillige Härte „insbesondere vor, wenn die erforderlichen Aufwendungen [...] durch die eintretenden Einsparungen nicht erwirtschaftet werden können“. Da die Formulierung nicht ausdrücklich allein auf Anforderungen „zur Energieeinsparung“ oder „zur Energieeffizienz von Gebäuden oder Anlagen“ gerichtet ist, könnte gefolgert werden, die Formel sei auf sämtliche Anforderungen des GEG anzuwenden, auch wenn sich diese gar nicht amortisieren können oder sich eine Amortisierung nicht berechnen lässt, weil es sich etwa um Überwachungs- oder Nachweisanforderungen handelt. Dafür könnte systematisch auch sprechen, dass § 102 Abs. 2 GEG nur die „Vorschriften des Teils 5“ – also die Bestimmungen über Energieausweise – von der Anwendbarkeit des § 102 Abs. 1 GEG explizit ausnimmt, jedoch andere Vorschriften unerwähnt lässt.

Im GEG gibt es eine Reihe von Anforderungen und Pflichten, deren Anwendung entweder überhaupt nicht zu einer Kosteneinsparung führen kann oder die allenfalls mittelbar einen nicht bezifferbaren kleinen Beitrag dazu leisten könnten. Deren Geltung von der Amortisierbarkeit abhängig zu machen, ergäbe vor dem Hintergrund der gesetzlichen Ziele keinen Sinn. Zu diesen

⁶⁹ Ähnlich zum Ganzen OVG Münster, Beschluss v. 2.10.2019 - 2 A 1846/19, BeckRS 2019, 25473, Rn. 8.

gehören neben den weiter unten in spezieller Weise zu betrachtenden Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes (§ 14 GEG) Regelungen wie die Vorgaben zur Außerbetriebnahme bzw. zum Einbauverbot von bestimmten Heizkesseln (§ 72 GEG), zur Inspektion von Klimaanlage (§§ 75 ff. GEG), zur Abgabe von Erfüllungserklärungen (§ § 92 ff. GEG) oder zur Abgabe und zur Aufbewahrung von Unternehmererklärungen (§ 96 GEG).

Für die meisten dieser Regelungen dürfte eine Anwendung des § 102 Abs. 1 Satz 2 GEG jedoch bereits deshalb nicht in Betracht kommen, weil die Bestimmung jeweils nur dann Anwendung finden kann, wenn es um einen Fall „besonderer Umstände“ im Sinne von § 102 Abs. 1 Satz 1 GEG geht. Außerdem ist zu beachten, dass § 102 Abs. 1 GEG im Unterschied zu § 5 GEG lediglich von „Anforderungen“ spricht, nicht auch von „Pflichten“. Das deutet darauf hin, dass eine Befreiung von Pflichten, bei denen es sich nicht zugleich um „Anforderungen“ handelt, von vornherein gesetzlich nicht vorgesehen ist, weil der Gesetzgeber die Erfüllung generell als wirtschaftlich zumutbar angesehen hat. Dafür spricht Einiges, zumal das GEG an einer Reihe von Stellen ausdrücklich von „Anforderungen“ spricht (z.B. in der Überschrift des Titels 2: „Anforderungen an zu errichtende Gebäude“ sowie in diversen Anlagen des Gesetzes im Hinblick auf einzuhaltende quantifizierbare bauliche und technische Schwellenwerte) und sich jedenfalls begleitende Pflichten wie zu Nachweisen oder zur Überwachung hiervon relativ klar abgrenzen lassen. In bestimmten Fällen kann die Abgrenzung jedoch schwierig sein, wie z.B. bei den Vorgaben zur Einsetzbarkeit von Heizkesseln.

Ungeachtet dessen, dass für viele der betreffenden Anforderungen oder Pflichten des Gebäudeenergierechts demnach bereits andere Gründe greifen, die zur Nichtanwendbarkeit des Amortisierungskriteriums führen, spricht nach hiesiger Auffassung Überwiegendes dafür, dass das Kriterium nur auf gesetzliche Vorgaben Anwendung finden kann, mit denen eine unmittelbare Kosteneinsparung verbunden sein kann. Denn nur in solchen Fällen ergibt das Kriterium sachlich einen Sinn und nur in diesen lässt sich die geforderte Berechnung praktisch durchführen. Die Anwendbarkeit der Vorschrift ist daher entsprechend ihrem Sinn und Zweck teleologisch auf solche Anforderungen des Gebäudeenergierechts zu beschränken, die der Energieeinsparung dienen.

Die Vorschrift selbst spricht im Übrigen davon, dass eine unbillige Härte „insbesondere“ vorliegt, wenn sich die betreffenden Aufwendungen nicht durch die Einsparungen erwirtschaften lassen. Es muss also noch andere Fälle der unbilligen Härte geben können. Es liegt zumindest nahe anzunehmen, dass damit (auch) Fälle gemeint sind, bei denen es auf die Wirtschaftlichkeit sachlogisch gar nicht ankommen kann. Warum sich diese dennoch am Wirtschaftlichkeitskriterium messen lassen sollten, erschließt sich nicht.

6.1.3 Verfassungs- und EU-rechtliche Einordnung

6.1.3.1 Verfassungsrecht

Verfassungsrechtlich sind Anforderungen an die energetische Gebäudequalität als Inhalts- und Schrankenbestimmungen nach Art. 14 Abs. 1 Satz 2 GG zu werten, die sich im Hinblick auf die Schwere der Eigentumsbeeinträchtigung als vereinbar mit dem Verhältnismäßigkeitsgebot darstellen müssen.⁷⁰ Das im GEG wie schon im früheren EnEG angewandte Wirtschaftlichkeitsgebot legt für die Anforderungen demgegenüber einen engeren Maßstab an.

⁷⁰ Grundlegend/zusammenfassend zur Verhältnismäßigkeitsprüfung BVerfGE 67, 157, 173 ff.

Die Anwendung dieses besonders engen Maßstabs ist verfassungsrechtlich nicht geboten.⁷¹ Es ist nicht ersichtlich, dass das BVerfG die Zumutbarkeitsgrenze für Eigentumseingriffe bereits dann als verletzt ansehen würde, wenn Maßnahmen verlangt werden, die sich nicht amortisieren. Das würde auch der alltäglichen Gesetzespraxis im Bausektor widersprechen, in dem es eine Vielzahl von Regelungen gibt, welche den Grundstückseigentümern Maßnahmen auferlegen, die ausschließlich zu Kostenbelastungen führen, ohne dass diesen überhaupt ein individueller Nutzen gegenübersteht – geschweige denn sich die Kosten amortisieren würden. Das gilt z.B. für die im Bauordnungsrecht verbreitete Pflicht zur Schaffung von Kfz-Einstellplätzen⁷², Spielplätzen oder behindertengerechten Zugängen, Auflagen zum Zwecke des Denkmalschutzes⁷³ oder im Mietrecht Einschränkungen beim Kündigungsschutz.⁷⁴ Dem Gemeinwohl dienende Anforderungen müssen weder belastungsneutral noch gar gewinnbringend sein.⁷⁵ Die Vorschriften dürfen allerdings nicht so weit gehen, dass die wirtschaftliche Nutzbarkeit des Grundstückes in der Substanz beeinträchtigt würde.⁷⁶ Unterhalb dieser absoluten Grenze kommt es wie auch sonst bei Art. 14 GG darauf an, ob die konkrete Belastung in Abwägung zwischen dem jeweils verfolgten öffentlichen Interesse und der Schwere des Eingriffs (noch) zumutbar ist.⁷⁷ Dem Klimaschutz als verfassungsrechtlich hochrangigem Allgemeinwohlziel dienende Anforderungen zur energetischen Gebäudequalität dürften deshalb in aller Regel zumutbar sein, schon weil damit gerechnet werden kann, dass die investiven Mehraufwendungen auf längere Sicht zumindest annähernd durch Energiekosteneinsparungen aufgewogen werden.⁷⁸ Auch aus dem baurechtlichen Bestandsschutzgebot folgt nichts anderes. In seiner jüngeren Rechtsprechung stellt das BVerwG klar, dass die Gesetzgebung nicht an ein absolutes Bestandsschutzgebot gebunden ist, sondern auch insoweit auf das verfassungsrechtliche Verhältnismäßigkeitsgebot abzustellen ist.⁷⁹

Im Lichte des Beschlusses des BVerfG zum Bundes-Klimaschutzgesetz vom 24. März 2021 scheint nicht mehr nur – wie vorangehend ausgeführt – klar, dass der Wirtschaftlichkeitsmaßstab des Gebäudeenergierechts verfassungsrechtlich nicht geboten und im Vergleich zu anderen Gesetzesmaterien ungewöhnlich ist. Vielmehr dürfte sogar davon auszugehen sein, dass dieser verfassungswidrig ist, weil er den Wertungen des GG widerspricht. Der Klimaschutz und konkret das Ziel der Klimaneutralität genießen nach der Entscheidung des BVerfG als Konkretisierung des Auftrags aus Art. 20a GG Verfassungsrang. Zwar stellt das Gericht klar, der Klimaschutz genieße mit „Art. 20a GG keinen unbedingten Vorrang gegenüber anderen Belangen, sondern ist im Konfliktfall in einen Ausgleich mit anderen Verfassungsrechtsgütern und Verfassungsprinzipien zu bringen.“⁸⁰ Genau an der damit geforderten Abwägung fehlt es jedoch, wenn das GEG mit seinem Wirtschaftlichkeitsgebot kategorisch den individuellen Wirtschaftlichkeitsinteressen der Gebäudeeigentümer und Bauherren einen zwingenden Vorrang vor den mit dem Gesetz verfolgten Klimaschutzzielen gibt, der selbst dann gilt, wenn mit den energetischen Maßnahmen allenfalls geringfügige wirtschaftliche Belastungen verbunden sein können. Hinzu kommt, dass ein

⁷¹ Siehe zum Nachfolgenden Klinski, in: Rodi (Hrsg.), Handbuch Klimaschutzrecht (2021, im Erscheinen), § 35 Gebäudeenergie Rn. 42 ff. Eingehend dazu auch Halbig/Antoni, EnWZ 2018, 259, 261 ff.; Klinski, ER 2019, 104, 106 f.; Ahlbrink, energetische Sanierungspflichten (2019), Kap. 10.

⁷² BVerfG NVwZ 2009, 837, 838 f. mwN.

⁷³ Vgl. BVerfGE 100, 226, 242 f.

⁷⁴ Vgl. BVerfGE 68, 361, 367 f. und BVerfGE 79, 292, 302.

⁷⁵ Vgl. BVerfGE 102, 1, 19 ff.; BVerfGE 100, 226, 243; BVerfG NJW 1992, 361, 361 f.

⁷⁶ Vgl. BVerfGE 102, 1, 19 ff.

⁷⁷ Eingehend Halbig/Antoni, EnWZ 2018, 259, 262 f.; Ekardt/Klinski/Schomerus (2015), 399 ff.

⁷⁸ Nicht überzeugend vor diesem Hintergrund Böhm/Schwarz, NVwZ 2012, 129, 131.

⁷⁹ Vgl. BVerwG NVwZ 1990, 755, 757; NVwZ 1991, 984, 985; NJW 1992, 3923, 3926.

⁸⁰ BVerfG, Beschl. V. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18 u.a., Ls. 2a und Rn. 198.

Festhalten an dem Wirtschaftlichkeitsgebot namentlich bei den Neubauanforderungen genau das bewirken würde, was das BVerfG in seinen Ausführungen zur „intertemporalen Freiheitssicherung“ als unvereinbar mit den Freiheitsgrundrechten einstuft⁸¹ und daher aus Verfassungssicht verhindert werden muss: Geringe Anforderungen an die Neubauten von heute führen nämlich dazu, dass für sehr lange Zeit hohe CO₂-Emissionen verursacht werden, wodurch nicht nur das Erreichen der Klimaschutzziele erschwert wird, sondern die Spielräume für die Wahrnehmung von Freiheitsrechten in der Zukunft entsprechend kleiner werden.

6.1.3.2 EU-Recht

Hinter den Anforderungen des Gebäudeenergierechts stehen seit 2002 (auch) die Anforderungen der Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden⁸² (Gebäude-RL, häufig auch als EPBD⁸³ bezeichnet), welche im Jahr 2010 als RL 2010/31/EU⁸⁴ neu gefasst und Ende 2018 mit der RL (EU) 2018/844⁸⁵ um einzelne Regelungen ergänzt wurde.

Der Entwurf des GEG rechtfertigt das in ihm angelegte Amortisierungsgebot für die energetischen Anforderungen an Gebäude damit, dieses korreliere mit dem EPBD verankerten Grundsatz der Kostenoptimalität, nach dem die Mitgliedstaaten „kostenoptimale Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von neuen Gebäuden festlegen.“⁸⁶ Es wäre jedoch voreilig, daraus zu schließen, es dürften aus EU-rechtlichen Gründen keine strengeren Anforderungen aufgestellt werden.⁸⁷

Den Begriff „kostenoptimales Niveau“ definiert Art. 2 Nr. 14 EPBD als das „Gesamtenergieeffizienzniveau, das während der geschätzten wirtschaftlichen Lebensdauer mit den niedrigsten Kosten verbunden ist [...] [Es] liegt in dem Bereich der Gesamtenergieeffizienzniveaus, in denen die über die geschätzte wirtschaftliche Lebensdauer berechnete Kosten-Nutzen-Analyse positiv ausfällt“ (also im Bereich kosteneffizienter Niveaus). Näheres zur Ermittlung regelt die Delegierte Verordnung (EU) Nr. 244/2012.⁸⁸ Danach können die Mitgliedstaaten wählen zwischen einer „finanziellen“ Vergleichsmethode, die nur auf betriebswirtschaftlichen Parametern beruht, und einer „makroökonomischen“ Methode, bei der auch die volkswirtschaftlichen Kosten berücksichtigt werden. Die Anwendung eines rein betriebswirtschaftlich ausgelegten („finanziellen“) Wirtschaftlichkeitsgebots ist also EU-rechtlich nicht vorgegeben. Zwar geht Deutschland mit seinen Anforderungen im GEG diesen Weg. Diese Herangehensweise ist jedoch aus dem Blickwinkel der EPBD durchaus änderbar. Namentlich wäre ein Wechsel zur „makroökonomischen“ Methode möglich.

Im Kontext der hier betrachteten Fragestellung lässt sich noch aus einem anderen Umstand ableiten, dass Deutschland bei der Formulierung von energetischen Mindeststandards an Bestandsgebäude nicht an einen Kostenoptimalitätsstandard gebunden ist: In Art. 1 Abs. 3 EPBD ist ausdrücklich geregelt:

„Bei den Anforderungen dieser Richtlinie handelt es sich um Mindestanforderungen; sie hindern die einzelnen Mitgliedstaaten nicht daran, verstärkte Maßnahmen beizubehalten oder zu ergreifen.“

⁸¹ Vgl. BVerfG, Beschl. V. 24.03.2021 - 1 BvR 2656/18 u.a., Ls. 4 und (eingehend) Rn. 182 ff.

⁸² „Energy Performance of Buildings Directive“.

⁸³ Erste Fassung: RL 2002/91/EG, ABl. EG 2003 L 1, 65.

⁸⁴ ABl. EU 2010 L 153, 13.

⁸⁵ ABl. EU 2018 L 256, 75.

⁸⁶ BT-Drs. 19/16716, S. 113.

⁸⁷ Siehe zum Nachfolgenden Klinski, in: Rodi (Hrsg.), Handbuch Klimaschutzrecht (2021, im Erscheinen), § 35 Gebäudeenergie Rn. 69.

⁸⁸ ABl. EU 2010 L 81, 18; siehe dazu die Leitlinien der EU-Kommission (ABl. EU 2012 C 115, 1).

Konkret im Hinblick auf die Kostenoptimalität heißt es im 10. Erwägungsgrund der EPBD zudem ausdrücklich, die Mitgliedstaaten sollten ihre Anforderungen „so wählen, dass ein kostenoptimales Verhältnis zwischen den zu tätigen Investitionen und den über die Lebensdauer des Gebäudes eingesparten Energiekosten erreicht wird, und zwar unbeschadet des Rechts der Mitgliedstaaten, Mindestanforderungen festzulegen, die größere Energieeffizienz bewirken als kostenoptimale Energieeffizienzniveaus.“

6.2 Wirtschaftlichkeitsgebot und sommerlicher Wärmeschutz

6.2.1 Allgemeines zu den Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz

Die Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz bei neu zu errichtenden Gebäuden⁸⁹ regelt das GEG in § 14. Mit der Regelung wurde das bisher für Wohngebäude in Anlage 1 Nr. 3 und für Nichtwohngebäude (damit identisch) in Anlage 2 Nr. 4 der EnEV geregelte⁹⁰ Anforderungskonzept der EnEV zum sommerlichen Wärmeschutz inhaltlich unverändert übernommen.⁹¹ Die Bestimmungen gelten einheitlich für Wohn- und Nichtwohngebäude. Sie sind zurückzuführen auf die EnEV-Novelle 2013 (für 2014/2016), mit der die vorherigen Vorschriften an den fortschreitenden Stand der Erkenntnisse und der in Bezug genommenen technischen Normen angepasst wurden.⁹²

Ziel der Anforderungen ist es, an heißen Sommertagen die Behaglichkeit der Räume durch Vermeiden eines übermäßigen Aufheizens der Räume zu gewährleisten.⁹³ Nach der Entwurfsbegründung zu § 14 GEG folgt die Vorschrift dem Ansatz, „den sommerlichen Wärmeschutz vorrangig durch bauliche Maßnahmen sicherzustellen, um auf den Einsatz von Klimaanlage nach Möglichkeit verzichten zu können.“⁹⁴

Nach dem Ursprungskonzept der EnEV in ihrer Fassung von 2002 verpflichtete die Verordnung grundsätzlich zu einem sommerlichen Wärmeschutz durch bauliche Maßnahmen auf Grundlage bestimmter einzuhaltender Sonneneintragskennwerte. Hiervon abweichend wurde speziell bei Nichtwohngebäuden, bei denen die Raumluft unter Einsatz von Energie gekühlt wird, gestattet, diese Gebäude so auszuführen, „dass die Kühlleistung bezogen auf das gekühlte Gebäudevolumen nach dem Stand der Technik und den im Einzelfall wirtschaftlich vertretbaren Maßnahmen so gering wie möglich gehalten wird“ (siehe Anhang 1 Nr. 2.9.2 der EnEV 2002).

Auf diesem Konzept beruhen die einschlägigen Bestimmungen unter gewissen Modifikationen noch heute. Die Möglichkeit zur Abweichung von dem auch als „vereinfachtes Verfahren“ bezeichneten Sonneneintragskennwerteverfahren besteht allerdings nicht mehr nur für Nichtwohngebäude, sondern für sämtliche Gebäude (siehe § 14 Abs. 3 GEG sowie zuvor bereits Anlage 1 Nr. 3 EnEV 2013). Stattdessen kann auch ein „thermisches Simulationsverfahren“ zur Anwendung kommen. Die Begründung des Gesetzentwurfs zum GEG spricht inzwischen von einem „Wahlrecht“.⁹⁵

⁸⁹ Anzuwenden ist die Bestimmung darüber hinaus auch bei Maßnahmen des Ausbaus und der Erweiterung von Gebäuden nach Maßgabe von § 51 Abs. 2 GEG.

⁹⁰ Siehe dazu die betreffenden Verweise auf die Anlagen 1 und 2 in §§ 3 Abs. 4, 4 Abs. 4 EnEV.

⁹¹ Vgl. BT-Drs. 19/16716, S. 116.

⁹² Vgl. den Verordnungsentwurf der EnEV 2013 in BR-Drs. 113/13, S. 140.

⁹³ BT-Drs. 19/16716, S. 116.

⁹⁴ BT-Drs. 19/16716, S. 116.

⁹⁵ BT-Drs. 19/16716, S. 116.

Maßgeblich sind der zweite und dritte Absatz von § 14 GEG, nach denen es darauf ankommt, ob die in der DIN 4108-2 in der Fassung vom Februar 2013 aufgestellten Anforderungen eingehalten werden:

- „(2) Ein ausreichender sommerlicher Wärmeschutz nach Absatz 1 liegt vor, wenn die Anforderungen nach DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 8 eingehalten werden und die rechnerisch ermittelten Werte des Sonnenenergieeintrags über transparente Bauteile in Gebäude (Sonneneintragskennwert) die in DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 8.3.3 festgelegten Anforderungswerte nicht überschreiten. Der Sonneneintragskennwert des zu errichtenden Gebäudes ist nach dem in DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 8.3.2 genannten Verfahren zu bestimmen.
- (3) Ein ausreichender sommerlicher Wärmeschutz nach Absatz 1 liegt auch vor, wenn mit einem Berechnungsverfahren nach DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 8.4 (Simulationsrechnung) gezeigt werden kann, dass unter den dort genannten Randbedingungen die für den Standort des Gebäudes in DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 8.4 Tabelle 9 angegebenen Übertemperatur-Gradstunden nicht überschritten werden.“

Das Sonneneintragskennwertverfahren führt praktisch zu einer Verpflichtung, den Sonneneintrag durch bauliche Maßnahmen zu reduzieren, so dass es keiner Kühlung durch kältetechnische Anlagen bedarf. Seit der EnEV 2013 ist hierbei die DIN 4108-2: 2013-02 anzuwenden. Darin werden auch passive technische Kühlungsmaßnahmen (wie Lüftung ohne Einsatz von Kälteaggregaten) als Maßnahmen zur Reduzierung der Sonneneintragsmenge eingeordnet. Die Möglichkeit zur Nachtlüftung und der Einsatz passiver Kühlung erhöht den zulässigen Sonneneintragskennwert. (d.h. die Sonneneintragsmenge darf dann höher sein; die "vorhandene" Sonneneintragsmenge aber bleibt gleich).

