

CLIMATE CHANGE

30/2022

Abschlussbericht

Nachhaltige Gebäudeklimatisierung in Europa

**Konzepte zur Vermeidung von Hitzeinseln und für ein
behagliches Raumklima**

von:

Markus Offermann, Sigrid Lindner, Marco Reiser
Guidehouse Germany GmbH, Köln

Sibylle Braungardt, Veit Bürger, Daniel Kocher
Öko-Institut e.V., Freiburg

Michael Bruse, Laura Cramer
ENVI_MET, Essen

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 30/2022

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

Forschungskennzahl FKZ 3718 15 004 0
FB000821

Abschlussbericht

Nachhaltige Gebäudeklimatisierung in Europa

Konzepte zur Vermeidung von Hitzeinseln und für ein
behagliches Raumklima

von

Markus Offermann, Sigrid Lindner, Marco Reiser
Guidehouse Germany GmbH, Köln

Sibylle Braungardt, Veit Bürger, Daniel Kocher
Öko-Institut e.V., Freiburg

Michael Bruse, Laura Cramer
ENVI_MET, Essen

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](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Guidehouse Germany GmbH
Am Wassermann 36
50829 Köln

Abschlussdatum:

Mai 2021

Redaktion:

Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen
Dr. Daniel de Graaf

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Juni 2022

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

Kurzbeschreibung

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Urbanisierung und des Klimawandels ist es Ziel der vorliegenden Studie, klimagerechte Lösungen für den zunehmenden sommerlichen Hitzestress in innerstädtischen Quartieren zu identifizieren und deren Wirkungen zu quantifizieren. Dabei wird sowohl das Mikroklima als auch das Innenraumklima der Gebäude im Quartier berücksichtigt. Im Fokus stehen dabei sowohl Bestandsquartiere als auch innerstädtische Nachverdichtungen und Neubauquartiere. Für fünf reale Quartiere (in Hamburg, Köln, Frankfurt, Tunis und Madrid) wurden verschiedene Lösungsoptionen anhand von umfangreichen Simulationsberechnungen untersucht. Um den Einfluss der Mikroklimamaßnahmen auf das Innenraumklima zu bestimmen, wurden erstmalig Mikroklimasimulationen über ein komplettes Referenzjahr durchgeführt und die Ergebnisse als Eingangsdaten für dynamisch thermische Gebäudesimulationen verwendet. Die dabei als wirksam nachgewiesenen natürlichen (Begrünung) und technischen Lösungen auf Quartiers- und Gebäudeebene sind übertragbar auf andere innerstädtische Quartiere in Deutschland, Südeuropa und der MENA-Region. Im Rahmen der Studie wurden außerdem Interviews und Diskussionen mit relevanten Akteuren durchgeführt, um vorhandene Hindernisse und Defizite bei der Umsetzung der möglichen Lösungen zu identifizieren. Darauf aufbauend konnten wirksame und zielgerichtete Handlungsvorschläge zur Verbesserung des bestehenden Anreizsystems ausgearbeitet werden. Mit den Erkenntnissen aus den Simulationsberechnungen und den daraus abgeleiteten praxisrelevanten Handlungsvorschlägen liefert das Projekt einen wichtigen Beitrag, um dem sich verschärfenden Problem der städtischen Hitzeinseln und der damit verbundenen Beeinträchtigung der Lebensqualität entgegenzuwirken. Auch der Gefährdung der Klimaschutzziele durch zusätzlichen Energiebedarf für Klimatisierung kann auf dieser Basis zielgerichtet und fundiert begegnet werden.