Die Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz entfallen, sofern problematisch hohe Sonneneinträge auf Grund der vorgesehenen Bauweise nicht zu erwarten sind. Maßgebend ist insoweit Abschnitt 8.2.2 der DIN 4108-2: 2013-02 (siehe § 14 Abs. 5 GEG). Höhere und ggf. mitzuberechnende Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz können sich wiederum auf Grund von anderen Vorschriften ergeben (z.B. zum Arbeitsschutz oder zum Gesundheitsschutz). Diese werden durch § 14 GEG nicht verdrängt (siehe § 10 Abs 3 GEG).⁹⁶

Auffällig ist weiter, dass die Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes nicht zu den Anforderungen zählen, die nach § 10 Abs. 2 GEG für die Einstufung des Gebäudes als Niedrigstenergiegebäude maßgebend sind (siehe den insoweit eindeutigen Wortlaut von § 10 Abs. 2 GEG, in dem weder die Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes nach § 14 noch die Anforderungen zum Mindestwärmeschutz, zur Vermeidung von Wärmebrücken und zur Dichtheit nach den §§ 11-13 GEG erwähnt werden). Allerdings führt das nicht dazu, dass die betreffenden Vorgaben für die Einhaltung des Niedrigstenergiestandards gänzlich bedeutungslos wären, denn die jeweiligen Parameter wirken auf die Berechnungsergebnisse zu den Anforderungen an den Gesamtenergiebedarf des Gebäudes und den baulichen Wärmeschutz ein, auf die es für die Einstufung als Niedrigstenergiegebäude ankommt.

Keine Erwähnung finden die Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes schließlich auch in den Bußgeldvorschriften (siehe § 108 GEG), so dass bei Verstößen gegen die Vorschriften keine Sanktionen verhängt werden können.

6.2.2 Das spezielle Wirtschaftlichkeitsgebot des § 14 Abs. 4 GEG

6.2.2.1 Zum Regelungsgehalt

§ 14 GEG enthält zu den Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz eine spezielle Wirtschaftlichkeitsklausel. Der vierte Absatz der Vorschrift lautet:

⁹⁶ Ausdrücklich BT-Drs. 19/16716, S. 116.

„(4) Wird bei Gebäuden mit Anlagen zur Kühlung die Berechnung nach Absatz 3 durchgeführt, sind bauliche Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2: 2013-02 Abschnitt 4.3 insoweit vorzusehen, wie sich die Investitionen für diese baulichen Maßnahmen innerhalb deren üblicher Nutzungsdauer durch die Einsparung von Energie zur Kühlung unter Zugrundelegung der im Gebäude installierten Anlagen zur Kühlung erwirtschaften lassen.“

Zum Verständnis einiger Komponenten der Vorschrift kann auf die Ausführungen an anderer Stelle in dieser Ausarbeitung verwiesen werden. Das gilt insbesondere für die Begriffe „übliche Nutzungsdauer“ und „erwirtschaften“ (siehe oben, Kapitel 6.1.2.1.2).

Abzustellen ist hinsichtlich der „üblichen Nutzungsdauer“ nach dem Wortlaut der Bestimmung auf die übliche Nutzungsdauer der erwogenen baulichen Maßnahmen („deren ... Nutzungsdauer“), nicht der Anlage zur Kühlung. Da bauliche Vorkehrungen in der Regel eine wesentlich längere Nutzungsdauer haben als Kühltageaggregate, ist dieser Aspekt bedeutsam. Er führt dazu, dass bei der Gegenüberstellung der Kostenwirkungen ggf. auch die Kosten für den zwischenzeitlichen Ersatz von Kühlungsanlagen mit zu berücksichtigen sind.

Auch durch § 14 Abs. 4 GEG wird ein Amortisierbarkeitskriterium aufgestellt. Anzuwenden ist dieses hier als Maßstab, um zu beurteilen, ob es den Bauherren bzw. Eigentümern abverlangt werden kann, zusätzlich zu den vorgesehenen Kühlungsanlagen weitere bauliche Maßnahmen zur Reduzierung der Sonneneinträge vorzusehen. Aus der Bestimmung ergibt sich, dass das nicht der Fall ist, wenn sich die Investition in (zusätzliche) bauliche Maßnahmen zur Reduzierung der Sonneneinträge nicht als rentabel darstellt, weil der investive Aufwand für diese Maßnahmen höher ist als die durch die Maßnahmen erzielbare Einsparung von Energiekosten für die Raumkühlungsanlagen.

Im Gesetzentwurf zu § 14 GEG heißt es dazu knapp:

„Absatz 4 setzt den Vorrang des baulichen sommerlichen Wärmeschutzes gegenüber den energetisch aufwendigen Maßnahmen zur maschinellen Kühlung um.“

Ausführlicher wird auf die Vorschrift in der Begründung zu § 3 Abs. 4 der EnEV-Novelle 2013 eingegangen, mit der die Bestimmung eingeführt wurde. Dort heißt es:

„Für maschinell gekühlte Gebäude könnte die Anwendung des in der Norm vorgesehenen ausführlichen Verfahrens dazu genutzt werden, den im Energieeinsparrecht seit 1984 enthaltenen Vorrang des baulichen sommerlichen Wärmeschutzes (Vermeidungsstrategie) vor der energieaufwendigen maschinellen Kühlung zu umgehen. Abschnitt 3.1.2 soll diese Lücke nach Maßgabe des Wirtschaftlichkeitsgebots in § 5 EnEG schließen. Das Verfahren mit Sonneneintragskennwerten führt dagegen per se zu einem Vorrang des baulichen Wärmeschutzes. Ergeben sich dabei im Einzelfall unwirtschaftliche Anforderungen an die baulichen „Vermeidungsmaßnahmen“, steht es frei, das ausführliche Verfahren zu nutzen und die Grenze der Wirtschaftlichkeit dieser baulichen Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz zu bestimmen und geltend zu machen. Bei Zweifeln an der Wirtschaftlichkeit im Einzelfall kann durch überschlägige Rechnungen gezeigt werden, inwieweit beim fraglichen Gebäude sommerlicher Wärmeschutz unter der Voraussetzung der Wirtschaftlichkeit nach der Verordnung erforderlich ist.“

Auch wenn die Begründung zu § 3 Abs. 4 der EnEV 2013 es nur andeutet und die Begründung zum Gesetzentwurf zum GEG wörtlich das Gegenteil behauptet: Der Vorrang des baulichen sommerlichen Wärmeschutzes wird durch die betreffenden Vorschriften nicht „umgesetzt“, sondern in einen Vorrang von energiebetriebenen Kälteanlagen umgekehrt. Denn nach der Vorschrift wird nicht darauf abgestellt, ob die Kühlungsanlage wirtschaftlich ist, sondern darauf, ob der zusätzliche bauliche Wärmeschutz wirtschaftlich ist.

„Umgesetzt“ würde der Vorrang, wenn der Einsatz von Kühlungsanlagen nur in dem Umfang zulässig wäre, in dem eine ausreichende Reduzierung der Raumtemperaturen durch baulichen Wärmeschutz nicht gewährleistet werden kann. In abgeschwächter Form würde auch von einem

Vorrang des baulichen Wärmeschutzes gesprochen werden können, wenn bestimmte bauliche Vorkehrungen in jedem Falle als Mindestanforderungen vorgegeben würden (d.h. auch wenn Kühlungsanlagen eingesetzt werden). Auf Grundlage des Wortlauts der gegenwärtigen Vorschrift ist demgegenüber zweifelsfrei davon auszugehen, dass in den betreffenden Fällen ein Vorrang des baulichen Wärmeschutzes nicht besteht, sondern dieser nur geboten ist, wenn er sich trotz der technischen Kühlungsanlagen „rentiert“.

Auf den Punkt gebracht, stellt sich § 14 Abs. 4 GEG damit praktisch als indirekte Einladung zur Umgehung der baulichen Anforderungen zur Minderung des Sonneneintrags (bzw. der durch diesen hervorgerufenen Temperaturerhöhung)⁹⁷ durch Einsatz von Klimaanlage dar: Wenn ausreichend leistungsfähige Klimaanlage eingesetzt werden – was im Belieben des Bauherrn ohne weiteres möglich ist – kann dies also dazu führen, dass es keiner Minderung des Sonneneintrags durch baulich-technische Vorkehrungen mehr bedarf, weil (wenn) diese betriebswirtschaftlich keinen Zusatznutzen bringen. Wer also eine Klimaanlage einsetzt und auf baulichen Sommerwärmeschutz verzichten möchte, kann dies im Ergebnis ohne weiteres tun – es sei denn im Einzelfall ergibt sich durch den baulichen Wärmeschutz ein wirtschaftlicher Vorteil.

6.2.2.2 Besonderheiten im Verhältnis zu § 102 GEG

Im Verhältnis zu § 102 GEG ergibt sich aus dem Inhalt von § 14 Abs. 4 GEG, dass dieser als speziellere Regelung an deren Stelle tritt, soweit sein Anwendungsbereich eröffnet ist. Das bedeutet:

Wird bei Gebäuden mit Anlagen zur Kühlung die Berechnung im Simulationsverfahren durchgeführt – so der Wortlaut der Bestimmung –, so findet allein § 14 Abs. 4 GEG Anwendung. Für die zusätzliche Anwendung von § 102 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 GEG ist dann kein Raum. Dessen Anwendung bedarf es auch deshalb nicht, weil sich § 14 Abs. 4 GEG von § 102 GEG noch durch ein anderes Merkmal unterscheidet: Für die Anwendung von § 14 Abs. 4 GEG bedarf es keines Antrags auf Befreiung. Die Rechtsfolge der Freistellung von baulichen Maßnahmen zur Minderung des Sonneneintrags ergibt sich unmittelbar aus der Vorschrift.

Das hat innerhalb des Anforderungssystems des GEG für neue Gebäude noch weitergehende Konsequenzen. Es führt dazu, dass es eine behördliche Vorab-Prüfung hinsichtlich der korrekten Anwendung des Wirtschaftlichkeitsgebots nicht gibt. Sofern die zuständige Behörde (dennoch) im Einzelfall Kenntnis davon erlangen sollte, dass ein unzureichender sommerlicher Wärmeschutz vorgesehen ist oder umgesetzt worden ist, kann sie dagegen mit einer Einzelanordnung zur Einhaltung der Bestimmungen vorgehen (§ 95 Satz 1 GEG: „Die zuständige Behörde kann im Einzelfall die zur Erfüllung der Verpflichtungen aus diesem Gesetz erforderlichen Anordnungen treffen.“). Die Verhängung eines Bußgeldes bei Verstößen ist demgegenüber nicht möglich, da es einen entsprechenden Bußgeldtatbestand nicht gibt (siehe § 108 GEG).

6.2.3 Zum Umgang mit von § 14 Abs. 4 GEG nicht erfassten Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz

Soweit § 14 Abs. 4 GEG nicht zur Anwendung kommt, stellt sich die Frage, ob ein Antrag auf Befreiung von den Anforderungen auf Grundlage von § 102 GEG Abs. 1 Satz 2 in Betracht kommen kann. Der Wortlaut der einschlägigen Bestimmungen lässt dies nicht eindeutig erkennen, doch spricht aus hiesiger Sicht Überwiegendes dafür, dass das nicht der Fall ist, weil von den Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes außerhalb von § 14 Abs. 4 GEG nach dem Gesetzeskonzept (überhaupt) nicht befreit werden darf.

⁹⁷ Das ist z.B. durch größere Speichermassen oder Lüftung denkbar. Auch derartige Maßnahmen können in einem weiten Sinne als bauliche Maßnahmen zur Minderung des Sonneneintrags eingeordnet werden.

Relevant ist die betreffende Frage bei allen Fällen, die nicht von § 14 Abs. 4 GEG erfasst sind. Dabei handelt es sich um zwei Gruppen von Fallgestaltungen:

- ▶ zum einen um Fälle, bei denen das Sonneneintragskennwerteverfahren angewendet wird (§ 14 Abs. 2 GEG), jedoch die sich daraus nach der betreffenden DIN-Norm zulässigen Höchstwerte nicht eingehalten werden,
- ▶ zum anderen um Konstellationen, in denen das Simulationsverfahren angewendet wird (§ 14 Abs. 3 GEG), es sich jedoch nicht um „Gebäude mit Anlagen zur Kühlung“ handelt, und bei denen wiederum die für derartige Fälle nach der betreffenden DIN-Norm zulässigen Höchstwerte nicht eingehalten werden.

Für die Möglichkeit eines Befreiungsantrages auf Grundlage des § 102 Abs. 1 Satz 2 GEG lässt sich argumentieren, dass die Vorschrift allgemein von „den Anforderungen dieses Gesetzes“ spricht und nicht näher zwischen unterschiedlichen Anforderungen differenziert. Dagegen lässt sich anführen, dass § 14 GEG mit der Regelung seines vierten Absatzes im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz eine spezielle (antragslose) Befreiungsbestimmung enthält (bzw. zuvor in den betreffenden Bestimmungen in EnEV-Anlagen). Das spricht eher für die Annahme, dass der Gesetzgeber (bzw. zuvor der Verordnungsgeber der EnEV) das Erfordernis einer Freistellung von den Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes in bestimmten Einzelfällen durchaus gesehen hat, mit diesem aber bewusst anders umgehen wollte als bei § 102 GEG (bzw. zuvor bei § 25 EnEV). Ganz sicher ist diese Ableitung allerdings nicht, denn es könnte auch sein, dass dahinter das Motiv stand, die in § 14 Abs. 4 GEG (bzw. in EnEV-Anlagen) geregelten Fälle durch den Verzicht auf das Antragserfordernis (ganz) besonders zu privilegieren, es für alle anderen Fallgestaltungen aber bei der allgemeinen Befreiungsmöglichkeit auf Antrag zu belassen.

Im Ergebnis können die Argumente für eine Anwendbarkeit des § 102 Abs. 1 Satz 2 GEG nicht überzeugen. Dagegen spricht zunächst, dass die Anwendung des Wirtschaftlichkeitskriteriums nur dort Sinn ergibt und daher nur dort möglich ist, wo es um Anforderungen geht, die auf Energieeinsparungen zielen, denn mit deren Kosteneinsparungswirkungen müssten die Aufwendungen jeweils verglichen werden (siehe oben, Kapitel 6.1.2.2.4). Der sommerliche Wärmeschutz führt zwar nicht in allen, aber doch zumindest in sehr vielen typischen Fällen nicht zu Energieeinsparungen, weil die Verminderung des Sonneneintrags einen höheren Heizwärmebedarf bewirkt. Die Zielrichtung der gesetzlichen Anforderungen liegt nicht in der Energieeinsparung, sondern in der Sicherung einer behaglichen, zumindest gesundheitlich zumutbaren Raumtemperatur. Von daher lässt sich die Wirtschaftlichkeitsklausel nicht sinnvoll auf Fälle des sommerlichen Wärmeschutzes anwenden.

Dieses Verständnis findet seine Bestätigung in der Begründung zur Neuregelung in der EnEV 2013. Aus ihr ergibt sich, dass es zu einer Wirtschaftlichkeitsprüfung nur im Kontext des früheren § 3 Abs. 4 EnEV – also des heutigen § 14 Abs. 4 GEG – kommen soll. Insoweit seien nochmals aus der bereits soeben zitierten Passage die folgenden Formulierungen herausgehoben:

„Das Verfahren mit Sonneneintragskennwerten führt dagegen per se zu einem Vorrang des baulichen Wärmeschutzes. Ergeben sich dabei im Einzelfall unwirtschaftliche Anforderungen an die baulichen „Vermeidungsmaßnahmen“, steht es frei, das ausführliche Verfahren zu nutzen und die Grenze der Wirtschaftlichkeit dieser baulichen Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz zu bestimmen und geltend zu machen.“

Die Äußerung ist für sich genommen zwar nur begrenzt schlüssig, weil die in der Begründung erläuterte Freistellungsregelung (heute § 14 Abs. 4 GEG) an sich die Anwendung von Anlagen zur Kühlung voraussetzt (was zu Umgehungszwecken allerdings leicht arrangiert werden kann, siehe Kapitel 6.2.2.1). Dennoch bringt die Erläuterung insoweit klar zum Ausdruck, dass es im

Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz nicht zu behördlichen Antragsverfahren kommen soll. Das kann nur erreicht werden, wenn § 102 GEG insofern keine Anwendung findet.

In der Konsequenz ist deshalb zu schließen, dass eine Befreiung von den Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz außerhalb der (antragslosen) Freistellungsregelung des § 14 Abs. 4 GEG nicht beantragt werden kann und daher im Ergebnis auch nicht möglich ist. Die Errichtung eines Gebäudes ohne den nach § 14 Abs. 2 oder Abs. 3 GEG erforderlichen baulichen Wärmeschutz verstieße folglich gegen das Gesetz, es sei denn von den Anforderungen wird in Anwendung von § 14 Abs. 4 GEG freigestellt.

Die Nichtanwendbarkeit des § 102 GEG auf von § 14 Abs. 4 GEG nicht erfasste Fallgestaltungen des § 14 GEG ist letztlich eine Konsequenz aus dem Konzept des § 5 GEG, nach dem für typische Fallgruppen von Gebäuden „generell“ davon auszugehen sein soll, dass die Einhaltung der Anforderungen wirtschaftlich vertretbar ist. Aus dieser Perspektive lassen sich die Anforderungen des § 14 GEG – ebenso wie die Anforderungen der §§ 11-13 GEG zum Mindestwärmeschutz, zur Vermeidung von Wärmebrücken und zur Dichtheit – dahin verstehen, dass die Maßnahmen zu ihrer Einhaltung generell als wirtschaftlich vertretbar gelten.

Selbst wenn § 102 GEG in den angesprochenen Fallgestaltungen grundsätzlich anwendbar sein sollte, dürfte dies auf die Praxis im Übrigen kaum Auswirkungen haben können. Denn auch hier würde es ggf. so liegen, dass das Vorliegen von „besonderen Umständen“ geltend gemacht werden müsste (siehe dazu oben, 2.2.2.3). Dem Verfasser fällt kein Gebäude-Neubau ein, bei dem solche „besonderen Umstände“ im Hinblick auf die Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz vorliegen könnten – denn denkbare Spezialfälle wie etwa Gebäude, bei denen ein Sonneneintrag gerade erwünscht ist (wie z.B. Gewächshäuser), sind bereits aus dem Anwendungsbereich der Gebäudeanforderungen des GEG ausgenommen (siehe § 2 Abs. 2 GEG).

6.3 Ergänzende Einzelfragen

Vorbemerkung: Bei den angesprochenen Aspekten ist teils zwischen der Ebene der Rechtsetzung (= Festlegung der Anforderungen durch den Gesetzgeber) und der Rechtsanwendung im Einzelfall zu unterscheiden. Im Hinblick auf die Rechtsetzung geht es um § 5 GEG, im Hinblick auf die Einzelfallebene um § 102 GEG (Befreiung auf Antrag) oder um § 14 Abs. 4 GEG (antragslose Freistellung).

► In welchen Fällen findet das Wirtschaftlichkeitsgebot Anwendung bei den Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz bei Neubauten?

Gesetzesebene: Das Wirtschaftlichkeitsgebot ist durch den Gesetzgeber in Anwendung des § 5 GEG bei der Festlegung der Anforderungen des § 14 GEG typisierend betrachtet worden. Ergebnis ist, dass die Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes aus § 14 Abs. 2 und 3 GEG generell als wirtschaftlich vertretbar gelten, soweit hiervon nicht § 14 Abs. 4 GEG aus Gründen der Wirtschaftlichkeit freistellt.

Einzelfallebene: Das Wirtschaftlichkeitsgebot findet im Einzelfall ausschließlich im Rahmen von § 14 Abs. 4 GEG Anwendung, sonst nicht. Eine Befreiung in sonstigen Fällen kommt nicht in Betracht.

► Ist das Wirtschaftlichkeitsgebot nur anzuwenden, wenn es auch eine monetäre Einsparung gibt (Gebäude mit Kühlung)?

Gesetzesebene: Der Gesetzgeber hat einen weiten Beurteilungs- und Gestaltungsspielraum. Er ist an das Wirtschaftlichkeitsgebot nur gebunden, soweit er sich selbst daran binden will. Er kann es auf Gesetzesebene jederzeit aufheben oder gezielt ignorieren. Gebunden ist er

verfassungsrechtlich nur an das Verhältnismäßigkeitsgebot, aus dem sich nicht ergibt, dass staatliche Auferlegungen wirtschaftlich sein müssten.

Einzelfallebene: Das Wirtschaftlichkeitsgebot findet im Einzelfall ausschließlich im Rahmen von 14 Abs. 4 GEG Anwendung, d.h. wenn Anlagen zur Kühlung eingesetzt werden. Die nach Maßgabe von § 14 Abs. 2 GEG grundsätzlich geforderten baulichen Maßnahmen zur Minderung des Sonneneintrags gelten generell als wirtschaftlich vertretbar, so dass das Wirtschaftlichkeitsgebot im Einzelfall nicht geprüft werden muss; auch die Stellung eines Befreiungsantrags ist insofern nicht möglich. Allerdings können die Anforderungen unter Anwendung von § 14 Abs. 4 GEG umgangen werden, also durch Einsatz von Anlagen zur Kühlung. In diesem Fall sind Abweichungen von baulichen Anforderungen zur Minderung des Sonneneintrags in Anwendung des Wirtschaftlichkeitsgebots zulässig, soweit sich Investitionen in bauliche Maßnahmen innerhalb deren üblicher Nutzungsdauer durch die Einsparung von Energie zur Kühlung unter Zugrundelegung der im Gebäude installierten Anlagen zur Kühlung nicht erwirtschaften lassen würden.

► **Kann der Gesetzgeber in zukünftiger Gesetzgebung (z.B. bei der Aktualisierung des GEG) Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz stellen und dabei das Wirtschaftlichkeitsgebot umgehen?**

Ja. Er ist dabei lediglich an den Verhältnismäßigkeitsgrundsatz sowie bei Differenzierungen an das Gleichheitsgebot gebunden.

► **Wie ist damit umzugehen, dass es sich beim sommerlichen Wärmeschutz, sofern Gebäude nicht aktiv gekühlt werden, in der Regel nur um einen nicht-monetären Nutzen (Steigerung von Behaglichkeit, Produktivität bis hin zur Vermeidung von Hitzetoten) handelt, für den jedoch Investitionskosten anfallen?**

Diese Anforderungen sind außerhalb des Anwendungsbereichs von § 14 Abs. 4 GEG stets strikt einzuhalten, ohne dass es die Möglichkeit eines Antrags auf Befreiung nach § 102 GEG gibt.

► **Könnte der Gesetzgeber gegebenenfalls zukünftig auch Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz von Bestandsgebäuden stellen?**

Ja. Er ist dabei an den Verhältnismäßigkeitsgrundsatz sowie bei Differenzierungen an das Gleichheitsgebot gebunden.

6.4 Zentrale Ergebnisse

Das Wirtschaftlichkeitsgebot nimmt im Gebäudeenergierecht eine doppelte Rolle ein. Zum einen hat es die Funktion einer *Orientierungsleitlinie*, die sich der Gesetzgeber in § 5 GEG für die Festsetzung von Mindestanforderungen selbst auferlegt hat. Soweit das GEG Anforderungen festgelegt hat, kann wegen § 5 GEG davon ausgegangen werden, dass diese grundsätzlich mit dem Wirtschaftlichkeitsgebot zu vereinbaren sind, also eingehalten werden müssen (eingehend 2.2.1). Zum anderen kann das Wirtschaftlichkeitsgebot im Einzelfall einen *Beurteilungsmaßstab* bilden, sofern nach § 102 GEG eine Befreiung von Anforderungen des Gesetzes beantragt worden ist. In dieser Funktion kommt es aber nur zur Anwendung, wenn der jeweilige Einzelfall durch „besondere Umstände“ gekennzeichnet ist, die sich von den bei der Festlegung der gesetzlichen Anforderungen zugrunde gelegten typischen Fallgestaltungen erkennbar abheben, etwa durch eine schwierige Topographie oder einen ungewöhnlichen Schnitt des Grundstücks. Solche besonderen Fallgestaltungen dürften allenfalls sehr selten vorkommen (eingehend zum Ganzen oben, Kapitel 6.1.2.2).

Im Kontext der Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz spiegelt sich diese Doppelrolle ebenfalls wider, jedoch in modifizierter Weise. Hier greift zum einen im Hintergrund wiederum § 5 GEG. Auf der Ebene der Einzelfallanwendung treten jedoch die Bestimmungen des § 14 GEG an die Stelle von § 102 GEG. Die Befreiungsvorschrift des § 102 GEG kommt hier nicht zur Anwendung. Aus § 14 GEG ergibt sich unter Berücksichtigung von § 5 GEG, dass die in § 14 Abs. 2 GEG geforderten baulichen Anforderungen zur Minderung des Sonneneintrags grundsätzlich als wirtschaftlich vertretbar anzusehen sind, also an sich strikt eingehalten werden müssen (siehe Kapitel 6.2.3). Jedoch macht § 14 Abs. 4 GEG hiervon eine unmittelbar im Gesetz geregelte Ausnahme, aus der sich ergibt, dass die Anforderungen des § 14 Abs. 2 GEG im Falle des Einsatzes von Kühlungsanlagen nur eingehalten werden müssen, soweit sich die (zusätzlichen) baulichen Maßnahmen ihrerseits trotz des Einsatzes von Kühlungsanlagen als wirtschaftlich darstellen. Dafür bedarf es anders als bei § 102 GEG keines Befreiungsantrags. Diese Regelungssystematik besteht seit der EnEV 2013 und wurde durch § 14 GEG übernommen. Sie führt praktisch dazu, dass der Vorrang baulicher Maßnahmen vor dem Einsatz von Klimaanlage in sein Gegenteil verkehrt worden ist (siehe zum Ganzen, Kapitel 6.2.2).

Inhaltlich wirft das Wirtschaftlichkeitsgebot zahlreiche Interpretationsfragen auf, da in ihm mit einer Reihe von allgemein gehaltenen Rechtsbegriffen operiert wird. Hierzu sei auf die detaillierten Ausführungen im Haupttext verwiesen (siehe im Einzelnen oben, Kapitel 6.1.2.1.2).

Verfassungsrechtlich bedarf es eines Wirtschaftlichkeitsgebots nicht. Der Gesetzgeber besitzt einen weitgehenden Beurteilungs- und Gestaltungsspielraum für die Festlegung von energetischen Anforderungen an Gebäude, der nur durch das Verhältnismäßigkeitsgebot und (bei Differenzierungen) durch das Gleichheitsgebot begrenzt ist. Die Bauherren bzw. Gebäudeeigentümer können verfassungsrechtlich nicht beanspruchen, dass der Staat nur Anforderungen festlegt, die sich als wirtschaftlich vorteilhaft oder belastungsfrei darstellen. Im Hinblick speziell auf den vom BVerfG beschriebenen Verfassungsauftrag zu einem wirksamen Klimaschutz bestehen sogar schwerwiegende verfassungsrechtliche Bedenken gegen das Wirtschaftlichkeitsgebot, weil es die individuellen Verwertungsinteressen der Eigentümer strikt über den herausragenden öffentlichen Belang des Klimaschutzes stellen (siehe Kapitel 6.1.3.1).

EU-rechtlich bedarf es eines Wirtschaftlichkeitsgebots ebenfalls nicht (siehe Kapitel 6.1.3.2).

7 Methodenvergleich

7.1 Vorgehensweise

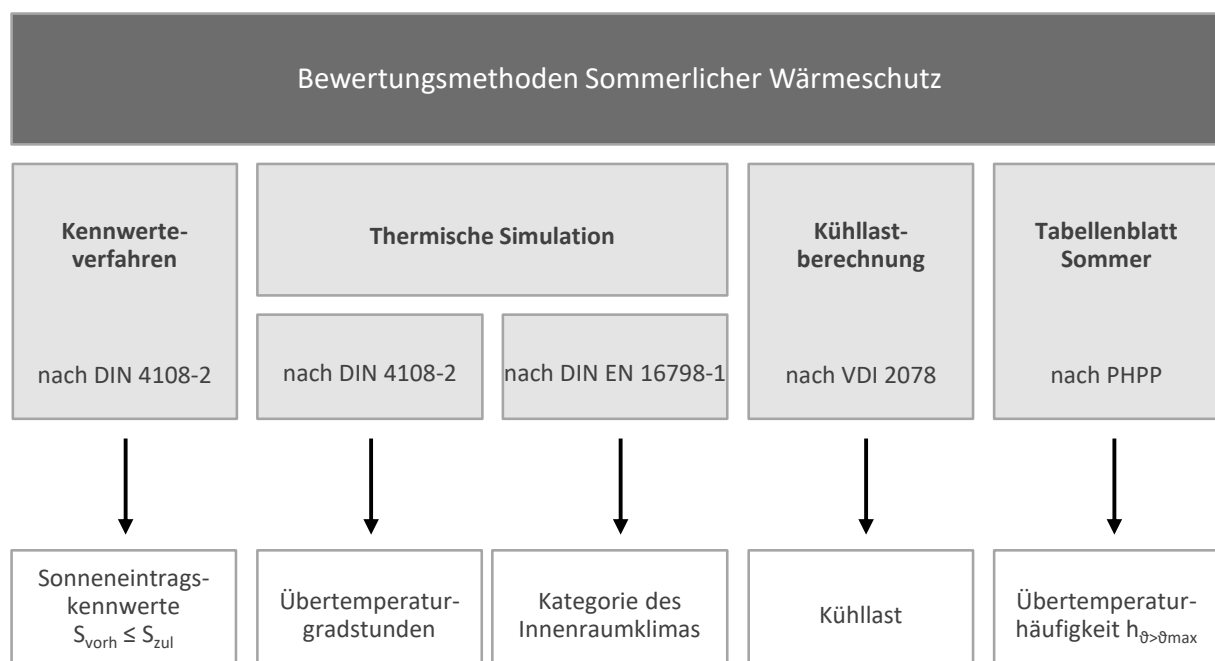
Basierend auf Berechnungen ausgewählter Varianten mit unterschiedlichen Bewertungsmethoden sollen beim Methodenvergleich die jeweiligen Schwächen und Stärken herausgearbeitet werden. Ziel des Methodenvergleichs ist eine qualitative Einschätzung von

- ▶ Aussagekraft der Ergebnisgröße
- ▶ Komplexität des Berechnungsmodus
- ▶ Arbeitsaufwand

Ausgewählte Bewertungsmethoden

Abbildung 110 zeigt einen grafischen Überblick über Methoden, die für eine Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes in Frage kommen, und gibt die jeweilig auszuwertende Kenngröße an. Alle aufgeführten Methoden werden in den Methodenvergleich aufgenommen.

Abbildung 110: Methodenvergleich - Bewertungsmethoden und zugehörige Kenngrößen



Quelle: eigene Darstellung, IBH

In Tabelle 47 findet sich eine Übersicht über die nachfolgend verwendeten Kürzel der Bewertungsmethoden. Zusätzlich ist angegeben, wo die Methode Anwendung findet und in welchem Grundlagen-Kapitel, die Methode detailliert beschrieben ist.

Tabelle 47: Untersuchte Bewertungsmethoden

Methode	Kürzel	Anwendung	Beschrieben in
Sonneneintragskennwerteverfahren nach DIN 4108-2	DIN-KWV	nach GEG zulässiges Nachweisverfahren	Kapitel 3.4.1.1
Thermische Simulation nach DIN 4108-2	DIN-SIM	nach GEG zulässiges Nachweisverfahren	Kapitel 3.4.1.2
Komfortbewertung nach DIN EN 16798-1	KOMF	DGNB ⁹⁸ - bzw. BNB-Zertifizierung ⁹⁹	Kapitel 3.4.2
Komfortbewertung nach NA DIN EN 16798-1	KOMF-NA	(im Rahmen dieser Studie)	Kapitel 3.4.2
Sommerfall nach PHPP	PH	Passivhaus Zertifizierung	Kapitel 3.4.4
Kühllastberechnung	KÜL	Bestimmung der Kühllast für die Auslegung von Kühlflächen, Kältemaschinen, etc.	Kapitel 3.4.3

Ausgewählte Varianten

Die Methoden werden auf ausgewählte Varianten der Parameterstudie (vgl. Kapitel 4.4) angewendet. Abbildung 111 gibt eine Übersicht über die für den Methodenvergleich ausgewählten Varianten.

Abbildung 111: Methodenvergleich - Variantenauswahl

Methode	Klimadaten (TRY)	Standort	Orientierung	Maßnahmen -pakete	Energie-standard		Raum	Bauweise	Fassade
DIN-KWV	(TRY2010)	Mannheim (Vorort)	West	MIN	Neubau (GEG)	Wohnen	Wohnzimmer	schwer	Lochfassade
DIN-SIM	TRY2010						Eck-Wohn-zimmer		
KOMF	TRY2010					Potsdam (Vorort)	STD	Büro	2-P-Büroraum
KOMF-NA	TRY2010	Büro	2-P-Büroraum	Lochfassade Fensterband					
KÜL	Kühllastzonen / TRY2010		3-P-Büro-Eckraum	Vollverglasung					
(PH)*	PHPP-Klima für R, P, M	Rostock (Vorort)	Süd-West	MAX		Schule	Klassenzimmer	mittel	Lochfassade Fensterband Vollverglasung

* Berechnung ist gebäudebezogen

Abschließend wird der Vergleich noch um zusätzliche Untersuchungen ergänzt zu:

- Orientierung und Verschattung
- Urbaner Wärmeinsel-Effekt

⁹⁸ Für mittlere Punktzahl erfolgt eine Auswertung, ob Kategorie II gemäß DIN EN 16798-1:2022-03 mit zulässiger Abweichung 5 % der Nutzungszeit eingehalten ist. (DGNB 2018b), (DGNB 2021)

⁹⁹ Für Qualitätsniveau 3: Auswertung, ob Kategorie II gemäß DIN EN 15251 (mittlerweile ersetzt durch DIN EN 16798-1) mit zulässiger Abweichung 5 % der Nutzungszeit eingehalten ist. (BMUB 2017)

► Passive Kühlung

Hinweise zum Einsatzbereich der Methoden und zur Vorgehensweise bei der Berechnung

DIN-KWV:

- Gängigstes Verfahren für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes
- Eine Berechnung könnte händisch ohne Software-Unterstützung erfolgen. Im Rahmen dieses Projektes wird ein Excel-Tool verwendet.
- Die Berechnung erfolgt nach Kapitel 8.3 der DIN 4108-2:2013-02. Die in Tabelle 8 der DIN 4108-2 angegebenen anteiligen Sonneneintragskennwerte wurden in Abstimmung mit den für das DIN-SIM-Verfahren durchgeführten Simulationen festgelegt (Maas, Schlitzberger 2013), so dass als zugrunde gelegte Klimadaten die TRY2010 angesehen werden können. Die unterschiedlichen Sommerklimaregionen werden über die zu wählenden anteiligen Sonneneintragskennwerte berücksichtigt.
- Ergebnisgrößen sind der vorhandenen Sonneneintragskennwert S_{vorh} und der zulässige Sonneneintragskennwert S_{zul} . Um das Ergebnis leicht verständlich und schnell einschätzbar zu machen, wird für den Vergleich die prozentuale Unter- bzw. Überschreitung von S_{vorh} bezogen auf S_{zul} angegeben.

DIN-SIM:

- Zugelassenes Verfahren des Nachweises des sommerlichen Wärmeschutzes, welches Anwendung findet, wenn eine Berechnung nach DIN-KWV ausgeschlossen ist oder eine genauere Berechnung erforderlich oder gewünscht wird.
- Als Simulationssoftware kann Software für die thermische Gebäudesimulation (z.B. TRN-SYS, IDA ICE) oder auch für gängige Bauphysik-Berechnungsprogramme verfügbare Zusatzmodule für die Simulation des sommerlichen Wärmeschutzes eingesetzt werden.
- Die Berechnung erfolgt nach Kapitel 8.4 der DIN 4108-2:2013-02. Ausgewertet wird die Kenngröße der Übertemperaturgradstunden bezogen auf die jeweilige Bezugstemperatur in Abhängigkeit der Sommerklimaregion (25 °C für Rostock, 26 °C für Potsdam und 27 °C für Mannheim).

KOMF:

- Das Verfahren der Bestimmung von Überschreitungshäufigkeiten bezogen auf eine „Komfortkategorie“ nach DIN EN 16798-1 (ehemals DIN EN 15251) ist ein gängiges Verfahren in der bauphysikalischen Beratung. In der Regel werden auf diese Weise mögliche Varianten mit möglichst exakt abgebildeten Randbedingungen und ortsgenauen Klimadaten (DWD 2020b) als Entscheidungsgrundlage miteinander verglichen. Aber auch bei der für eine DGNB- bzw. BNB-Zertifizierung erforderlichen Komfort-Bewertung kann dieses Verfahren angewendet werden.
- In einem ersten Schritt werden „freie“ Simulationen mit an die jeweilige Situation angepassten Randbedingungen durchgeführt. Als Software werden Simulationsprogramme für die thermische Gebäudesimulation eingesetzt. Die Auswertung kann dann beispielsweise über eine Software integrierte Auswertung oder ein Excel-Tool erfolgen.
- Bei ungekühlten Gebäuden gilt das adaptive Komfortmodell. Die Adaption der je nach Komfortkategorie einzuhaltenden Grenztemperatur ist Abhängigkeit von dem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur.

- Für die Komfort-Auswertung in dieser Studie werden die Simulationen der Parameterstudie verwendet und über ein Tool die Überschreitungshäufigkeiten über Kategorie II nach dem adaptiven Komfortmodell erfasst.
- Als Ergebnisgröße dient die Überschreitungshäufigkeit, in der die Kategorie II nicht eingehalten wird. Analog DGNB-Vorgabe bzw. Anhang G der mittlerweile zurückgezogenen DIN EN 15251 wird eine Überschreitungshäufigkeit von 5 % als für das Einhalten der Kategorie II als zulässig festgelegt. Eine Auswertung nach anderen Kategorien erfolgt nicht.
- Wichtig ist zu beachten, dass die mit den Klimadaten des TRY2010 simulierten Varianten verwendet werden, weil die Verfahren nach DIN 4108-2 darauf Bezug nehmen, mit denen das Verfahren auch quantitativ verglichen werden soll. Für eine DGNB-Zertifizierung müssten beispielsweise die TRY2015 sommerfokussiert zugrunde gelegt werden.

KOMF-NA:

- Um einen Bezug zur Parameterstudie zu ermöglichen, erfolgt zusätzlich eine Komfortbewertung für Komfort-Kategorie II nach dem im Nationalen Anhang beschriebenen Verfahren der DIN EN 16798-1.
- Als Ergebnisgröße dienen Übertemperaturgradstunden mit der zulässigen Sollwertabweichung nach Nationalem Anhang, dass die Kategorie II noch erreicht ist, wenn in weniger als 1 % der Nutzungszeit der Sollwertbereich um maximal 2 K überschritten wird. (vgl. Kapitel 3.5.3).
- Zusätzlich darf nach Nationalem Anhang die Überschreitung zu keinem Zeitpunkt während der Nutzungszeit mehr als 2 K betragen. Dies wird im Rahmen des Methodenvergleichs nicht ausgewertet und nicht bewertet!
- Die Auswertung erfolgt für die Klimadaten des TRY2010.

KÜL:

- Das Verfahren dient u.a. der Auslegung von Kühlflächen und Kältemaschinen. Im Gegensatz zur Heizlastberechnung sind keine Raumtemperaturgrenzen (z.B. mindestens 20° C) einzuhalten. Es kann projektspezifisch festgelegt werden, ob eine bestimmte Obergrenze immer (z.B. 26° C) unterschritten bleiben muss, oder ob bzw. wieviel diese überschritten werden darf. Bei gekühlten Gebäuden darf das Verfahren auch für die bei einer BNB- oder DGNB-Zertifizierung erforderliche Bewertung des Thermischen Komforts angewendet werden. Bei den Klimadaten wird auf die Kühllastzonen nach VDI 2078 Bezug genommen, die sich wiederum auf die TRY 2010 beziehen. Die Bestimmung der Kühllast erfolgt nach VDI 2078:2015-06. Das simulative Verfahren zur Kühllast-Bestimmung erfolgt in der Regel mit entsprechender Auslegungssoftware.
- Da eine erneute Eingabe der Raummodelle inklusive Varianten in eine Auslegungssoftware zu aufwendig gewesen wäre, wird die Auswertung der Kühllast auf Basis einer thermischen Simulation mit idealer Kühlung durchgeführt. Bei der thermischen Simulation der maximalen Kühllasten ergeben sich auf diese Weise allerdings sehr hohe Kühllastspitzen. Daher wurden die zugehörigen Kühllast-Dauerlinien analysiert: in allen Simulationen gab es für wenige Stunden Spitzenwerte. Aus diesem Grund wurde nicht der Maximalwert aus der thermischen Simulation genommen, sondern der höchste Wert für die Kühllast, der mehr als 5 Stunden vorkommt. Auf diese Weise war es möglich, die unplausiblen Spitzen zu eliminieren.

- Die Vorgehensweise wurde am Beispiel des Büroraums mit Fensterband getestet. Tabelle 48 zeigt den Vergleich mit einer Kühllastberechnung nach VDI 2078 mit der mh-Software¹⁰⁰.

Tabelle 48: Vergleich der spezifischen Kühllast nach VDI 2078 und angewandeter simulativer Methodik

	Kühllast nach VDI 2078	Kühllast über thermische Simulation
Rostock (MIN-Maßnahmenpaket)	34,8 W/m ²	37,7 W/m ²
Potsdam (MIN-Maßnahmenpaket)	45,8 W/m ²	45,9 W/m ²
Mannheim (MIN-Maßnahmenpaket)	52,9 W/m ²	55,6 W/m ²
Rostock (STD-Maßnahmenpaket)	29,4 W/m ²	30,0 W/m ²
Potsdam (STD-Maßnahmenpaket)	41,0 W/m ²	38,2 W/m ²
Mannheim (STD-Maßnahmenpaket)	46,1 W/m ²	40,1 W/m ²

- Für den Anwendungsfall des Methodenvergleichs zeigt der Vergleich eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

PH:

- Das Verfahren dient der Planung von Passivhäusern und fordert, dass die "Häufigkeit über 25° C" 10 % nicht überschreitet. Die betrachtete Kenngröße ist demnach "Häufigkeit über 25° C".
- Verwendet wird das Passivhaus-Projektierungspaket 2015 (Version 9).
- Als Klimadaten werden die für die Städte Rostock, Potsdam und Mannheim im PHPP im Blatt „Klima“ hinterlegten Werte verwendet.
- Das Verfahren dient der Bilanzierung ganzer Gebäude und nicht wie hier durchgeführt einer raumweisen Betrachtung. Dennoch wurden für eine Einschätzung des Verfahrens die Wohnzimmer-Varianten ins PHPP eingegeben und diese Ergebnisse für die Häufigkeiten der Temperaturüberschreitung beim Methodenvergleich aufgenommen.

Wichtiger Hinweis: Ergebnis der Analyse der Testreferenzjahre in Kapitel 3.5.3 ist, dass die TRY2010 im Vergleich zu den Wetterdaten der letzten Jahre als nicht mehr aktuell eingestuft werden kann. Bei dem nachfolgend vorgestellten Methodenvergleich geht es um einen Vergleich der Methoden. Aus diesem Grund wird analog den für den Nachweis zugelassenen Verfahren DIN-KWV und DIN-SIM auch die Komfort-Bewertung mit den TRY2010 durchgeführt. Aussagen über sommerlichen Komfort bei derzeitigem und zukünftigem Klima lassen sich aus dem Methodenvergleich daher nicht ableiten.