Abstract

Against the backdrop of increasing urbanisation and climate change, the objectives of the present study is to identify climate-consistent solutions for the increasing summer heat stress in urban neighbourhoods and to quantify their effects. Both the microclimate and the indoor climate of buildings in the neighbourhood are considered. The focus is on existing neighbourhoods as well as inner-city redensification and new-build neighbourhoods. To this end, various solution options were investigated for five selected real neighbourhoods (in Hamburg, Cologne, Frankfurt, Tunis, and Madrid) using extensive simulation calculations. To determine the influence of the microclimate measures on the indoor climate, microclimate simulations were carried out for the first time over a complete reference year. The results were used as input data for dynamic thermal building simulations. The natural (greening) and technical solutions on the district and building level proven to be effective are transferable to other inner-city neighbourhoods in Germany, Southern Europe, and the MENA region. The project also included discussions with relevant stakeholders to identify existing obstacles and shortcomings in the implementation of possible solutions. Based on this, effective and target-oriented proposals for actions to improve the existing incentive system could be developed. With the findings from the simulation calculations and the derived practice-relevant proposals for action, the project makes an important contribution to counteracting the worsening problem of urban heat islands and the associated impairment of the quality of life. Furthermore, these findings provide for easing the threat to climate protection goals through additional energy demand for air conditioning in a targeted and well-founded manner.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	16
Glossar	17
Abkürzungsverzeichnis	18
Zusammenfassung	19
Summary	28
1 Grundlagen und Wissensstand	36
1.1 Urbane Hitzeinseln und ihre Ursachen	36
1.2 Klimaresiliente und klimaneutrale Gebäude: Stand der Technik	38
1.2.1 Methodik	38
1.2.2 Steckbriefe Beispielgebäude	39
1.2.2.1 Tropisches Klima (inkl. Wüstenklima)	39
1.2.2.2 Subtropisches Klima	41
1.2.2.3 Gemäßigtes Klima	43
1.2.3 Zusammenfassende Bewertung der Beispielgebäude	46
1.2.4 Extraktion und Zusammenfassung klimaneutraler Konzepte zur Sicherstellung eines klimaresilienten Komforts in Gebäuden	50
1.2.5 Systematisierung der Ergebnisse	51
1.3 Klimaresiliente Quartiere: Stand der Technik	53
1.3.1 Erstellung eines Analyserasters	53
1.3.2 Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln	53
1.3.3 Systematisierung der Ergebnisse	55
1.4 Praxisbeispiele zur Vermeidung von Hitzeinseln	57
1.4.1 Entwicklung von Quartiersteckbriefen	57
1.4.2 Auswahl der Praxisbeispiele	58
1.4.3 Erstellung der Steckbriefe	59
1.4.3.1 Steckbriefe der Beispielquartiere in Deutschland	60
1.4.3.2 Steckbriefe der südeuropäischen und subtropischen Quartiere	65
2 Erstellung optimierter Quartierskonzepte	71
2.1 Maßnahmenpakete für UHIE-optimierte Quartierskonzepte	71
2.1.1 Empfohlenes Maßnahmenpaket	72
2.1.1.1 Maßnahmenpaket für hitzeresiliente Quartiere	72

2.1.1.2	Maßnahmen für klimaneutrale- und klimaresiliente Gebäude	72
2.2	Simulationsgestützter Wirksamkeitsnachweis der Maßnahmenpakete für ausgewählte Quartiere	75
2.2.1	Grundlegendes zur Modellierung	75
2.2.1.1	Simulation des Mikroklimas.....	75
2.2.1.2	Gebäudesimulationen	78
2.2.2	Quartiersauswahl.....	79
2.2.2.1	Bestandquartier Tunis.....	79
2.2.2.2	Neubauquartier Madrid.....	80
2.2.2.3	Neubauquartier Köln	80
2.2.2.4	Bestandsquartier Hamburg.....	80
2.2.2.5	Nachverdichtungsquartier Frankfurt am Main.....	80
2.2.3	Bestandsquartier Tunis - El Aouina	81
2.2.3.1	Lage und Beschreibung	81
2.2.3.2	Klima	84
2.2.3.3	Mikroklimasimulation	85
2.2.3.4	Gebäudesimulation.....	91
2.2.4	Neubauquartier <i>Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles</i> in Madrid.....	103
2.2.4.1	Lage und Beschreibung	103
2.2.4.2	Klima	106
2.2.4.3	Mikroklimasimulation	107
2.2.4.4	Gebäudesimulation.....	113
2.2.5	Neubauquartier Köln-Clouth.....	122
2.2.5.1	Lage und Beschreibung	122
2.2.5.2	Klima	124
2.2.5.3	Mikroklimasimulation	125
2.2.5.4	Gebäudesimulation.....	134
2.2.6	Bestandsquartier Hamburg Eimsbüttel - Generalsviertel (Gründerzeit-Blockrandbebauung).....	145
2.2.6.1	Lage und Beschreibung	145
2.2.6.2	Klima	147
2.2.6.3	Mikroklimasimulation	148
2.2.6.4	Gebäudesimulation.....	155
2.2.7	Nachverdichtungsquartier Campo Bornheim in Frankfurt am Main.....	163

2.2.7.1	Lage und Beschreibung	163
2.2.7.2	Klima	165
2.2.7.3	Mikroklimasimulation	166
2.2.7.4	Gebäudesimulation.....	170
2.2.8	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Simulationen.....	183
2.2.8.1	Mikroklimasimulationen.....	183
2.2.8.2	Gebäudesimulationen	184
3	Akteursanalyse und Workshops.....	186
3.1	Literaturrecherche	186
3.1.1	Akteursanalyse und Zuständigkeiten.....	186
3.1.2	Stellenwert des Themas.....	187
3.1.3	Datengrundlage und Planungstools.....	188
3.2	Leitfadenbasierte Interviews	189
3.2.1	Durchgeführte Maßnahmen	189
3.2.2	Hemmnisse	191
3.2.3	Vorschläge und Handlungsoptionen.....	193
3.3	Experten-Workshop	195
4	Vorschläge zur Anpassung des rechtlichen Rahmens und weiterer Instrumente	197
4.1	Überwindung der Hindernisse für natürliche Kältemittel	197
4.2	Wirtschaftlichkeitsgebot und sommerlicher Wärmeschutz im GEG	199
4.2.1	Ausgangslage	199
4.2.2	Beurteilung.....	199
4.2.3	Verbesserungsvorschlag	199
4.3	Schärfung der ordnungsrechtlichen Anforderungen zur Begrenzung des Kühlenergiebedarfs von Gebäuden	200
4.3.1	Ausgangslage	200
4.3.1.1	Aktuelle Berücksichtigung GEG.....	200
4.3.2	Beurteilung.....	200
4.3.2.1	Wohngebäude	200
4.3.2.2	Nichtwohngebäude	201
4.3.3	Verbesserungsvorschläge	201
4.3.3.1	Wohngebäude	201
4.3.3.2	Nichtwohngebäude	201
4.4	Praxishilfe für Prüfbehörden.....	201