¹⁰⁰ Für nähere Informationen zur Software s. www.mh-software.de

7.2 Ergebnisse

Da bei den Bewertungsmethoden unterschiedliche Kenngrößen ausgewertet werden, können die Ergebnisse nicht direkt miteinander verglichen werden. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse tabellarisch ausgewertet: Grün markiert sind Werte, wenn diese nach dem jeweiligen Verfahren eingehalten sind. Mittels einer weiß-transparenten Schattierung und durch die Fußnote beim PHPP-Verfahren soll aufmerksam gemacht werden, dass das Verfahren für die Bilanzierung ganzer Gebäude und nicht, wie hier durchgeführt, für eine raumweise Betrachtung konzipiert ist. Da es bei der Kühllast keinen Grenzwert gibt, entfällt hier die farbliche Markierung.

Tabelle 49 zeigt die Ergebnisse für das nach Westen orientierte Wohnzimmer (f_{WG} 21 %).

Tabelle 49: Methodenvergleich - Ergebnisse Wohngebäude (Wohnzimmer West)

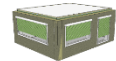


Verfahren	MIN			STD			MAX		
	Rostock	Potsdam	Mannheim	Rostock	Potsdam	Mannheim	Rostock	Potsdam	Mannheim
Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zu} in %	-2%	7%	19%	-71%	-68%	-64%	-83%	-82%	-81%
Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 1.200)	640	691	1.043	9	6	4	2	1	0
Thermische Simulation - Auswertung nach DIN 16798-1 (IEQ II) - Überschreitungshäufigkeit (Anford. ≤ 5 %)	1%	2%	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Thermische Simulation - Auswertung ÜTGS nach NA in Kh/a (Anford. $< 1\%$ der Nutzungszeit um $2K \pm 175$ Kh/a)	884	1.790	3.255	38	144	716	0	8	70
PHPP – Sommerfall* Übertemperaturhäufigkeit (Anfordg. ≤ 10 %)	1%	2%	5%	0%	0%	1%	0%	0%	0%
Kühllast-Simulation in W/m ²	45	49	50	15	18	21	0	8	13

*PHPP ist ein Bilanzierungsprogramm für Passivhäuser und nicht geeignet für die Berechnung einzelner Räume und nicht für Gebäude im GEG-Standard.
Obwohl für den gewählten Musterraum (GEG-Dämmstandard/ohne Lüftungsanlage) nicht geeignet, wurde dieser für Testzwecke nach PHPP bilanziert.

Mit allen Verfahren können die Anforderungswerte mit dem maximalen Maßnahmenpaket eingehalten werden, mit dem Standard-Maßnahmenpaket mit einer Ausnahme für Mannheim bei der Auswertung nach NA auch. Beim minimalem Maßnahmenpaket gelingt dies nur für die DIN-Simulation und die Komfortauswertung nach DIN EN 16798-1 und beim Kennwerteverfahren für Rostock. Die PHPP-Auswertung, die nicht für eine raumweise Betrachtung geeignet ist, zeigt ähnliche Übertemperaturhäufigkeiten wie bei der Auswertung nach DIN EN 16798-1. Interessant ist auch ein Blick auf die Kühllast, auch hier ist der Einfluss der Maßnahmenpakete deutlich erkennbar und liegt bei bis zu 50 W/m².

In Tabelle 50 sind die entsprechenden Ergebnisse für das nach Süd-Westen orientierte Eck-Wohnzimmer (f_{WG} 39 %) angegeben.

Tabelle 50: Methodenvergleich - Ergebnisse Wohngebäude (Eck-Wohnzimmer, Süd-West)




Verfahren	MIN			STD			MAX		
	Rostock	Potsdam	Mannheim	Rostock	Potsdam	Mannheim	Rostock	Potsdam	Mannheim
Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) / Überschreitung (+) von S_{zw} in %	150%	186%	234%	-25%	-14%	0,3%	-61%	-58%	-54%
Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 1.200)	3.432	3.455	4.278	73	90	126	72	66	0
Thermische Simulation - Auswertung nach DIN 16798-1 (IEQ II) - Überschreitungshäufigkeit (Anford. ≤ 5 %)	9%	14%	17%	0%	0%	2%	0%	0%	0%
Thermische Simulation - Auswertung ÜTGS nach NA in Kh/a (Anford. $< 1\%$ der Nutzungszeit um $2K \pm 175$ Kh/a)	4.474	6.189	8.599	261	714	1.972	43	131	531
PHPP – Sommerfall* Übertemperaturhäufigkeit (Anford. ≤ 10 %)	8%	8%	14%	2%	3%	8%	0%	1%	3%
Kühllast-Simulation in W/m^2	65	71	73	26	29	32	14	21	24

*PHPP ist ein Bilanzierungsprogramm für Passivhäuser und nicht geeignet für die Berechnung einzelner Räume und nicht für Gebäude im GEG-Standard.
Obwohl für den gewählten Musterraum (GEG-Dämmstandard/ohne Lüftungsanlage) nicht geeignet, wurde dieser für Testzwecke nach PHPP bilanziert.

Im Vergleich zu Tabelle 18 zeigt sich, dass durch den höheren Fensterflächenanteil das Einhalten nur noch sicher mit dem MAX-Maßnahmenpaket gelingt – Ausnahme bildet wieder die Auswertung nach NA für Mannheim. Der Nachweis nach DIN 4108-2 gelingt beim STD-Maßnahmenpaket für Mannheim nur noch mit einer thermischen Simulation, beim MIN-Maßnahmenpaket gar nicht mehr. Das Komfortbewertungsverfahren nach DIN EN 16798-1 ist für dieselben Varianten eingehalten wie bei der Thermischen Simulation nach DIN 4108-2. Nach Nationalem Anhang erfüllen lediglich zwei der MAX-Varianten den Anforderungswert. Bei der Bilanzierung nach PHPP sind alle Varianten mit Ausnahme des MIN-Maßnahmenpakets in Mannheim eingehalten. Bei der Kühllast gibt es mit MIN-Maßnahmenpaket hohe Werte zwischen 65 und 73 W/m^2 .

Die Auswertung für den 2-Personen-Bürraum für Lochfassade, Fensterband und Vollverglasung ist in Tabelle 51 zu sehen.

Tabelle 51: Methodenvergleich - Ergebnisse Bürogebäude (2-Personen-Bürraum, West)



	Verfahren	MIN			STD			MAX		
		Rostock	Potsdam	Mannheim	Rostock	Potsdam	Mannheim	Rostock	Potsdam	Mannheim
 Lochfassade	Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zu} in %	58%	127%	360%	-60%	-53%	-43%	-82%	-80%	-78%
	Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 500)	234	416	625	48	87	86	4	5	0
	Thermische Simulation - Auswertung nach DIN 16798-1 (IEQ II) - Überschreitungshäufigkeit (Anford. ≤ 5 %)	1%	5%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Thermische Simulation - Auswertung ÜTGS nach NA in Kh/a (Anford. $< 1\%$ der Nutzungszeit um $2K \pm 57$ Kh/a)	528	1.165	1.866	4	29	152	0	3	14
	Kühllast-Simulation in W/m^2	28	36	42	21	29	30	8	14	15
 Fensterband	Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zu} in %	1215%	neg. Szul	neg. Szul	-15%	3%	35%	-65%	-61%	-56%
	Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 500)	760	1.070	1.311	178	294	344	60	60	32
	Thermische Simulation - Auswertung nach DIN 16798-1 (IEQ II) - Überschreitungshäufigkeit (Anford. ≤ 5 %)	6%	13%	18%	1%	3%	4%	0%	0%	0%
	Thermische Simulation - Auswertung ÜTGS nach NA in Kh/a (Anford. $< 1\%$ der Nutzungszeit um $2K \pm 57$ Kh/a)	1.418	2.106	2.942	94	267	593	9	21	113
	Kühllast-Simulation in W/m^2	38	46	56	30	38	40	14	20	23
 Vollverglasung	Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zu} in %	neg. Szul	neg. Szul	neg. Szul	112%	194%	410%	-31%	-21%	-7%
	Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 500)	1.710	2.051	2.334	612	835	923	263	239	190
	Thermische Simulation - Auswertung nach DIN 16798-1 (IEQ II) - Überschreitungshäufigkeit (Anford. ≤ 5 %)	17%	22%	27%	5%	9%	11%	1%	3%	3%
	Thermische Simulation - Auswertung ÜTGS nach NA in Kh/a (Anford. $< 1\%$ der Nutzungszeit um $2K \pm 57$ Kh/a)	2.713	3.379	4.386	700	1.077	1.641	160	284	544
	Kühllast-Simulation in W/m^2	53	60	72	46	53	58	26	32	39

Die Unterschiede durch den zunehmenden Fensterflächenanteil von Lochfassade (f_{WG} 20 %), über das Fensterband (f_{WG} 34 %) bis zur Vollverglasung (f_{WG} 54 %) sind deutlich an der abnehmenden Anzahl eingehaltener (grün markierter) Varianten ersichtlich. Mit dem MIN-Maßnahmenpaket wird beim DIN-KWV für Fassaden mit Fensterband teilweise und bei allen mit Vollverglasung ein negativer Wert für den höchstens zulässigen Sonneneintragskennwert errechnet, was in roter Schrift als „neg. Szul“ gekennzeichnet ist.

Tendenziell ist es für den Standort Mannheim (und teilweise auch Potsdam) schwieriger die Anforderungen einzuhalten als für den Standort Rostock. Sogar mit Vollverglasung kann bei den beiden zugelassenen Verfahren der Nachweis mit dem MAX-Maßnahmenpaket erbracht werden. Bei den Komfortbewertungsverfahren ergeben sich große Unterschiede beim MAX-Maßnahmenpaket: nach DIN EN 16798-1 erreichen alle drei Standorte Kategorie II, nach Nationalem Anhang keiner. Bei der Kühllast ergeben sich Werte zwischen 8 und 72 W/m^2 .

Tabelle 52 zeigt die Ergebnisse für den 3-Personen-Büro-Eckraum mit Süd-West-Ausrichtung.




Tabelle 52: Methodenvergleich - Ergebnisse Bürogebäude (Eck - 3-Personen-Büroraum, Süd-West)

	Verfahren	MIN			STD			MAX		
		Rostock	Potsdam	Mannheim	Rostock	Potsdam	Mannheim	Rostock	Potsdam	Mannheim
 Lochfassade	Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zul} in %	448%	1764%	neg. Szul	-30%	-16%	7%	-70%	-67%	-63%
	Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 500)	275	422	634	54	90	107	6	6	0
	Thermische Simulation - Auswertung nach DIN 16798-1 (IEQ II) - Überschreitungshäufigkeit (Anford. ≤ 5 %)	1%	4%	8%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Thermische Simulation - Auswertung ÜTGS nach NA in Kh/a (Anford. $< 1\%$ der Nutzungszeit um $2K \pm 57$ Kh/a)	503	977	1.677	4	34	223	0	2	17
	Kühllast-Simulation in W/m^2	39	54	61	27	43	43	8	18	21
 Fensterband	Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zul} in %	neg. Szul	neg. Szul	neg. Szul	219%	498%	12467%	-24%	-11%	11%
	Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 500)	1.415	1.697	1.960	550	744	844	225	206	183
	Thermische Simulation - Auswertung nach DIN 16798-1 (IEQ II) - Überschreitungshäufigkeit (Anford. ≤ 5 %)	13%	19%	24%	4%	8%	11%	1%	3%	3%
	Thermische Simulation - Auswertung ÜTGS nach NA in Kh/a (Anford. $< 1\%$ der Nutzungszeit um $2K \pm 57$ Kh/a)	2.265	2.813	3.819	634	1.017	1.627	132	254	551
	Kühllast-Simulation in W/m^2	70	81	99	61	76	84	36	45	53
 Vollverglasung	Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zul} in %	neg. Szul	neg. Szul	neg. Szul	neg. Szul	neg. Szul	neg. Szul	147%	280%	830%
	Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 500)	2.560	2.841	3.160	1.578	1.855	2.003	756	736	611
	Thermische Simulation - Auswertung nach DIN 16798-1 (IEQ II) - Überschreitungshäufigkeit (Anford. ≤ 5 %)	23%	27%	32%	15%	21%	24%	6%	11%	14%
	Thermische Simulation - Auswertung ÜTGS nach NA in Kh/a (Anford. $< 1\%$ der Nutzungszeit um $2K \pm 57$ Kh/a)	3.775	4.393	5.554	2.099	2.653	3.535	887	1.225	1.712
	Kühllast-Simulation in W/m^2	99	109	122	93	107	117	62	73	83

Da sich - bei gleichbleibendem fassadenbezogenen Fensterflächenanteil - in der Ecksituation der grundflächenbezogene Fensterflächenanteil nochmal deutlich erhöht (f_{WG} 30 %, 67 % bzw. 104 %), hat die Anzahl der eingehaltenen Varianten im Vergleich zu Tabelle 51 deutlich abgenommen. Mit Vollverglasung ist der Nachweis nicht möglich. Auch bei der DIN 16798-Komfortbewertung übersteigen alle Varianten die zulässigen 5 % Überschreitung - zum Teil deutlich. Trotz adaptiven Komfortmodell, bei dem das Komfortband vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur abhängt, weist der Standort Mannheim die höchsten Überschreitungen, Potsdam die zweithöchsten auf. Nach NA hält keine Variante mit Fensterband und Vollverglasung Kategorie II ein. Bei der Kühllast gibt es bei der Vollverglasung bei MIN- und auch bei STD-Maßnahmenpaket Werte über $100 W/m^2$

Schließlich werden in Tabelle 53 noch die Ergebnisse des Klassenzimmers für Lochfassade (f_{WG} 13 %), Fensterband (f_{WG} 28 %) und Vollverglasung (f_{WG} 38 %) gezeigt.

Tabelle 53: Methodenvergleich - Ergebnisse Schule (Klassenzimmer, West)

	Verfahren	MIN			STD			MAX		
		Rostock	Potsdam	Mannheim	Rostock	Potsdam	Mannheim	Rostock	Potsdam	Mannheim
 Lochfassade	Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zul} in %	-41%	-26%	-1%	-80%	-79%	-76%	-91%	-91%	-90%
	Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 500)	93	84	107	0	0	0	0	0	0
	Thermische Simulation - Auswertung nach DIN 16798-1 (IEQ II) - Überschreitungshäufigkeit (Anford. ≤ 5 %)	2,3%	4,3%	6,6%	1,1%	1,4%	2,5%	0,2%	0,1%	0,4%
	Thermische Simulation - Auswertung ÜTGS nach NA in Kh/a (Anford. $< 1\%$ der Nutzungszeit um $2K \pm 24$ Kh/a)	209	352	559	20	42	84	0	1	8
	Kühllast-Simulation in W/m^2	62	68	78	43	44	48	13	21	29
 Fensterband	Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zul} in %	133%	278%	893%	-51%	-46%	-39%	-80%	-79%	-77%
	Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 500)	382	388	444	34	27	21	7	4	1
	Thermische Simulation - Auswertung nach DIN 16798-1 (IEQ II) - Überschreitungshäufigkeit (Anford. ≤ 5 %)	5,4%	4,3%	6,6%	1,1%	1,4%	2,5%	0,2%	0,1%	0,4%
	Thermische Simulation - Auswertung ÜTGS nach NA in Kh/a (Anford. $< 1\%$ der Nutzungszeit um $2K \pm 24$ Kh/a)	480	653	915	61	113	191	5	17	37
	Kühllast-Simulation in W/m^2	80	82	85	53	54	59	22	30	38
 Vollverglasung	Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zul} in %	786%	neg. Szul	neg. Szul	-23%	-13%	0%	-70%	-68%	-66%
	Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 500)	620	648	734	103	55	51	27	26	21
	Thermische Simulation - Auswertung nach DIN 16798-1 (IEQ II) - Überschreitungshäufigkeit (Anford. ≤ 5 %)	8,4%	13,7%	15,7%	2,5%	4,8%	6,3%	0,8%	1,3%	2,2%
	Thermische Simulation - Auswertung ÜTGS nach NA in Kh/a (Anford. $< 1\%$ der Nutzungszeit um $2K \pm 24$ Kh/a)	658	826	1.113	119	187	293	19	46	81
	Kühllast-Simulation in W/m^2	83	85	87	60	61	67	28	38	44

Durch die großen Klassenräume sind bei diesem Nutzungstyp die grundflächenbezogenen Fensterflächenanteile am geringsten, gleichzeitig sind die inneren Wärmelasten durch die hohe Personenanzahl am höchsten. Die hohe Personenanzahl bedingt auch den höchsten Luftwechsel. Die hohen Lasten und der hohe Luftwechsel werden allerdings nicht bei den beiden Verfahren nach DIN 4108-2 berücksichtigt, weil bei diesen Kennwerte bzw. Randbedingungen fest vorgegeben sind. Anders ist dies bei den Komfort-Bewertungen. Hier werden die Randbedingungen möglichst exakt abgebildet. Eine detaillierte Analyse der den Komfort-Bewertungen zugrunde liegenden thermischen Simulationen zeigt sehr hohe interne Lasten, die selbst bei der Vollverglasung die Wärmeeinträge im Vergleich zu den solaren Einträgen dominieren. Durch den hohen Luftwechsel können diese hohen Personen-Wärmelasten aber meist gut abgeführt werden. Dies erklärt, warum die Methoden auch beim Klassenraum zu ähnlich guter Übereinstimmung führen, wie bei der Wohn- und Büro-Nutzung, bei denen die Nutzungsrandbedingungen mit dem der DIN-Verfahren weitestgehend übereinstimmen. Die Schwäche der beiden DIN 4108-2-Verfahren, dass die Randbedingungen nicht an die Nutzung angepasst werden, kommt beim Klassenzimmer also nicht zum Tragen. Wiederum können bei der NA-Komfortbewertung nur wenige Varianten den Anforderungswert einhalten.

Abschließend werden noch einige Parameter variiert und die Auswirkungen analysiert.

► Orientierung und Verschattung

Untersucht wird der Unterschied zwischen West- und Südausrichtung jeweils ohne und mit einer Verschattung durch einen Balkon am Beispiel des Muster-Wohnzimmers mit MIN-Maßnahmenpaket und Standort Potsdam (vgl. Tabelle 49). Der hierfür in die Simulation eingefügte Balkon ist 1,5 m tief und durchgehend. In Tabelle 54 sind die Ergebnisse für vier Methoden zusammengestellt.

Tabelle 54: Methodenvergleich - Orientierung und VerschattungVariante: Muster-Wohnzimmer (f_{WG} 21%), Standort Potsdam, MIN-Maßnahmenpaket

Verfahren	ohne Balkon		mit Balkon	
	Süd	West	Süd	West
Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zul} in %	7%	7%	-5%	-5%
Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 1.200)	200	691	9	185
Thermische Simulation - Auswertung nach DIN 16798-1 (IEQ II) - Überschreitungshäufigkeit (Anford. ≤ 5 %)	1,0%	2,3%	0,1%	0,4%
Thermische Simulation - Auswertung ÜTGS nach NA in Kh/a (Anford. $< 1\%$ der Nutzungszeit um $2K \pm 175$ Kh/a)	560	1.790	33	589

Beim Vergleich der simulativen Verfahren fällt auf, dass bei Westorientierung die Werte bei mehr als dem doppelten bis dreifachen im Vergleich zur Südorientierung liegen (Fall „ohne Balkon“). Beim Kennwerteverfahren wird Süd, Ost- und Westausrichtung gleich angesetzt, so dass sich für Süd- und Westausrichtung der gleiche Kennwert ergibt.

Gibt es einen Balkon oder eine entsprechende bauliche Verschattung, reduzieren sich die ÜTGS bzw. die Überschreitungshäufigkeit bei den Simulationsmethoden deutlich, und zwar sonnenstandsbedingt deutlich mehr im Süden als im Westen. Durch den ansetzbaren Teilbestrahlungsfaktor auf Basis des Überhangwinkels reduziert sich beim Kennwerteverfahren der vorhandene Sonneneintragskennwert von 0,133 auf 0,117, so dass der sommerliche Wärmeschutznachweis nun eingehalten ist (S_{zul} 0,124). Beim Kennwerteverfahren sinkt der Sonneneintragskennwert jedoch deutlich weniger stark als bei den anderen Methoden.

Gäbe es mehrere verschattungsgebende Kanten (z.B. zusätzlich zum Balkon eine seitliche Verschattung durch einen Gebäudeversprung) gibt es keine im Kennwerteverfahren der DIN 4108-2 beschriebene Vorgehensweise, wie ein zweiter Teilbestrahlungsfaktor berücksichtigt werden könnte. Daher kann in diesem Fall nur einer der beiden Teilbestrahlungsfaktor angesetzt werden, was wiederum den Unterschied zwischen Kennwerteverfahren und Thermischer Simulation vergrößern würde.

► Urbaner Wärmeinsel-Effekt

Nach dem derzeit anzuwendenden Verfahren der DIN 4108-2:2013-02 werden bei den Klimadaten nur die Zuordnung zu einer Sommerklimaregion berücksichtigt, nicht aber, ob es sich um eine städtische Lage handelt oder nicht. Wie Abbildung 68 gezeigt, hat der innerstädtische Wärmeinseleffekt einen hohen, nicht zu vernachlässigenden Einfluss. Beim TRY 2011-Klimadaten-satz wäre grundsätzlich möglich, einem TRY ein Stadtklima aufzuprägen bzw. eine Höhenkorrektur vorzunehmen. Die sich hieraus ergebenden Unterschiede wurden schon in (Maas, Schlitzberger 2013) beschrieben.

► Passive Kühlung

Beim Nachweis nach Kennwerteverfahren der DIN 4108-2 wird für den Einsatz von Nachtlüftung und von passiver Kühlung jeweils ein von der Bauweise abhängiger Zuschlag auf den zulässigen Sonneneintragskennwert gewährt. In Tabelle 55 wird ein Beispiel für den 2-Personen-Bürraum gezeigt und mit dem Nachweisergebnis über Simulation verglichen. Für die passive Kühlung (z.B. über Grundwasser) wird in der Simulation ein ideales Kühlsystem (z.B. ähnlich Kühlsegel) mit 35 W/m^2 und eine Solltemperatur von 24°C angesetzt.

Tabelle 55: Methodenvergleich - Passive KühlungVariante: Muster-Büroraum (3-Achser) (f_{wG} 34 %)

NL: Nachlüftung, PK: Passive Kühlung (z.B. über Grundwasser)

	Verfahren	Potsdam			Mannheim		
		NL	PK	NL+PK	NL	PK	NL+PK
Fensterband	Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zul} in %	3%	192%	-26%	35%	378%	-11%
	Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 1.200)	294	0	0	344	0	0
Vollverglasung	Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 Unter- (-) /Überschreitung (+) von S_{zul} in %	194%	neg. Szul	72%	410%	neg. Szul	129%
	Thermische Simulation nach DIN 4108-2 ÜTGS in Kh/a (Anforderung ≤ 1.200)	835	12	5	923	41	0

Erkennbar wird, dass die Nachlüftung nach dem Kennwerteverfahren deutlich besser gestellt ist als die passive Kühlung. Beim simulativen Nachweis hingegen schneidet die angesetzte passive Kühlung deutlich besser ab. Beim Einsatz einer passiven Kühlung basierend auf einer indirekten Verdunstungskühlung – hier wird beim Kennwerteverfahren nicht unterschieden – würde die Absenkung der ÜTGS weniger stark ausfallen.

Wird in der Praxis nur das Kennwerteverfahren angewendet, könnte dies zum Einsatz einer Nachlüftung kombiniert mit einer passiven Flächenkühlung führen. In dem gezeigten Beispiel wäre jedoch die passive Kühlung allein ausreichend.

Daraus lässt sich ableiten, dass ein differenzierter Ansatz von Passiver Kühlung auch im Kennwerteverfahren sinnvoll wäre.

7.3 Fazit

Der Vergleich der Methoden zeigt einerseits Übereinstimmung bei der Einhaltung von Anforderungswerten, andererseits auch große Unterschiede. Insgesamt zeigt sich eine erstaunlich gute Übereinstimmung zwischen DIN 4108-2-Simulation und Komfortbewertung nach DIN EN 16798-1, insbesondere beim Wohnen und beim Büro. Gewollter Weise ist das Kennwerteverfahren häufiger nicht eingehalten als bei der DIN 4108-2-Simulation, was vor allem das MIN-Maßnahmenpaket betrifft. Einen Fall umgekehrt gibt es nicht. Interessanterweise gibt es beim Klassenraum viel Übereinstimmung zwischen den beiden Nachweismethoden nach DIN 4108-2. Ausnahme bildet hierbei nur der Fall des MIN-Maßnahmenpakets mit Fensterband. Nach Nationalem Anhang der DIN EN 16798-1 sind am wenigsten Fälle eingehalten. Wie schon im Grundlagenkapitel bei den Auswertegrößen kritisiert (vgl. Kapitel 3.5.3), ist der NA-Anforderungswert für ungekühlte Gebäude zu niedrig angesetzt. Da die Bilanzierung des Sommerfalls nach Passivhaus-Projektierungspaket gebäudebezogen erfolgt, wird die Methode nur am Beispiel des Wohnraums mit entsprechendem Hinweis gezeigt. Die Höhe der Kühllast zeigt die gleichen Trends in Abhängigkeit des Maßnahmenpakets, des Standorts und des Fensterflächenanteils wie die Komfortbewertungen.

7.4 Erkenntnisse und Empfehlungen

Abschließend soll basierend auf den Ergebnissen des Methodenvergleichs die Aussagekraft der Ergebnisgrößen, die Komplexität der Berechnungsmodi und der Arbeitsaufwand eingeschätzt werden.

► Aussagekraft der Ergebnisgröße

DIN-KWV

- Die zu errechnenden Größen von zulässigem und vorhandenem Sonneneintragskennwert geben erstmal keinerlei Anhaltspunkte für eine Einschätzung. Erst das Inbezugsetzen der beiden Kennwerte ermöglicht eine Bewertung der Variante. Die Berechnung der prozentualen Unter- bzw. Überschreitung ermöglicht eine erste, grobe Einschätzung. Zu bedenken ist, dass der Nachweis nach DIN 4108-2 für kritische Räume durchzuführen ist. Die Forderung nach einer zusätzlichen Unterschreitung von S_{zul} (z.B. bei der DGNB- bzw. BNB-Zertifizierung) kann u.U. zu übertriebenen und nicht aufeinander abgestimmten Maßnahmen führen.

DIN-SIM

- Übertemperaturgradstunden sind eine für Laien schwer verständliche Größe. Von Fachleuten ist diese jedoch geschätzt, weil in sie nicht nur die Häufigkeit von Überschreitungen, sondern auch die Höhe der Überschreitung einfließt.

KOMF

- Ebenso ist die Komfortbewertung für Laien erstmal schwer zu verstehen, weil viel Hintergrund-Wissen erforderlich ist. Aber auch Laien können sich vor allem beim Vergleich von Varianten unter der Häufigkeit, in der die Kriterien einer Kategorie nicht eingehalten werden, etwas vorstellen. Für Fachleute ist sie ein anerkanntes Werkzeug, um die Qualität eines Raumes einzuschätzen.

KOMF-NA

- s. DIN-SIM

Kül/PH

- Die PHPP-Ergebnisgröße der Übertemperaturhäufigkeit ist im Vergleich zu den anderen Ergebnisgrößen für Laien deutlich besser verständlich. Allerdings ist deren Aussagekraft für die Qualität eines Raumes geringer als z.B. bei Übertemperaturgradstunden. Die Kühllast von Räumen gibt für Fachleute der technischen Gebäudeausrüstung Auskunft, welche Übergabe-Optionen möglich sind und, welche maximale Leistung abrufbar sein muss. Ein einfaches Flächenkühlsystem ist beispielsweise möglich, wenn die Kühllast des Raums unter 50 W/m^2 liegt (erste grobe Einschätzung). Für Laien ist auch diese Größe nicht leicht verständlich, weil der Unterschied zwischen Kühlleistung- und Kühlenergiebedarf oft nicht klar ist. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass für eine Passivhauszertifizierung im Falle eines gekühlten Gebäudes ein begrenzter Kühlbedarf oder eine begrenzte Kühllast (mit zusätzlicher außenlufttemperaturabhängiger Begrenzung des Kühlbedarfs) nachzuweisen ist.

► Komplexität des Berechnungsmodus

DIN-KWV

- Das Verfahren ist leicht zu verstehen, auch weil es nur eine überschaubare Anzahl von Einflussgrößen einbezieht. Eine händische Berechnung für den Nachweis wäre bei diesem Verfahren durchaus möglich. Die Berechnungsmethode und deren Ergebnisse sind durch die Einfachheit in der Regel gut nachvollziehbar. Passive Kühlung wird -egal um

welche Art es sich handelt – mit demselben Zuschlag auf den zulässigen Wert angerechnet. Der Zuschlag ist nur von der Bauweise abhängig. Eine bauliche Verschattung kann nach Kapitel 8.3.2 DIN 4108-2 anhand der Teilbestrahlungsfaktoren F_s (=Abminderungsfaktor infolge Verschattung) nach DIN V 18599-2:2011-12, A.2 berücksichtigt werden. Allerdings kann nur eine verschattungsgebende Kante berücksichtigt werden.

DIN-SIM

- Simulationen können nur mit entsprechend komplexer Software durchgeführt werden. Durch die in der DIN 4108-2 festgelegten Randbedingungen ist die DIN-Simulation deutlich weniger komplex als Simulationen mit freien Randbedingungen.

KOMF

- Die hierfür durchzuführende Simulation mit freien Randbedingungen ist aufwendig und komplex. Auch für die Plausibilisierung und Auswertung ist entsprechendes Fachwissen erforderlich.

KOMF-NA

- s. KOMF

Kül/PH

- Auch die Kühllast-Berechnung nach VDI 2078 basiert auf einem simulativen Verfahren – ist aber dennoch bei Eingabe in die entsprechende Software einfacher als eine thermische Simulation nach DIN 4108-2.
Das PHPP hingegen ist ein Excel-Tool. Beim PHPP ist es möglich, die Berechnung über die hinterlegten Formeln nachzuvollziehen. Erwähnenswert ist der Fokus auf eine möglichst exakte Abbildung der Verschattungssituation über die Eingabe von Abständen und Höhen der verschattungsgebenden Kanten für Verschattung von vorne, von der Seite und von oben.

► Arbeitsaufwand

DIN-KWV

- Der Arbeitsaufwand ist im Vergleich zu den anderen Verfahren gering. Wenn jedoch der eine C_{wirk} -Berechnung erforderlich ist oder viele Verschattungswinkel zu bestimmen sind, erhöht sich der zeitliche Aufwand.

DIN-SIM

- Im Vergleich zu Simulationen mit festzulegenden Randbedingungen ist der Aufwand deutlich reduziert, aber dennoch handelt es sich um eine Simulation mit entsprechend hohem Aufwand.

KOMF

- Der Arbeitsaufwand ist sehr hoch.

KOMF-NA

- Der Arbeitsaufwand ist sehr hoch.

Kül/PH

- Der Arbeitsaufwand ist mittel bis hoch. Bei beiden Verfahren handelt es sich allerdings um Verfahren, die gegebenenfalls sowieso für die Kühlflächen-Auslegung bzw. bei einer Errichtung eines Passivhauses durchgeführt werden müssen.

Tabelle 56 zeigt zusammenfassend die Einschätzung über Aussagekraft der Ergebnisgröße, Komplexität des Berechnungsmodus und den Arbeitsaufwand für die unterschiedlichen Methoden. Da die Auswertung nach Nationalem Anhang der DIN EN 16798-1 (KOMF-NA) in den Methodenvergleich nur aufgenommen wurde, um eine Einschätzung der Werte der Parameterstudie zu ermöglichen, wird dieser in den beiden nachfolgenden Tabellen nicht aufgeführt.

Tabelle 56: Methodenvergleich - Einschätzung

	DIN-KWV	DIN-SIM	KOMF	Kül	PH
Aussagekraft Ergebnisgröße	gering	hoch	hoch	mittel bis hoch	mittel bis hoch
Komplexität des Berechnungsmodus	gering	mittel bis hoch	hoch	mittel bis hoch	mittel
Arbeitsaufwand	gering bis mittel	mittel bis hoch	hoch	mittel bis hoch	mittel

In Tabelle 57 sind die Stärken und Schwächen, die aus dem durchgeführten Methodenvergleich abgeleitet werden können, gegenübergestellt.

Tabelle 57: Methodenvergleich – Stärken und Schwächen

Methode	Stärken	Schwächen	Sonstiges
Kennwerteverfahren nach DIN 4108-2 (DIN-KWV)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ geringer zeitlicher Aufwand ▶ Verfahrensprinzip einfach zu verstehen ▶ Ergebnisse sind nachvollziehbar ▶ i.d.R. auf der sicheren Seite 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ stark vereinfachte Abbildung der Verschattungssituation, komplexe Verschattungssituation nicht abbildbar und nicht berücksichtigt ▶ Wenn Verschattungswinkel-Bestimmung und/oder C_{wirk}-Berechnung erforderlich, erhöht sich der zeitliche Aufwand beträchtlich ▶ Wechselwirkungen von Maßnahmen werden nicht berücksichtigt (z.B. Nachtlüftung und passive Kühlung) ▶ Für den Nachtluftwechsel nur 3 starre Luftwechsel (keiner, ≥ 2-fach, ≥ 5-fach) ansetzbar, so dass ein 1,5-facher Nachtluftwechsel als keine Nachtlüftung eingestuft wird 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Zulässig für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach GEG ▶ Überarbeitung DIN 4108-2 steht an. Dies ist u.a. erforderlich, um das Verfahren an die prognostizierten steigenden Außentemperaturen anzupassen. ▶ Anforderungen abhängig von Sommerklimaregion und deren scharfe Abgrenzung in Zeiten des Klimawandels ist diskussionswürdig
Thermische Simulation nach DIN 4108-2 (DIN-SIM)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ durch festgelegte Randbedingungen vereinfachtes Simulationsverfahren ▶ Geometrien, Speichermassen und Verschattungssituation lassen sich exakt abbilden ▶ Der Nachtluftwechsel bei Einsatz einer Lüftungsanlage analog Dimensionierung ansetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Nicht alle Randbedingungen sind vorgegeben. Dadurch sind Ergebnisse nur bedingt vergleichbar. ▶ Es ist nicht erlaubt, Randbedingungen für NWG an die Nutzung anzupassen (z.B. hohe innere Wärmelasten bei Klassenzimmern). ▶ höherer Aufwand für den Nachweis als beim DIN-KWV ▶ Geringer Realitätsbezug der Ergebnisse (z.B. zu niedriger Tag-Luftwechsel und interne Lasten eines Klassenzimmers), folglich nicht für als Basis für weitere Auswertungen geeignet. 	s. DIN-KWV
Thermische Simulation mit Komfortbewertung nach DIN 16798-1 (KOMF)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Adaptives Komfortmodell hat wichtigen Realitätsbezug ▶ Auswertung ermöglicht Aussagen über sich einstellende Raumtemperaturen und Komfort 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Simulation durch viele eigen festzulegende Randbedingungen aufwendig und komplex ▶ Auswertung und Ergebnisinterpretation erfordert vertieftes Fachwissen ▶ Im Gegensatz zur Kenngröße ÜTGS geht bei der Überschreitungshäufigkeit die Höhe der Überschreitung nicht ein. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Unterscheidung in gekühlte und ungekühlte Gebäude ist zu diskutieren. ▶ Da es sich um kein Nachweisverfahren handelt, ist die Höhe der zulässigen Überschreitungshäufigkeit nicht fix festgelegt.
Kühllast-Berechnung VDI 2078 (KÜL)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Bei erfolgter Kühllast-Berechnung kein Zusatzaufwand ▶ leicht verständliche Größe 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ nicht als Verfahren für die Bewertung des Sommerlichen Wärmeschutzes vorgesehen, sondern zur Dimensionierung von Kühlflächen. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ wird bei gekühlten Gebäuden für die Auslegung durchgeführt - könnte durch eine Kühllast-Begrenzung ein ohne Mehraufwand durchzuführendes Verfahren für gekühlte Gebäude sein.
PHPP – Blatt Sommer (PH)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Bei erfolgter PHPP-Berechnung nahezu kein Zusatzaufwand ▶ Sinnvoller Ansatz auf Behaglichkeit sommers wie winters zu achten ▶ Detaillierte Abbildung der Verschattungssituation 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Im Gegensatz zur Kenngröße ÜTGS geht bei der Übertemperaturhäufigkeit die Höhe der Überschreitung nicht ein ▶ Fensterweise Eingabe der Verschattung aufwendig 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ PHPP für Gebäude konzipiert, daher Anwendbarkeit auf raumweise Untersuchung fragwürdig ▶ PHPP ist für Passivhäuser, d.h. für Gebäude mit sehr geringem Heizwärmebedarf und nur für Gebäude mit Lüftungsanlage mit WRG konzipiert. Berechnungsmodus müsste für andere Gebäude ggf. modifiziert werden.

Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse und Empfehlungen, die sich aus dem vorangestellten Methodenvergleich ergeben, zusammengestellt.

Methodenvergleich - Erkenntnisse und Empfehlungen

Für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes (Aktualisierung DIN 4108-2)

- ▶ Eine der wichtigsten Einflussgrößen des Nachweises sind die Klimadaten. Diese sollten nicht vergangenes Klima - wie nach derzeitigem Nachweis mit den TRY 2011 - abbilden, sondern sollen zukünftiges Klima auf Basis von Klimaprognosen mit einem an die Nutzungszeit von Gebäuden angepassten Zeithorizont repräsentieren. Um Neubauten für die kommenden Dekaden, die vom Klimawandel geprägt sein werden, gut aufzustellen, sind aktualisierte Klimadaten mit (extremem) Zukunftsklima (z.B. aktualisiertes TRY2045x) zugrunde zu legen.
- ▶ Bei der Zuordnung zu einer Sommerklimaregion wird der Urbane-Wärmeinsel-Effekt in Städten nicht berücksichtigt, der jedoch wesentlichen Einfluss haben kann. Ferner ist zu bedenken, dass sich Wetter nicht an die Grenzen der Sommerklimaregionen hält. Insbesondere ergeben sich durch den zunehmenden Klimawandel lokale Verschiebungen bei den Temperaturanstiegen. Da die Zuordnung zu einer bestimmten Sommerklimaregion wesentlichen Einfluss auf die Anforderung hat, sollte die Einbeziehung ortsgenauer Klimadaten, die u.a. den Urbanen-Wärmeinsel-Effekt berücksichtigen, geprüft werden. Eine Alternative zu den Sommerklimaregionen wäre beispielsweise die Anwendung adaptiver Modelle (z.B. DIN EN 16798-1 NA), die die zulässige Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur bestimmen.
- ▶ Eine wichtige - immer wieder neu zu beantwortende - Frage ist, welche Maßnahmen für den Nachweis als passiv zählen. Ziel hierbei ist, die Definition so festzulegen, dass Maßnahmen mit hohen Treibhausgasemissionen ausgeschlossen werden und Maßnahmen mit geringen Treibhausgasemissionen einbezogen werden können. Wichtigstes Kriterium muss daher die mit der Maßnahme im Lebenszyklus verbundenen Treibhausgas-Emissionen sein – zumindest aber die Treibhausgas-Emissionen in der Nutzungsphase (vgl. hierzu Kapitel 5.5.3.2 und 5.7).
- ▶ Das Kennwerteverfahren sollte aufgrund seiner Einfachheit und weit verbreiteten Anwendung beibehalten werden. Die Ergebnisse des Methodenvergleichs deuten darauf hin, dass es in vielen Fällen vertretbar ist, Parameter wie z.B. den Energiestandard zu vernachlässigen. Ein differenzierter Ansatz je nach Art der passiven Kühlung wäre auch im Kennwerteverfahren sinnvoll, da große Unterschiede im Kühlpotenzial bestehen (z.B. zwischen Adiabatik und Grundwasserkühlung, vgl. Tabelle 55).
Bei baulicher Verschattung kann nur eine Verschattung in Form eines F_s -Wertes, also entweder durch einen Verschattung von oben, von der Seite oder von Gegenüber, berücksichtigt werden. Oft liegt aber eine Kombination beispielsweise aus Gebäudeversprung, Vordach, gegenüberliegendem Gebäude oder tiefer Laibung vor. Für diesen Fall gibt es kein in DIN 4108-2 oder in der DIN V 18599-2:2018-09 beschriebenes Verfahren, wie mehr als ein Verschattungswinkel berücksichtigt werden könnte. Diesbezüglich wird empfohlen, beispielsweise analog der Verschattungsberechnung nach PHPP eine Möglichkeit zur Mehrfachberücksichtigung schaffen.
Beim Kennwerteverfahren besonders hohe Unterschreitungen zu belohnen (wie z.B. bei der DGNB- und BNB-Zertifizierung) scheint fragwürdig. Diese Übererfüllung, die exemplarisch für

den Raum mit den höchsten Anforderungen¹⁰¹ zu führen ist, könnte durch die Maßnahmen-Übertragung auf andere Räume des Gebäudes beispielsweise zu Qualitätseinbußen hinsichtlich Tageslichtversorgung oder bei der Frischluftversorgung durch geringe Öffnungsquerschnitte führen. Daher sollte bei hohen Ansprüchen an den sommerlichen Komfort keine Unterschreitung im Kennwerteverfahren angestrebt, sondern eine exaktere Bestimmung mittels Simulation erfolgen.

- ▶ Die thermische Simulation als Nachweisinstrument ist für die seltenen Fälle essenziell, für die das KVV nicht zugelassen ist, aber noch wichtiger als Ergänzung, für Fälle, bei denen das Kennwerteverfahren an seine Grenzen stößt. Das ist im Moment vor allem bei baulicher Verschattung oder bei Einsatz einer passiven Kühlung der Fall.
Das Nachweisverfahren ermöglicht trotz Simulation keine belastbaren Aussagen über die sich einstellenden Temperaturen, weil es durch die festgelegten Randbedingungen nicht die tatsächliche Situation abbildet. Als Nachweisinstrument, das vergleichbare Bedingungen schafft, und durch die Reduktion des Arbeitsaufwands im Vergleich zu Simulationen mit freien Randbedingungen, ist dies gerechtfertigt. Jedoch wird empfohlen, zusätzliche Simulationen mit den tatsächlichen Bedingungen durchzuführen, damit die tatsächlichen Auswirkungen von Maßnahmen auf das Raumklima eingeschätzt werden können.
Zu überprüfen ist das Verfahren hinsichtlich der Bezugstemperaturen (s.o.)
Auch ein Öffnen für die Anpassung von Nutzungsparametern in Sonderfällen¹⁰² oder die Option eines Nachweises des Einhaltens des Komforts mindestens nach Kategorie II DIN EN 16798-1 (ohne aktive Kühlung) sollte geprüft werden.
- ▶ Für aktiv gekühlte Gebäude könnte für die Reduktion von Treibhausgasen eine Begrenzung der spezifischen Kühllast sinnvoll sein. Das simulative Verfahren der VDI 2078 (oder auch eine andere simulative Kühllastermittlung) könnte gute Voraussetzungen für diesen Zweck einbringen. Eine Kühllastbegrenzung ist erstrebenswert, um indirekt damit auch den Kühlenergiebedarf zu begrenzen, aber vor allem auch um eine passive Flächenkühlung zu ermöglichen.
- ▶ Für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes sollte genau definiert werden, für welche Räume der Nachweis zu führen ist. Das Vorwort der DIN 4108-2 nimmt Bezug auf Aufenthaltsräume, Kapitel 1 auf beheizte Räume und Gebäude.

Für die Komfortbewertung nach DIN EN 16798-1

- ▶ Für ein Nachweisverfahren sind Simulationen mit freien Randbedingungen wegen des hohen Aufwands und der nicht gegebenen Nachvollziehbarkeit nicht geeignet. Für die Komfortbewertung ist das Verfahren bei der bauphysikalischen Beratung jedoch hilfreich.
- ▶ Die Anforderungen sind abhängig von der Einteilung in Räume mit und ohne maschinelle Kühlung. Nach Punkt 3.17 der DIN EN 16798-1 geht es bei der Zuordnung zu maschineller Kühlung um die Art der Übergabe („Hierzu gehören Ventilator-konvektoren, Kühldecken ... gekühlte Oberflächen usw.“). Wichtig wäre jedoch die Art der Erzeugung einzubeziehen: Bei „passiven Kühlsystemen“, bei welchen beispielsweise die Kälte über gekühlte Oberflächen übergeben wird, handelt es sich oft um eine Temperierung mit begrenzter Leistung, mit der die Komfort-

¹⁰¹ Vgl. Kap. 8 DIN 4108-2:2013-02 "Der Nachweis zur Einhaltung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz ist ... mindestens für den Raum zu führen, der im Rahmen des Anwendungsbereichs zu den höchsten Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes führt."

¹⁰² Da im Rahmen dieser Studie typische Wohn-, Büro und Schulräume abgebildet werden, kann über Sonderfälle keine Aussagen getroffen werden. Es ist aber vorstellbar, dass in besonderen Raum- oder Nutzungstypen die festgelegten Randbedingungen zu keiner befriedigenden Abbildung der Situation führen.

Temperaturen einer aktiven Kühlung nicht erreicht werden können (vgl. hierzu auch (Radermacher 2019)), der Energieeinsatz jedoch deutlich niedriger als bei einer aktiven Kühlung liegt.

- Schwierig ist auch die Auswertung bei den Übergängen von Winter- und Sommeranforderungen, da sowohl deren dynamischer Übergang als auch die jeweilig gültigen Komfortgrenzen nicht klar definiert sind.

Für die Komfortbewertung nach Nationalem Anhang der DIN EN 16798-1 NA

- Die Vor- und Nachteile sowie Handlungsempfehlungen der NA-Komfortbewertung sind in Kapitel 5.4.3 zusammengestellt.

8 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

8.1 Klimawandel, Raumtemperaturen und Folgen für das Bauwesen

Über zukünftiges Sommerklima in Deutschland lassen sich Prognosen machen. Wie gut diese das zukünftige Wetter mit möglicherweise extremen Hitzeperioden tatsächlich abbilden, werden erst die kommenden Jahre und Jahrzehnte zeigen (s. Kapitel 5.4.1 Diskussion Klimadaten). Auch beeinflussen die derzeitigen (und zukünftigen) Emissionen von Treibhausgasen die Entwicklung. Fest steht, dass der Klimawandel die Außenluft-Temperatur spürbar erhöhen wird. Städtebauliche Strategien sowie Bepflanzung können das lokale (Mikro-)klima positiv beeinflussen. Diese Einflüsse wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht untersucht, haben aber Einfluss auf die lokale Temperaturentwicklung (vgl. Offermann et al. 2022). Diese Studie konzentriert sich auf die Auswirkungen von zukünftig wärmerer Außenluft auf Innenraumtemperaturen.

Welche Raumtemperaturen sich in Gebäuden einstellen, ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Zu diesen zählen Fensterflächenanteil, Verglasungstyp, Standort, Orientierung, Bauweise, Nutzung, Raumtyp, eingesetzte Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz und nicht zuletzt das Verhalten der Nutzer*innen. Trotz der vielen Einflussgrößen lassen sich auf Basis der Vielzahl im Rahmen dieser Studie durchgeführten Simulationen Aussagen treffen, wie wir uns auch zukünftig in Gebäuden vor extrem warmen Außentemperaturen schützen können. Um den Klimawandel durch den vermehrten Einsatz von Klimaanlage nicht zusätzlich anzutreiben, liegt das primäre Augenmerk auf passiven Maßnahmen. Wichtige Stellschrauben für angenehme Raumtemperaturen werden auch zukünftig sein:

- ▶ ein moderater grundflächenbezogener Fensterflächenanteil
- ▶ wirksamer Sonnenschutz
- ▶ Lüften in Abhängigkeit des Kühlpotentials (d.h. Lüften mit hohem Luftwechsel, wenn es draußen kühler ist als drinnen)
- ▶ passive Kühlung mit Umweltkälte (z.B. Grundwasser, Erdreich)

Dies hat Auswirkungen auf das Bauwesen und die Herausforderungen, die steigende Außentemperaturen und Hitzewellen mit sich bringen, sind hoch. Die Vermeidung von Überhitzung durch eine integrale Planung ist ein wesentlicher Aspekt nachhaltiger Gebäudestrategien. Passive Maßnahmen werden hierbei auch zukünftig einen wichtigen Einfluss auf die Bauklimatik der Gebäude haben, wobei auf folgende Punkte zu achten ist:

- ▶ Bei der Auswahl von Maßnahmen ist auf deren Energiebedarf zu achten (vgl. Strombedarf mechanischer Nachtlüftung in Kapitel 5.5.3.1 und „Hinweise zur DIN 4108-2 (allgemein)“ in Kapitel 8.2). Dieser sollte bei sogenannten passiven Maßnahmen deutlich unter einer aktiven Kühlung liegen.
- ▶ Passive Maßnahmenpakete helfen auch, die Kühllast gering zu halten. Dadurch ermöglichen sie, einen verbleibenden Wärmeüberschuss mit einfachen Flächenkühlsystemen abzuführen (vgl. Kapitel 7.2 Kühllastberechnung sowie Kapitel 8.4 Textbox „Aufwand von passiven Maßnahmen - Einordnung und Diskussion“).
- ▶ Letztlich muss die Auswahl der Maßnahmenkombinationen – denn eine Kombination wird zukünftig erforderlich sein – auf Basis einer Abwägung der Ziele Gesundheitsschutz, hohe Energieeffizienz, geringer Ressourceneinsatz, hohe Robustheit und nicht zuletzt der

Kosteneffizienz erfolgen. Hierzu besteht weiterer Forschungsbedarf (vgl. Kapitel 8.7). Eine Einschätzung hinsichtlich technischen und finanziellen Aufwands findet sich in Kapitel 8.4.

Passive Maßnahmen sind ein wichtiger Baustein für die aufgrund des Klimawandels dringend erforderliche (Kühl-)Energieeinsparung. Jedoch kann je nach Nutzung zusätzlich eine Temperierung der Innenräume notwendig sein. Hinsichtlich energieeffizienter Kühlung ist die derzeit in DIN 4108-2 vorgenommene Einteilung in passive und aktive Kühlung, die den jeweiligen Energiebedarf aber nicht einbezieht, nicht hilfreich. Daher sollten Strategien erarbeitet werden, wie bei passiver, aber auch aktiver Kühlung energieeffiziente Maßnahmen eingefordert werden können. Ein hohes Maß an Wahlfreiheit bei den Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz zu ermöglichen, sollte hierbei die Zielstellung sein.

8.2 Methoden für die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes

Ausführlich werden im Rahmen dieser Studie gängige Methoden für die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes vorgestellt, diskutiert und Ergebnisse verschiedener Methoden miteinander verglichen. Es gibt eine Vielzahl normativ beschriebener Möglichkeiten, sommerlichen Wärmeschutz zu bewerten. Die Einschätzung und vergleichende Anwendung der unterschiedlichen Methoden und die Festlegung der Bewertungsmethodik hat sich bei der Bearbeitung dieser Studie als äußerst aufwendig erwiesen.

Die unterschiedlichen Komfortbänder, Bezugstemperaturen und Auswertegrößen haben jeweils Vor- und Nachteile. Am überzeugendsten war für die Autorinnen und Autoren die Auswertung von Übertemperaturgradstunden über einem Komfortband, das für gekühlte und ungekühlte Gebäude gleichermaßen gilt und die Komforttemperatur adaptiv über die Außentemperatur festlegt.

Nicht nur die Festlegung von Auswertegröße und Bezugstemperaturen sind wesentlich, genauso essenziell sind die Anforderungswerte bzw. Komfortkriterien zur Bewertung der Ergebnisse: Hier muss die Frage beantwortet werden, wieviel Überschreitung als noch zulässig akzeptiert werden kann. Woran sich die nächste Frage anschließt: was soll der Anforderungswert eigentlich festlegen? Geht es um Gesundheitsschutz der Nutzer*innen oder Behaglichkeit oder vor allem die Minimierung des Kühlenergiebedarfs? Diese Aspekte hängen miteinander zusammen, sollten aber dennoch klarer abgetrennt und bewertet werden. Dadurch dass die Methoden in DIN-Normen beschrieben sind, fehlen teilweise Hinweise auf den zugrunde liegenden wissenschaftlichen Hintergrund für die jeweilige Festlegung.

Derzeit gibt es große Unterschiede in der methodischen Vorgehensweise zwischen dem gesetzlich vorgeschriebenen Nachweis und der Komfortbewertung, was nicht sein müsste. Dies ist für Fachleute, Planer und Bauherren gleichermaßen verwirrend. Die derzeitige Situation ist unbefriedigend, da sie das Verständnis und Planungs- und Entscheidungsprozesse erschwert.¹⁰³

Daraus lassen sich folgende Handlungsempfehlungen ableiten:

¹⁰³ In einem Fachartikel aus dem Jahr 2005 heißt es „Welche Planungsregeln tatsächlich zu beachten sind, ist bei genauem Hinsehen allerdings recht verwirrend. So sorgte auch das Urteil des Bielefelder Landgerichts ... für Aufruhr – und zeigte Widersprüche zwischen anzuwendenden Vorschriften und deren Auslegung...Welchen Inhalt vernünftige Ziele haben sollten, ist ziemlich klar; daraus eine einfach und flexibel zu handhabende und validierte sowie mit verschiedenen Anforderungsebenen harmonisierte Planungsregel zu machen, ist noch nicht gelungen. Aber wie thermische Behaglichkeit im Sommer auch ökologisch und ökonomisch verträglich erreicht werden kann, ist im Grundsatz bekannt und kann von einer guten Fachberatung projektbezogen umgesetzt werden. Dabei kommt es gerade auf die Kombination von Gebäudekonzept generell, Fassaden- und Technikkonzept an. Und auf die bewusste Zieldiskussion und -vereinbarung. Die Beachtung der DIN 4108-2 allein schützt leider noch nicht ausreichend vor thermischer Unbehaglichkeit im Sommer.“ (DBZ 2005) An dieser Situation hat sich nichts geändert.

► Vereinheitlichung der Normen

Die Notwendigkeit, Normen zum sommerlichen Wärmeschutz bzw. Komfort zu vereinheitlichen, wird schon lange gesehen. Schon in (Schlitzberger 2014) werden Überlegungen zu einer Harmonisierung unterschiedlicher Normenwerke angestellt. Verschiedene Normengremien für eine Abstimmung zusammenzubringen, scheint jedoch schwierig. Die Gesetzgebung verweist für Nachweisverfahren zunehmend auf DIN-Normen, was kritisch zu sehen ist und oft zu hoher Komplexität führt. Es wird empfohlen, eine Methode und eine Auswertegröße festzuschreiben, die sowohl zum Nachweis als auch für eine Komfortbewertung geeignet ist.

► Konkrete Verbesserungsvorschläge

Ausführliche Hinweise auf Verbesserungspotentiale zum Gebäudeenergiegesetz finden sich in Kapitel 6, zu den einzelnen Normen am Ende des Methodenvergleichs (s. Textbox „Methodenvergleich - Erkenntnisse und Empfehlungen“ am Ende des Kapitels 7.4) bzw. für den Nationalen Anhang der DIN EN 16798-1 in Kapitel 5.4.3. Die wichtigsten Empfehlungen sind nachfolgend zusammengestellt.

- Hinweise zum Gebäudeenergiegesetz
 - Das Wirtschaftlichkeitsgebot als zentrale Grundlage des GEG ist in Frage zu stellen. In den Ergebnissen der rechtsgutachterlichen Stellungnahme (s. Kapitel 6.4) heißt es hierzu: „Die Bauherren bzw. Gebäudeeigentümer können verfassungsrechtlich nicht beanspruchen, dass der Staat nur Anforderungen festlegt, die sich als wirtschaftlich vorteilhaft oder belastungsfrei darstellen. Im Hinblick speziell auf den vom BVerfG beschriebenen Verfassungsauftrag zu einem wirksamen Klimaschutz bestehen sogar schwerwiegende verfassungsrechtliche Bedenken gegen das Wirtschaftlichkeitsgebot, weil es die individuellen Verwertungsinteressen der Eigentümer strikt über den herausragenden öffentlichen Belang des Klimaschutzes stellt.“
 - § 14 Abs. 4 führt dazu, dass ein baulicher sommerlicher Wärmeschutz nur dann erforderlich ist, wenn er sich trotz Anlagen zur Kühlung als wirtschaftlich erweist. Dies führt praktisch dazu, dass sich der Vorrang baulicher Maßnahmen durch den Einsatz von Anlagen zur Kühlung umgehen lässt. Es wird empfohlen, § 14 Abs. 4 zu streichen. (vgl. Kapitel 6.2.2, (Offermann et al. 2022)).
 - Energiebedarf für den sommerlichen Wärmeschutz wird in der Gebäudebilanzierung nach GEG in Verbindung mit DIN V 18599 nur teilweise berücksichtigt. Es sollte sichergestellt werden, dass der Energiebedarf für die Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz auch im Primärenergiebedarf des Nachweises bzw. Energieausweises berücksichtigt ist, damit energieeffiziente Konzepte gefordert und der Energiebedarf zum sommerlichen Wärmeschutz und regenerative Erzeugung miteinander verrechnet werden können.
- Hinweise zur DIN 4108-2 (allgemein)
 - Durch den Bezug auf alte Klimadaten (TRY2010) können die Ziele der Norm, wie eine sommerliche thermische Behaglichkeit in Aufenthaltsräumen, nicht mehr sichergestellt werden.
 - Die Definition von „Passiver Kühlung“ sollte angepasst werden, um sicherzustellen, dass nur im Vergleich zu einer aktiven Kühlung energieeffizientere Maßnahmen im

Nachweis angesetzt werden dürfen. Hierfür ist ein Grenzwert für die Stromeffizienz passiver Kühlung festzulegen.

- Auch sollten Überlegungen angestellt werden, wie die Wahlfreiheit an passiven Maßnahmen unter der Prämisse eines äußerst geringen Energieeinsatzes erhöht werden könnte.
- Hinweise zur DIN 4108-2 (Nachweis über thermische Simulation)
 - Eine Anpassung an die Komfortbewertung wird empfohlen. Es sollte ein auf die Außentemperatur bezogenes Komfortband zugrunde gelegt werden, das die Einteilung Deutschlands in Sommerklimaregionen überflüssig macht. Die Zuordnung zu Sommerklimaregionen ist in Zeiten des Klimawandels fragwürdig. Stattdessen sollten ortsgenaue Testreferenzjahre verwendet werden. Diesbezügliche Werkzeuge sind verfügbar und sollten auch genutzt werden.
 - Klimadaten und der Normenbezug auf zu verwendende Klimadaten sollten regelmäßig aktualisiert werden oder auf das DWD-Klimaberatungsmodul bzw. den jeweils aktuellen TRY-Klimadatensatz anstatt auf einen bestimmten verwiesen werden. Die derzeitigen Aktualisierungszeiträume sind zu lang. Dies führt zu dem bedenklichen Zustand, dass Nachweise momentan basierend auf veralteten Klimadaten (TRY2010) erfolgen. Entscheidend für auch zukünftig nicht zu sehr überhitzende Neubauten wird die Änderung des Bezugs auf das „Normaljahr“ sein: Dieses bildet aus vergangenen Wetterdaten ein Gegenwartsklima ab. Sinnvoll wäre der Bezug auf ein Zukunfts-TRY, welches auf Klimaprognosen mit einem an die Nutzungszeit von Gebäuden angepassten Zeithorizont (z.B. 10 bis 20 Jahre) basiert. Setzt man dies um, werden für den Nachweis mehr Maßnahmen nötig und der Nachweis für Gebäude mit hohen Fensterflächenanteilen wird erschwert. Um zu gewährleisten, dass ungekühlte Gebäude auch zukünftig noch genügend sommerlichen Komfort bieten, wird dies als sinnvoll erachtet.
- Hinweise zur DIN 4108-2 (Nachweis über Kennwerteverfahren)
 - Ein vereinfachtes Verfahren für den Nachweis ist sinnvoll. Werden obige Empfehlungen hinsichtlich Aktualisierung der Klimadaten und Verwendung von Zukunfts-Klimadaten umgesetzt, muss eine entsprechende Anpassung der Kennwerte erfolgen. Die Arbeiten für eine Aktualisierung der DIN4108-2 im Rahmen eines BBSR-Forschungsprojektes haben bereits begonnen und umfassen auch die Neukalibrierung des Kennwerteverfahrens. Die Neukalibrierung wird sich auf die für das Simulationsverfahren –in Abstimmung mit dem DIN4108-2-Normungsgremium - noch festzulegenden Klimadaten beziehen (Empfehlung hierzu s.o.).
 - Wichtig wäre ein Hinweis, dass das Kennwerteverfahren nicht als Planungsinstrument oder zur Auslegung zu verwenden ist. Hierfür ist es zu ungenau.
 - Es ist davon auszugehen, dass der simulative Nachweis mittelfristig zum Standard wird.

- Hinweise zur DIN EN 16798-1 und zum Nationalen Anhang der DIN EN 16798-1 NA
 - Die in der DIN EN 16798-1 vorgenommene Unterteilung zwischen Gebäuden mit und ohne maschinelle Kühlung mit unterschiedlichen Komfortbändern wird als nicht sinnvoll erachtet. Beim statischen Komfortband für gekühlte Gebäude fehlt der Bezug zur Außentemperatur und damit zum Adaptionsvermögen des Menschen. Wichtig wäre, die Komfortbänder im Hinblick auf fundiertes Wissen zu medizinischen und sensorischen Zusammenhängen zu aktualisieren. Sind die geforderten Temperaturen zu niedrig angesetzt, steigt der Kühlenergiebedarf und auch die Gefahr, dass sich diesbezüglich empfindliche Personen erkälten. Zu hohe Temperaturen verringern das Behaglichkeitsempfinden, die Leistungsfähigkeit, und können die Gesundheit beeinträchtigen. Bei Wohngebäuden stellt sich zudem die Frage nach gesundheitlich unbedenklichen Schlaftemperaturen.
 - In den betreffenden Normen sollte zukünftig eine einheitliche Auswertegröße verwendet werden. Hierzu eignen sich am besten die Übertemperaturgradstunden, weil diese die Überhitzung und die Höhe der Überhitzung abbilden.

Eine grundlegende Novelle des GEG steht im Jahr 2025 an, die Arbeiten zur Aktualisierung der DIN 4108-2 sind bereits angelaufen. Um die Wirksamkeit der Vorschriften zum sommerlichen Wärmeschutz zu stärken, wird der Gesetzgeber bzw. die Normungsgremien aufgefordert, die Empfehlungen des Forschungsprojektes aufzugreifen und umzusetzen. Basierend auf den Analysen des Vorhabens sollte die aktualisierte DIN 4108-2 unbedingt bereits die neuen Testreferenzjahre des DWD referenzieren.

Wichtig ist letztlich die Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit von Gebäuden mit einem möglichst einfachen und nachvollziehbaren Verfahren, aber auch - sofern eine Kühlung vorhanden ist - die Minimierung des Kühlenergiebedarfs.

8.3 Wirksamkeit und Grenzen passiver Maßnahmen(-pakete)

Was mit passiven Maßnahmen erreicht werden kann, ist stark von den Randbedingungen abhängig und kann nicht verallgemeinert werden. Bei den Randbedingungen spielen der Luftwechsel, der Fensterflächenanteil und der Standort eine wesentliche Rolle.

Die untersuchten Maßnahmenpakete haben sich als wirksam hinsichtlich der Absenkung von Übertemperaturgradstunden herausgestellt. Die Frage, welche Komfortkriterien mit passiven Maßnahmen zu erreichen sind, kann jedoch nicht beantwortet werden, weil sich für Kategorie II nach DIN EN 16798-1 und deren Nationalem Anhang sehr unterschiedliche Anforderungen ergeben und auch die zugrunde gelegten Komfortbänder zu hinterfragen sind (s.a. Kapitel 8.7).

Wichtige Erkenntnisse sind, dass

- ▶ alle bisherigen Maßnahmen auch zukünftig die Anzahl an Übertemperaturgradstunden absenken können.
- ▶ auch bei steigenden Außentemperaturen hohe Luftwechsel positive Effekte zeigen. Dies gilt insbesondere bei an das Kühlpotenzial der Außentemperatur angepasstem Lüftungsverhalten.
- ▶ mindestens zwei effektive Maßnahmen erforderlich sein werden (analog den STD- oder MAX-Maßnahmenpaketen).

- ▶ sich die Kombination aus außenliegendem Sonnenschutz und passiver Kühlung als besonders empfehlenswert zeigt. Für letztere wäre die erste Wahl eine Grundwasserkühlung, aber auch sonstige verfügbare Umweltkälte ist geeignet.
- ▶ hohe Fensterflächenanteile außer an besonders kühlen Standorten auch mit sehr weitgehenden passiven Maßnahmenpaketen keine zuträgliche Überhitzung ermöglichen.
- ▶ bei Neubauprojekten Nachrüstoptionen für weitere Maßnahmen eingeplant werden sollten, so dass bei durch den zunehmenden Klimawandel ansteigenden Raumtemperaturen reagiert werden kann.

Daraus lässt sich ableiten, dass es effektive Handlungsmöglichkeiten gibt, um sich vor Überhitzung in Räumen zu schützen. Die Handlungsmöglichkeiten betreffen sowohl die Gebäudehülle als auch die Anlagentechnik.

8.4 Technischer und finanzieller Aufwand passiver Maßnahmen

Wichtige Erkenntnisse zum Aufwand von passiven Maßnahmen sind, dass

- ▶ der technische und finanzielle Aufwand der untersuchten Maßnahmen sehr unterschiedlich ist,
- ▶ es Maßnahmen gibt, die keinen technischen und finanziellen Aufwand mit sich bringen. Hierzu zählt bei der Planung die Reduzierung des Fensterflächenanteils und die händische Nutzung der Fenster für die Nachtlüftung.
- ▶ hinsichtlich des Aufwands ein moderater Fensterflächenanteil - gegebenenfalls mit Eigenverschattungen oder feststehenden Verschattungselementen - häufig gegenüber variablen Sonnenschutzsystemen von Vorteil ist. Hintergrund ist eine aufwendige Steuerungstechnik sowie der witterungsbedingte Aufwand (Wind, Korrosion) für Wartung und Instandhaltung bei automatisierten Systemen. Bei handbedientem variablen Sonnenschutz wiederum würde die Steuerungstechnik entfallen. Handelt es sich beispielsweise um Jalousien in Nichtwohngebäuden, sind diese ohne Steuerungstechnik anfälliger für Fehlbedienung und Windschäden, wohingegen handbediente Rollläden in Wohngebäuden - zumindest was Windschäden anbelangt - robuster sind.
- ▶ passive Maßnahmen neben den verbesserten sommerlichen Raumtemperaturen weiteren Nutzen bringen können, so dass technischer Aufwand und Kosten mehreren Nutzen zugeordnet werden müssen (z.B. Rollläden, der auch dem Sicht- und Einbruchsschutz dient). Andererseits kann eine Maßnahme auch zu Folgekosten führen (z.B. Sonnenschutzverglasung zu höheren Heiz- und Beleuchtungskosten).
- ▶ wir durch eine im Rahmen der Studie durchgeführte Masterarbeit (Schmitteckert 2022) ferner wissen, dass für einen Büroraum analog dem Büromusterraum mit Fensterband (vgl. 3-Achser in Tabelle 19) auch bei einer aktiven Kühlung die passiven Maßnahmen (trotz Reduzierung des Kühlenergiebedarfs) in der Regel nicht wirtschaftlich darstellbar sind. Brisant ist dies im Zusammenhang mit § 14 Abs. 4 GEG und der Erkenntnis, dass die Anforderungen im Falle einer aktiven Kühlung nur eingehalten werden müssen, soweit zusätzlich erforderliche Maßnahmen wirtschaftlich darstellbar sind (s. Kapitel 6).

In Tabelle 58 wird der technische und finanzielle Aufwand der in den untersuchten Paketen eingesetzten Maßnahmen für den Einsatz im Neubau qualitativ eingeschätzt.

Tabelle 58: Einschätzung des technischen und finanziellen Aufwands von passiven Maßnahmen

	Technischer Aufwand	Finanzieller Aufwand	Bemerkung
Außenliegender Sonnenschutz (Fc-Wert $\leq 0,25$)	mittel in Planung und Ausführung	hoch	auf Robustheit achten
Sonnenschutzverglasung (g-Wert 0,38)	gering	gering	führt zu Erhöhung des Heizwärme- und Kunstlichtbedarfs
Freie Nachtlüftung über Fenster	keiner	keiner	nur bei Anwesenheit möglich
Freie Nachtlüftung über manuelle Lüftungselemente mit Witterungs- und Einbruchsschutz	mittel (Planung und Ausführung)	hoch	
Freie Nachtlüftung über automatisierte Kippflügel	hoch, weil jeder Kippflügel über einen Antrieb verfügen muss	hoch	
Mechanische Nachtlüftung (bei schon vorhandener RLT-Anlage)	Geringer Aufwand für Regelung	hoch (Strombedarf)	Achtung: Strombedarf kann höher sein als mit einer aktiven Kühlung!
Adiabate Kühlung (bei schon vorhandener RLT-Anlage)	mittel	gering bis mittel	bei feuchter Außenluft sinkt die Effizienz; Wasseraufbereitung und -verbrauch
Passive Kühlung	abhängig von Anlagentechnik	abhängig von Anlagentechnik, Strombedarf während Nutzung	Aufwand ist bei Heizung über Grundwasser-/Sole-Wärmepumpe mit Flächenheiz-/kühlsystem gering

Die Weiterentwicklung einfacher, kostengünstiger und robuster Systeme ist für die Akzeptanz entscheidend. Hier sollte weitere Forschung und Entwicklung gefördert werden.

Besonderes Anliegen des Autorenteam ist der Einsatz energieeffizienter Systeme mit hoher Zuverlässigkeit und Robustheit. Im Rahmen dieser Studie konnten diese Aspekte aufgrund der Zielstellung nicht abschließend bewertet werden. Auch erfolgte die Einschätzung von Überhitzung in Form von Übertemperaturgradstunden pro Jahr pauschal. Aussagen über - gegebenenfalls punktuell gesundheitsgefährdende - Überhitzung während einer Hitzeperiode können nicht getroffen werden. Aus diesem Grund erfolgt in nachfolgender Textbox eine erweiterte Einordnung von Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz.

Aufwand von Maßnahmen - Einordnung und Diskussion

- Die Wirksamkeit bestimmter passiver Maßnahmen hängt von vorherrschenden Umweltbedingungen ab:
 - Nachtauskühlung in Wohngebäuden funktioniert beispielsweise in den frühen Morgenstunden weitaus besser als in den noch warmen Abendstunden, zu welchen eine Abkühlung der Schlafraumtemperatur aber erforderlich wäre.
 - Indirekte Verdunstungskühlung ist wenig effektiv bei hoher Außenluftfeuchte. Das bedeutet, wenn es unangenehm schwülwarm ist, kann die Adiabatik wenig bewirken.

- Überhitzungsspitzen könnten durch höheren solaren Eintrag infolge von langandauernden Hochdruck-Wetterlagen (so genannte Hitzewellen) zunehmen, so dass passive Maßnahmen zeitweise nicht mehr ausreichen, die Überhitzung ausreichend abzumildern.
- Auch Erdreich- und Grundwassertemperaturen könnten in den nächsten Jahren ansteigen, die Verfügbarkeit von Grundwasser abnehmen.

Ein weiterer zu beachtender Aspekt ist, dass bei kleinteiliger Technik Ausfälle auftreten können. Dies betrifft besonders motorisch betriebenen Sonnenschutz und motorisch betriebene Öffnungselemente für die natürliche Lüftung.

Umweltbedingungen und fehlende Robustheit können also bei passiven Maßnahmen dazu führen, dass es zu Ausfällen bzw. zu geringer Wirksamkeit kommt. Andererseits verfügen passive Maßnahmen, die keinen Strom benötigen, über eine hohe Funktionssicherheit, da sie auch im Falle von Stromausfällen Überhitzung verhindern.

- In der Energiebedarfsanalyse zeigte sich, dass eine zentrale mechanische Nachtlüftung nicht energieeffizient ist. Diese kann also zu hohem Energiebedarf bei gegebenenfalls geringer Effizienz hinsichtlich Absenkung der Raumtemperatur führen. Ob andererseits eine aktive Kälteerzeugung in Verbindung mit einer PV-Anlage, die sowohl Gebäudestrombedarf (inkl. Kühlung) als auch den Nutzerstrom decken kann, als Bestandteil einer energieeffizienten Umsetzung des sommerlichen Wärmeschutzes gelten kann, sollte weiter diskutiert werden.
- In der letzten Dekade ging und geht die anlagentechnische Entwicklung bei Bauprojekten immer mehr in Richtung Flächenheizsysteme in Kombination mit Wärmepumpen. Diese Systeme können i.d.R. im Sommer auch zur Kühlung genutzt werden. Bei Nutzung von Geothermie als Wärmequelle kann diese auch ohne Einsatz einer Wärmepumpe zur Flächenkühlung genutzt werden (=passive Kühlung). Reichen die Temperaturen nicht mehr aus, kann die Wärmepumpe reversibel unterstützend zur Temperaturabsenkung eingesetzt werden. Geschieht dies, wird von einer aktiven Kühlung gesprochen. Für derartige einfache Flächenkühlsysteme ist eine geringe Kühllast (wie in Kapitel 7.2 untersucht) von unter 50 W/m² (als grobem Richtwert) Voraussetzung. Dies bedingt die Notwendigkeit einer Kombination mit passiven Maßnahmen und resultiert in einer hohen Energieeffizienz. Zu beachten ist auch die hohe Zuverlässigkeit eines solchen Konzepts, insbesondere bei Hitze.
- Bei aktiver Kühlung gibt es demnach viele Nuancen und Abstufungen von einer leichten Temperierung mit äußerst geringem Energieeinsatz bis hin zu einer Vollklimatisierung mit Be- und Entfeuchtung mit äußerst hohem Energieeinsatz. Eine begriffliche Differenzierung von passiver und aktiver Kühlung wäre hier notwendig, um die großen Unterschiede erkennbar zu machen.
- Bezüglich des technischen und finanziellen Aufwands, aber auch hinsichtlich Langlebigkeit schneidet baulicher sommerlicher Wärmeschutz besonders gut ab. Hierzu zählt ein moderater Fensterflächenanteil, baulicher Sonnenschutz und manuelles (Nacht-)Lüften. Kommen motorisch angetriebene Systeme an der Fassade zum Einsatz, nehmen technischer und finanzieller Aufwand zu und die Langlebigkeit ab. Hier kann der Einsatz von ohnehin vorhandenen anlagentechnischen Systemen der Wärmeversorgung/-übergabe zur Kühlung im Sommer wirtschaftlicher sein.
- Die Bewertung der Maßnahmen im Rahmen dieser Studie ist bei weitem nicht abschließend. Bezüglich der Einordnung der Systeme hinsichtlich baulichen und technischen Aufwands, Robustheit, Energieeinsatz und zuverlässigen Schutzes vor Überhitzung besteht weiterer Diskussions- und Forschungsbedarf (s. Kapitel 8.7 Punkt „Aufwand von Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz“).

8.5 Planungshinweise Sommerlicher Wärmeschutz

Stark vereinfacht lassen sich folgende Planungshinweise aus der Untersuchung der Maßnahmenpakete ableiten.

- ▶ Bei der Planung ist auf moderate Fensterflächenanteile zu achten. Gleichzeitig ist die Fassade hinsichtlich der Tageslichtversorgung der Räume zu optimieren.
- ▶ Vereinfachend kann eine Zusammenfassung von ähnlichen Räumen für Ost-, Süd- und West-Räume erfolgen. Für Nordräume können die Maßnahmen separat festgelegt werden.
- ▶ Bei Wohngebäuden:
 - Möglichkeiten für eine natürliche Nachtlüftung über Fenster schaffen. Ist dies aufgrund von Lärm- oder Schadstoffbelastung nicht möglich, sollte auf andere Arten passiver Kühlung ausgewichen werden (z.B. Grundwasser, Erdreich)
 - Außenliegenden, robusten Sonnenschutz (z.B. Rollläden) vorsehen
 - Bei Wärmepumpenversorgung: Die jeweilige Umweltwärme im Sommer als „Umweltkälte“ zur (Flächen-)kühlung nutzen.
- ▶ Bei Nichtwohngebäuden (z.B. Bürogebäuden):
 - Außenliegenden, robusten Sonnenschutz vorsehen
 - Moderate, selektive Sonnenschutzverglasung zur Begrenzung der solaren Lasten im Sommer unter Berücksichtigung der Tageslichtversorgung und Abwägung der Reduktion möglicher winterlicher passiven Gewinne
 - Passive Kühlung über „Erdkälte“. Falls das nicht möglich ist, aber eine RLT-Anlage geplant ist, ist der Einsatz einer adiabaten Verdunstungskühlung zu prüfen
 - Falls keine passive Kühlung möglich ist, natürliche Nachtlüftung über einbruchssichere und witterungsgeschützte Nachtlüftungselemente ermöglichen.
- ▶ Thermische Simulationen sollten für die Festlegung der Maßnahmen zum Sommerlichen Wärmeschutz für exemplarische Räume durchgeführt werden. Als Klimadaten sollten idealerweise die ortsgenauen Testreferenzjahre 2045x (sommerfokussiert) gewählt werden. Für verschiedene Maßnahmenkombinationen können dann die Übertemperaturgradstunden sowie der Energiebedarf ausgewertet und durch eine Wirtschaftlichkeitsbewertung ergänzt werden, um bestmögliche Varianten eruieren zu können.

8.6 Bestandsgebäude und Sanierungen

Ein äußerst wichtiger Aspekt dieser Studie ist, den Untersuchungsgegenstand nicht auf den Neubau-Bereich zu beschränken, sondern auf Bestandsgebäude auszuweiten. Aus diesem Grund wurde der Dämmstandard für die Parameterstudie nach GEG-Standard mit 2-Scheiben-Verglasung festgelegt. Dieser Standard entspricht einem in den letzten beiden Jahrzehnten weit verbreiteten Standard, so dass die Aussagen auf entsprechende Bestandsgebäude übertragbar sind. Ferner werden auch Übertemperaturgradstunden für schlecht gedämmte und teilsanierte Bestandsgebäude im Vergleich zum GEG-Standard ermittelt (s. Kapitel 5.3.2). Für Altbauten ergeben sich keine negativen Auswirkungen auf die Übertemperaturgradstunden durch höhere

Transmission und Infiltration. Lediglich bei besonders sonnenexponierten Räumen mit Bauteilen wie Steildächern mit dunklen Außenoberflächen wirkt sich mehr Dämmung merklich positiv aus.

Für Bestandsgebäude und Sanierungen sind bislang keine Nachweise des sommerlichen Wärmeschutzes vorgeschrieben. Bestandsgebäude und Sanierungen sind aber ebenso von steigenden Raumtemperaturen infolge des Klimawandels betroffen. Auch müssen diese im Nichtwohngebäude-Bestand die Technischen Regeln für Arbeitsstätten zur Raumtemperatur (ASR A3.5) einhalten. Infolgedessen droht bei zunehmenden sommerlichen Temperaturen ein vermehrter Einsatz von Klimageräten und ein damit verbundener Ausstoß von Klimagasen. Ähnliches gilt auch für Wohngebäude, auch wenn hier die ASR keine Anwendung finden. Vielmehr wird im Klagefall (wie u.U. bei anderen Gebäudenutzungen auch) geprüft, ob die zum Zeitpunkt der Erbauung geltenden Vorschriften eingehalten wurden (Fahrion 2015). Dies macht nochmals deutlich, wie wichtig auch rückwirkend der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes ist.

Um den durch den Klimawandel ansteigenden Raumtemperaturen entgegenzuwirken, könnte der Gesetzgeber zukünftig auch Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz bei Bestandsgebäuden stellen. Der Gesetzgeber wäre dabei an den Verhältnismäßigkeitsgrundsatz sowie bei Differenzierungen an das Gleichheitsgebot gebunden (vgl. Kapitel 6.3). Denkbar wäre einen Nachweis zu fordern, der bei Verkauf oder bei Vermietung zusammen mit dem Energieausweis vorzuzeigen ist oder ein erweiterter Bestandteil des Energieausweises wird. Vorstellbar wäre hierbei die Verpflichtung einzuführen, die Anforderungen zum sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 nach der aktuellen Fassung einzuhalten und bei einer Kühlung den Kühl-Endenergieverbrauch separat auszuweisen. Der Nachweis wäre dann alle 10 Jahre gleichzeitig mit dem Energieausweis zu aktualisieren. Allerdings wird bei Bestandsgebäuden ein Zwang zum sommerlichen Wärmeschutz mit Nachweis nach aktueller Norm und ggf. Nachrüsten von passiven Maßnahmen als schwer umsetzbar eingeschätzt. Auch sind aufgrund des höheren Einsparpotenzials Sanierungen des (winterlichen) Wärmeschutzes für den Klimaschutz dringlicher. Dennoch sollte dieser Vorschlag auf Umsetzbarkeit geprüft werden.

Anders stellt sich die Situation bei Sanierungen dar. Hier wird dringend empfohlen, die Nachweispflicht auf Sanierungen auszuweiten. Bei der Formulierung der Vorschrift muss geklärt werden, ab welchem Sanierungsausmaß die Nachweispflicht greifen soll. Alle bestehenden Gebäude, die eine Sanierung mit einem Nachweis nach § 50 GEG durchführen, sollten automatisch auch unter eine Nachweispflicht des sommerlichen Wärmeschutzes fallen. Zusätzlich sollte die Nachweispflicht auch bei Änderung von Bauteilen nach Satz 1 und 2 des § 48 GEG greifen. Diese sollte sich allerdings auf Räume beschränken, an denen an Außenluft grenzende Außenbauteile (z.B. Fenster) geändert werden.

Entsprechende Förderungen sind vorzusehen. Schon jetzt ist es möglich, sich über die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) bei den Einzelmaßnahmen einen automatisch gesteuerten außenliegenden Sonnenschutz fördern zu lassen.¹⁰⁴ Dies sollte auf weitere Maßnahmen (z.B. automatisierte freie Nachtlüftung, passive Kühlung über Verdunstungskühlung oder Grundwasserkühlung) ausgeweitet werden. Insbesondere auch im Hinblick auf Sanierungen ist eine Vereinheitlichung der simulativen Methoden wesentlich, damit einfach zwischen simulativen Nachweis (mit vereinfachten Randbedingungen) und Simulationen zur Komfortbewertung gewechselt werden kann.

Kritisch wird der vermehrte Einsatz von Kältegeräten im Bestand gesehen. Vielleicht kann dies über Anwendung des Verbots von Veränderungen nach § 57 (1) GEG verhindert werden. Ein

¹⁰⁴ „Förderfähig ist der Ersatz oder der erstmalige Einbau von außenliegenden Sonnenschutzeinrichtungen mit optimierter Tageslichtversorgung z. B. über Lichtlenksysteme oder strahlungsabhängige Steuerung.“ (BEG 2022)

anderer Ansatz, um den Kühlenergieverbrauch gering zu halten, wäre, dass vor einem Einbau von Klimageräten nachgewiesen werden muss, dass der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes erfüllt ist. Auch dieser Vorschlag sollte hinsichtlich Umsetzbarkeit überprüft werden. Die Gefahr besteht, dass der Einsatz von energieintensiven Klimaanlage und -geräten mit hohen Leistungen weiter zunimmt, wenn passive Maßnahmen nicht effektiv eingesetzt werden. Diese Gefahr betrifft auch den Wohngebäude-Bereich. Hier gilt es auch zu verhindern, dass Außeneinheiten (Splitgeräte) zu einer zusätzlichen Wärme- und Lärmbelastung (z.B. von Nachbarwohnungen) führen, die das Lüftungsverhalten negativ beeinflussen und auf diese Weise noch mehr Klimageräte zur Folge haben können. Um dies zu verhindern, sollte geprüft werden, ob die Anbringung von Außengeräten an Fassaden in Wohngebieten gesetzlich eingeschränkt werden kann.

8.7 Weiterer Forschungsbedarf und Wissenstransfer

Die vorliegende Studie hat weiteren Forschungsbedarf offengelegt. Die dringlichsten Themen sind:

► Klimadaten für thermische Simulationen

Die Aktualität des TRY-Klimadatensatzes 2017 wird im Rahmen dieser Studie mehrfach diskutiert (vgl. Kapitel 3.6.3 und 5.4.1). Derzeit werden die DWD-TRY im Auftrag des BBSR aktualisiert und sollen voraussichtlich 2024 zur Verfügung stehen. Erst im Vergleich zu diesen wird man beurteilen können, inwieweit die hier verwendeten TRY2045 und TRY2045x noch als repräsentativ angesehen werden können. Es wird daher empfohlen, nach Erscheinen des TRY 2024-Klimadatensatzes, die aktualisierten ortsgenauen Zukunfts-TRY, die in dieser Studie verwendet wurden, zu analysieren und ausgewählte Teile der Parameterstudie auf dieser Basis zu aktualisieren. Dies würde helfen, die angesprochene Ungewissheit zu verkleinern und eine bessere Einordnung der Ergebnisse zu ermöglichen.

Zusätzlich wird empfohlen, eine Qualitätssicherung für den TRY 2024-Klimadatensatzes mit dem Ziel durchzuführen, dass die ortsgenauen Klimadaten sicher für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes über thermische Simulation geeignet sind.

► Grundlagenwissen zum Gesundheitsschutz und Komfort

Das Schaffen einer wissenschaftlich fundierten Basis im Hinblick auf die Festlegung von Komfortbändern und -kategorien ist notwendig. Mindestanforderungen an den Gesundheitsschutz sollten festgelegt werden. Es gibt zahlreiche Forschungsarbeiten zu diesem Thema. Diese sollten zusammengetragen werden und durch eine breit angelegte Komfortstudie ergänzt werden. Zur Grundlagenforschung gehört auch zu klären, ob sich Komfortmaßstäbe beispielsweise wegen der Adaption des Menschen an den Klimawandel ändern.

Ferner fehlt beim Nachweis und bei der Bewertung die Möglichkeit die Wirkung von Luftbewegung zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 5.4.2.1). Auch hier wäre wichtig, die wissenschaftlichen Grundlagen noch weiter zu vertiefen.

Erst auf dieser wissenschaftlichen Basis kann eine Vereinheitlichung der Normen zum sommerlichen Wärmeschutz und Komfort gelingen und vor allem der Austausch zwischen Fachleuten und Laien verbessert werden.

► Monitoring

Die meisten Arbeiten zum sommerlichen Wärmeschutz basieren auf thermischen Simulationen. Wichtig ist, die Ergebnisse durch Messdaten zu überprüfen. Hierzu sind umfangreiche Messreihen zu Raum- und Außenlufttemperaturen in unterschiedlichen Nutzungstypen nötig.

Im Rahmen dieser Studie wird immer wieder darauf hingewiesen, dass die Energieeffizienz von Maßnahmen in die Diskussion und die Definition von passiven Maßnahmen einbezogen werden muss. Monitoring-Forschungsprojekte bezüglich dieser Thematik sind auf den Weg zu bringen, um Aussagen über die tatsächlichen Energieverbräuche verschiedener Konzepte von passiven und aktiven Kühlmaßnahmen zu erfassen und die entsprechende Weichenstellung im Sinne einer bestmöglichen Ressourceneffizienz stellen zu können. Auf dieser Grundlage könnten auch die Ergebnisse der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Energiebedarfsanalyse verifiziert und eingeordnet werden.

► Aufwand von Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz

Eine erste Einschätzung hinsichtlich technischen, energetischen und finanziellen Aufwands wurde im Rahmen dieser Studie vorgenommen. Detaillierte Analysen des Aufwands, der Langlebigkeit, Funktionssicherheit sowie von Praxiserfahrungen und Best-Practice-Beispielen fehlen jedoch. Wichtig wäre hierbei, die Maßnahmen auch hinsichtlich konkreter Überhitzungssituationen zu vergleichen. Es könnte sein, dass manche Maßnahmen genau dann wenig Sicherheit bieten, wenn er hinsichtlich Gesundheitsschutzes besonders nötig wäre. In diesen Vergleich sind passive und aktive Maßnahmen einzubeziehen, um die gesamte Bandbreite des mit Ihnen verbundenen Energiebedarfs abbilden zu können.

► Wissenstransfer

Nur wenn das Wissen bei Fachleuten und Gebäude-Nutzer*innen weit verbreitet ist, kann entsprechend gehandelt werden. Daher ist die Verbreitung von Informationen über den Zusammenhang zwischen Klimawandel und Raumtemperaturen, Gegenmaßnahmen und Nutzungsverhalten von großer Bedeutung. Dies kann beispielsweise über Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Tageszeitungen oder einschlägigen Internetplattformen erfolgen.

Gebäude sollen vor Umweltauswirkungen schützen. Wie viel Komfort sie bieten müssen und wie viel Energieeinsatz hierfür zugestanden wird, das sind die Dinge, die wir auch zukünftig ergründen und diskutieren müssen.

9 Quellenverzeichnis

- Becker, M. (2022): Ventilator-Test: Das sind die besten Windmaschinen. https://www.chip.de/artikel/Ventilator-Test-Das-sind-die-besten-Windmaschinen_138854924.html (15.06.2022)
- BEG (2022): Bundesförderung für effiziente Gebäude: Infoblatt zu den förderfähigen Maßnahmen und Leistungen, Version 5.0 (08/2022)
- BKI Baukosteninformationszentrum (Hrsg.) (2021): BKI Baukosten - Statistische Kostenkennwerte für Gebäude. Bauelemente Neubau, BKI GmbH, Stuttgart 2021
- BMUB [Hrsg.] (2017): Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), Unterrichtsgebäude: Soziokulturelle Qualität - Thermischer Komfort, Version 2018. https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebäude/neubau/v_2017/BNB_UN2017_311.pdf
- BMI [Hrsg.] (2015): Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Büro- und Verwaltungsgebäude: Ökonomische Qualität - Lebenszykluskosten. Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus (Version 2015 aktualisiert). https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/BNB_Steckbriefe_Buero_Neubau/aktuell/BNB_BN2015_211aktualisiert.pdf (01.04.2022)
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2011): Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse. https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/Testreferenzjahre/03_ergebnisse.html (10.03.2021)
- Bettgenhäuser, K.; Boermans, T.; Offermann, M.; Krechting, A.; Becker, D. (2011): Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- BNA 2021, Monitoringbericht 2021, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt, Dezember 2021
- Brasseur, G.; Jacob, D.; Schuck-Zöller, S. [Hrsg.] (2017): Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- Brune, M.; Bender, S.; Groth, M. (2017): Gebäudebegrünung und Klimawandel - Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Report 30, Climate Service Center Germany, Hamburg
- Bürger, V.; Hesse, T.; Palzer, A.; Köhler, B.; Herkel, S.; Engelmann, P.; Quack, D. (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 - Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand, CLIMATE CHANGE 26/2017, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [Hrsg.] (2011): Kommunale Strategien und Potentiale zum Klimawandel – Lokale Klimaanalysen, 39/2
- DBZ (2005): Hitzefrei? Deutsche Bauzeitung Nr.08/2005. <https://www.db-bauzeitung.de/allgemein/hitzefrei/> (12.8.22)
- DGNB [Hrsg.] (2018a): Soziokulturelle und funktionale Qualität SOC1.1 Thermischer Komfort. DGNB System - Kriterienkatalog Gebäude Neubau. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen GmbH, Version 2018 (mit letzter Änderung vom 27.7.2022). https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-system/de/gebaeude/neubau/kriterien/04_SOC1.1_Thermischer-Komfort.pdf
- DGNB [Hrsg.] (2018b): Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus: Ökonomische Qualität ECO1.1.DGNB System - Kriterienkatalog Gebäude Neubau, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen GmbH, Version 2018 (mit letzter Änderung vom 27.7.2022). https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-system/de/gebaeude/neubau/kriterien/03_ECO1.1_Gebaeudebezogene-Kosten-im-Lebenszyklus.pdf
- DGNB [Hrsg.] (2021): Soziokulturelle und funktionale Qualität SOC1.1 Thermischer Komfort. DGNB System - Kriterienkatalog Gebäude Sanierung, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen GmbH, Version 2021 (mit

letzter Änderung vom 27.7.2022). https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-system/de/gebaeude/sanierung/kriterien/DGNB-Kriterium-Gebaeude-Sanierung_SOC1_1_Thermischer_Komfort.pdf

Deutscher Wetterdienst (2007): Globalstrahlung – Die Energie der Sonne. https://www.rfsolar.eu/wp-content/uploads/DWD-Broschuere_Globalstrahlung-Die-Energie-der-Sonne.pdf (01.03.2021)

Deutscher Wetterdienst (2017): Handbuch - Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, Offenbach

Deutscher Wetterdienst (2019): Klimavorhersagen und Klimaprojektionen - Wie entstehen Aussagen über das zukünftige Klima? DWD (Hrsg.), Abteilung Klima und Umwelt, Offenbach, veröffentlicht 2017 (Stand Februar 2019)

Deutscher Wetterdienst (2020a): Deutscher Klimaatlas. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html (16.11.2020)

Deutscher Wetterdienst (2020b): Klimaberatungsmodul. Beratungskategorie Energie- und Bauwesen. <https://kunden.dwd.de/obt/index.jsp> (16.11.2020)

Deutscher Wetterdienst (2020c): Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2019. DWD, Geschäftsbereich Klima und Umwelt, Offenbach

Deutscher Wetterdienst (2021a): RCP-Szenarien. <https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/rcp-szenarien.html> (11.03.2021)

Deutscher Wetterdienst (2021b): Climate Data Center Portal. <https://cdc.dwd.de/portal/202204011005/mapview> (15.04.2021)

Deutscher Wetterdienst (2022a): Trend der Jahressummen der Globalstrahlung. https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/Trend_seit1991.html;jsessionid=F4C843DC05DCAD1DD5604B4BFF09FBEC.live21063?nn=16102 (25.07.2022)

Deutscher Wetterdienst (2022b): Erläuterungen zur Gefühlten Temperatur. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrenindizes/thermisch/gefuehltetemp.html> (25.07.2022)

DGNB e.V. [Hrsg.] (2018): Kriterienkatalog - Gebäude Neubau, Version 2018, Stuttgart

DIN 4108-2:2013-02, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

DIN EN 15251:2012-12 (zurückgezogen), Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; enthält DIN EN 15251 und Nationalen Anhang (NA)

DIN EN 16798-1:2022-03, Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6; Deutsche Fassung EN 16798-1:2019

DIN EN 16798-1:2022-03 NA, Nationaler Anhang – Kriterien für die Innenraumqualität, S. 4 – 19

DIN EN ISO 7730:2006-05, Ergonomie der thermischen Umgebung. Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. (ISO 7730:2005), Deutsche Fassung EN ISO 7730: 2005

DIN V 18599-7:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 7: Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau

Eberle, A. (2021): Langfristige Wirksamkeit und Klimarelevanz passiver Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz von Bürogebäuden, Masterarbeit, TU München

Fahrion, M.-S. (2015): Sommerlicher Wärmeschutz im Zeichen des Klimawandels – Anpassungsplanung für Bürogebäude, Dissertation, TU Dresden

Fahrion, M.-S. (2020): KLIBAU – Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens - Handlungsempfehlungen für Planer und Architekten, im Auftrag des BBSR, Stuttgart

Gagge, A., Stolwijk, J. and Nishi, Y. (1971) An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. ASHRAE Transactions, 77, S. 247 – 262

GERICS (2020): Klimawandel in Deutschlands Bundesländern. https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/maps_visualisation/check/index.php.de (16.11.2020)

Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz – GEG) vom 8. August 2020

Geetha, N.; Velraj, R. (2012): Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage – A review. In: Energy Education Science and Technology (29 (2), S. 913 – 946

Gossauer, E. (2008): Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden -Eine Feldstudie - Analyse von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Komfortparametern am Arbeitsplatz, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)

Kind, C.; Hauer, M.; Terenzi, A. (2021): Adaptation Standard - Analyse bestehender Normen auf Anpassungsbedarfe bezüglich Folgen des Klimawandels. Climate Change (56/2021), Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Hengstler, J.; Russ, M.; Stoffregen, A.; Hendrich, A.; Weidner, S.; Held, M.; Brie, A.-K. (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. Report 35 Climate Change, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Mai 2021

HeatResilientCity (2021): HeatResilientCity (HRC) - Hitzeresiliente Stadt- und Quartiersentwicklung in Großstädten – Bewohnerorientierte Wissensgenerierung und Umsetzung in Dresden und Erfurt und HeatResilientCity (HRC) II- Hitzeanpassung urbaner Gebäude- und Siedlungsstrukturtypen - Akteursorientierte Umsetzungsbegleitung zur Stärkung der Klimaresilienz und Gesundheitsvorsorge. <http://heatresilientcity.de/umsetzung/> (14.04.2021)

Höttges, K., Kempkes, C. (2009): Entwicklung einer Bewertungsmethodik für den sommerlichen Wärmeschutz auf der Basis des nach DIN V 18599 rechnerisch ermittelten Nutzkältebedarfs, Endbericht, im Auftrag des BBR, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart

Holm, A. (2021): Auswirkung der aktuellen Preissteigerung auf die Wirtschaftlichkeit energetischen Modernisierungsmaßnahmen: im Auftrag von: Bundesverband energieeffiziente Gebäudehülle (BuVEG), FIW München, Forschungsbericht FO-2021-12. https://buveg.de/wp-content/uploads/2021/11/FIW-Auswirkung-Preissteigerungseffekte-auf-energetische-Sanierungsmassnahmen_BuVEG-final_9.11.21.pdf, S. 8

Holm, A., Oschatz, B., Thamling, N. (2020): Analyse von spezifischen Dekarbonisierungsoptionen zur Erreichung der Energie- und Klimaziele 2030 und 2050 bei unterschiedlichen Wohn- und Nichtwohngebäudetypologien: Betrachtungen zur Energieeffizienz, erneuerbaren Energien und weiterer Dekarbonisierungsoptionen mit Blick auf die CO₂-Vermeidungskosten [Leistung gemäß Rahmenvertrag zur Beratung der Abteilung II des BMWi]. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/dekarbonisierungsoptionen-zum-erreichung-der-energie-und-klimaziele-2030-2050%20bei-wohn-und-nichtwohngebaeudetypologien.pdf?__blob=publication-File&v=10 (03.04.2022)

Holzer, P.; Hammer, R.; Moherndl, P.; Hofer, G.; Bachner, D.; Grim, M.; Lugmeyer, C.; Lampersberger, P. (2017): IEA Energie in Gebäuden und Kommunen (EBC) Annex 62: Ventilative Kühlung, In: Berichte aus Energie- und Umweltforschung 41a/2017, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie [Hrsg.], Wien, Kapitel 2 und 3

Hübener, H.; Bülow, K.; Fooker, C.; Früh, B.; Hoffmann, P.; Höpp, S.; Keuler, K.; Menz, C.; Mohr, V.; Radtke, K.; Ramthun, H.; Spekat, A.; Steger, C.; Toussaint, F.; Warrach-Sagi, K.; Woldt, M. (2017): Reklies-De – Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland. Ergebnisbericht.

IPCC (2014): Climate Change 2014 - Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri und L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf

Kahlenborn, W.; Porst, L.; Voß, M.; Fritsch, U.; Renner, K.; Zebisch, M.; Wolf, M.; Schönthaler, K.; Schauser, I. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Climate Change (26/2021), Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

KLIWA (2020): Grundlagen – Zukünftige Veränderungen. <https://www.kliwa.de/klima-grundlagen-zukunft.htm> (16.11.2020)

Kunze, S. (2019): Sommerliche Überhitzung in Wohngebäuden – Baukonstruktive und haustechnische Anpassungsmaßnahmen. 4. BIH-Treffen 2019 - Interdisziplinäre Forschung - Chancen und Herausforderungen, HTW Dresden, S. 19 – 27

Lain, M.; Zmrhal, V.; Hensen J. (2008): Low energy cooling of buildings in central Europe - case studies. In: International Journal of Ventilation, 7(1), S. 11 – 21

Maas, A., Schlitzberger, S. (2013): Thermisches und energetisches Verhalten von Gebäuden im Lichte des Klimawandels - Anforderungen und Lösungen für den Sonnenschutz, Endbericht, im Auftrag des BBSR, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart

Menard, M., Nutt, M., Keller, P. (2009): Sommerlicher Wärmeschutz bei Wohngebäuden in Holzbauweise - Messungen in acht MINERGIE Einfamilienhäusern, Schlussbericht, BFE, Bern

Meteonorm (2021), Global Meteorological Database, Version 8.0.3, 14.01.2021

Morbitzer, C.; von der Weide, P.; Schröter, A. (2015): „Simulationsbasierte Bewertung sommerlicher Bedingungen in Gebäuden“ In: Fouad, N. A. [Hrsg.]: Bauphysik-Kalender 2015 – Simulation- und Berechnungsverfahren, Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, S. 377 – 414

Offermann, M.; Lindner, S.; Reiser, M.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Kocher, D.; Bruse, M.; Cramer, L. (2022): Nachhaltige Gebäudeklimatisierung in Europa - Konzepte zur Vermeidung von Hitzeinseln und für ein behagliches Raumklima. Climate Change (30/2022), Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Passivhaus Institut [Hrsg.] (2001): Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser: Passivhaus Sommerfall, Protokollband Nr. 15, 2. Auflage, Darmstadt

PHPP (2015): Passivhaus Institut [Hrsg.], Passivhaus-Projektierungspaket (Version 9) - Das Energiebilanzierungs- und Planungstool, Darmstadt

Radermacher, A. (2019): Passive Kühlsysteme - Potenziale zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeverhaltens von Gebäuden und Bewertung am Beispiel der Sohlplattenkühlung, Dissertation, Universität Kassel

Remund, J., Müller, S., Schmutz, M., Barsotti, D., Graf, P., Cattin, R. (2020), Meteonorm Global Meteorological Database Version 8.0, Handbook part I: Software, Handbook part II: Theory, Meteotest AG, Bern

Rüdisser, D., Ferk, H. (2016): Sommerlicher Wärmeschutz im Klimawandel – Einfluss der Bauweise und weiterer Faktoren. Zuschnitt Attachment – Sonderthemen im Bereich Holz, Holzwerkstoff und Holzbau, Wien

Schlitzberger, S. (2014): Anpassung und Entwicklung von Planungswerkzeugen für den sommerlichen Mindestwärmeschutz und zur Komfortbewertung des Sommerfalls, Dissertation, Universität Kassel

Schmitteckert, L. (2022): Wirtschaftlichkeitsbewertung passiver Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz von Bürogebäuden auf Basis dynamisch-thermischer Gebäudesimulation, Masterarbeit, TU München

- Schönthaler, K.; von Andrian-Werburg, S.; Buth, M.; RÜth, P. (2019): Monitoringbericht 2019 zur deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Monitoringbericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe zur Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Schröder, F.; Gill, B.; Halbig, G.; Mittermüller, J.; Novotny, D.; Teich, T. (2019): Hitze frei in deutschen Wohnungen – Entwicklung deutscher Wohnraumtemperaturen mit intensiveren sommerlichen Hitzeperioden. In: HLH, 2019, BD. 70 NR.9, VDI Fachmedien, Düsseldorf
- Settembrini, G., Domingo-Irigoyen, S.; Heim, T.; Jurt, D.; Zakavorotnyi, A.; Seerig, A.; Zweifel, G.; Menti, U. (2017): ClimaBau – Planen angesichts des Klimawandels - Energiebedarf und Behaglichkeit heutiger Wohnbauten bis ins Jahr 2100, Schlussbericht, Hochschule Luzern
- Sherwood, S.; Huber, M. (2010): An adaptability limit to climate change due to heat stress. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 107, No. 21, S. 9552-9555, <https://doi.org/10.1073/pnas.0913352107> (03.05.2010)
- Spinoni, J., Vogt, J., Barbosa, P. (2015): European degree-day climatologies and trends for the period 1951–2011. In: International Journal of Climatology, 35 (2015), Royal Meteorological Society, S. 25 – 36
- Statista GmbH [Hrsg.] (2021a): Preisindex für die Wasserversorgungsgebühren in Deutschland in den Jahren 2015 bis 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/72113/umfrage/entwicklung-des-preisindex-fuer-wasserversorgung-in-deutschland-seit-2000/> (01.04.2022)
- Statista GmbH [Hrsg.] (2021b): Strompreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland in den Jahren 2011 bis 2021: (in Euro-Cent pro Kilowattstunde). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154902/umfrage/strompreise-fuer-industrie-und-gewerbe-seit-2006/#statisticContainer> (01.04.2022)
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2020): Entgelt für die Trinkwasser-Versorgung in Tarifgebieten1 nach Tariftypen 2017 bis 2019. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabelle/tw-07-entgelt-trinkwasserversorgung-tarifgeb-nach-tariftypen-2017-2019-land-bund.html> (01.04.2022)
- Strenziok, D. (2022): 13 unterschiedliche Deckenventilatoren im Vergleich - finden Sie Ihren besten Deckenventilator für angenehm gekühlte Zimmer - unser Test bzw. Ratgeber 2022. <https://www.stern.de/vergleich/deckenventilator/> (12.07.2022)
- Tado (2020): Deutsche Haushalte leiden im Sommer unter zu hohen Innenraumtemperaturen. <https://www.tado.com/t/de/deutsche-haushalte-leiden-im-sommer-unter-zu-hohen-innenraumtemperaturen/> (19.05.2020)
- Tartarini F.; Schiavon, S.; Cheung, T.; Hoyt, T. (2020): CBE Thermal Comfort Tool : online tool for thermal comfort calculations and visualizations. SoftwareX 12, 100563. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100563> Version: 2.4.3. https://comfort.cbe.berkeley.edu/fan_heatwaves (25.07.2022)
- Tartarini, F.; Schiavon, S., Jay, O., Arens, E.; Huizenga, C. (2022): Application of Gagge's Energy Balance Model to Determine Humidity-Dependent Temperature Thresholds for Healthy Adults Using Electric Fans During Heatwaves. In: Building and Environment 207. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108437> (26.05.2022)
- Technische Regeln für Arbeitsstätten: Raumtemperatur (ASR A3.5). Ausg. 6/2010; zul. geänd. GMBI (2018), S. 474
- Umweltbundesamt (2013): was sind die Ursachen von Klimaänderungen? <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-sind-die-ursachen-von-klimaaenderungen>, Beitrag vom 03.08.2013 (01.03.2021)
- Umweltbundesamt (2014): Zu erwartende Klimaänderungen bis 2100. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/zu-erwartende-klimaaenderungen-bis-2100>, Beitrag vom 28.11.2014 (22.04.2021)

Umweltbundesamt (2020): Klimafolgen Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimafolgen-deutschland> (16.11.2020)

Vecellio, D.; Wolf, T; Cottle, R.; Kenny L. (2022): Evaluating the 35°C wet-bulb temperature adaptability threshold for young, healthy subjects (PSU HEAT Project). In: Journal of applied physiology, Vol. 132, Issue 2, S. 340-345, <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00738.2021> (28.01.22)

VDI 2067:2012-09, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen: Grundlagen und Kostenberechnung (Blatt 1)

VDI 2078:2015-06, Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation) (VDI-Kühllastregeln)

Wiki Klimawandel (2021): Klimaszenarien - Unsicherheiten bei Klimaprojektionen. <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaszenarien> (09.03.2021)

Wirth, H. (2022): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Fraunhofer ISE, Fassung vom 1.5.2022. www.pv-fakten.de (02.06.2022)

Zimmermann, M. (1998): Planungsgrundlagen für die passive Raumkühlung. In: 10. Schweizerisches Status-Seminar Energieforschung im Hochbau, Bundesamt für Energiewirtschaft, Zürich