4.4.1	Ausgangslage	202
4.4.2	Ziel.....	202
4.4.3	Vorschlag einer Checkliste	202
4.5	BEG: Vorschlag zur Berücksichtigung von natürlichen Kältemitteln (Bonus-Regelung)	204
4.5.1	Ausgangslage	204
4.5.2	Verbesserungsvorschlag	205
4.6	Definition erneuerbarer Kühlung im Rahmen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU	205
4.6.1	Ausgangslage	205
4.6.2	Optionen für die Definition erneuerbarer Kälte	206
4.6.2.1	Option 1: Mindestanforderungen an die Energieeffizienz	206
4.6.2.2	Option 2: Mindestanforderungen an die Temperatur der Wärmesenke.....	207
4.6.2.3	Option 3: Anforderung an die Art der Wärmesenke	207
4.6.3	Schlussfolgerungen	207
4.7	Ausarbeitungen zur Forderung eines Stadtklimaneutralitäts-Nachweises in Umweltverträglichkeitsprüfungen für neue Quartiere.....	208
4.7.1	Ausgangslage	208
4.7.2	Verbesserungsvorschlag	208
4.8	Handlungsvorschläge für die Konkretisierung der Auswirkungen des Mikroklimas auf die Stadtplanung.....	209
4.8.1	Ausgangslage	209
4.8.2	Verbesserungsvorschläge	209
4.9	Anwendung eines Grünflächenfaktors GFF (wie Grundflächenzahl (GRZ) und Geschossflächenzahl (GFZ))	210
4.9.1	Ausgangslage	210
4.9.2	Umsetzungsbeispiele	211
4.9.2.1	Berlin.....	211
4.9.2.2	Malmö.....	212
4.9.2.3	Wien.....	212
4.9.3	Beurteilung.....	213
4.10	Good Practice-Beispiele zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen auf kommunaler Ebene	214
4.10.1	Konversionsfläche Spinelli Barracks in Mannheim	214
4.10.2	Ostpark Bochum	215
4.10.3	Quartier Herzkamp Hannover.....	215

4.10.4	Fazit.....	216
A	Anhang	217
A.1	Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln.....	217
A.2	Interviewleitfaden.....	227
A.3	Farbtafeln Mikroklimasimulationen	228

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht des Vorgehens zur Analyse der Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln	53
Abbildung 2: Übersicht des Vorgehens zur Untersuchung von Praxisbeispielen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln	57
Abbildung 3: Wärmeempfinden auf der PET-Skala	77
Abbildung 4: Lage des Quartiers El Aouina in Tunis	81
Abbildung 5: Gebäudetypen des Quartiers El Aouina in Tunis	82
Abbildung 6: Straßenansichten des Quartiers - El Aouina in Tunis	83
Abbildung 7: Monatswerte der Außentemperatur Tunis (Flughafen)	84
Abbildung 8: Monatswerte der Globalstrahlung und Außentemperatur Tunis (Flughafen)	84
Abbildung 9: Modellgebiet des Quartiers El Aouina (Status Quo) in Tunis als Aufsicht und 3D-Ansicht	85
Abbildung 10: Standardisierte Gebäudegeometrien	86
Abbildung 11: Verteilung des PET-Wertes in Tunis am 22. Juli um 16:00 Uhr für den Status Quo	87
Abbildung 12: Verteilung des PET-Wertes in Tunis am 14. Januar um 16:00 Uhr für den Status Quo	87
Abbildung 13: Modellgebiet der optimierten Variante als Aufsicht und 3D-Ansicht	88
Abbildung 14: Veränderung des PET-Wertes in Tunis am 22. Juli um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen	89
Abbildung 15: Veränderung des PET-Wertes in Tunis am 14. Januar um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen	90
Abbildung 16: Auswahl der Referenzgebäude auf der Grundlage der digitalisierten Gebäudestrukturen	92
Abbildung 17: Zuordnung der Referenzgebäude zu den digitalisierten Gebäuden	93
Abbildung 18: Übersicht zur Zuordnung von Nummern und Symbolen inklusive Beschreibung der Charakteristik	94
Abbildung 19: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Gebäudesimulation	96
Abbildung 20: Nutzenergiebedarf aller untersuchten Referenzgebäude der Variante Status Quo 2	96
Abbildung 21: Endenergiebedarf der Referenzgebäude für Heizen, Warmwasser und Kühlen der Variante Status Quo 2	97
Abbildung 22: Vergleich Kühlenergiebedarf der Szenarien „Status Quo“ (SQ2) und „Optimiert“ (Opt2)	98
Abbildung 23: Vergleich Heizenergiebedarf der Szenarien „Status Quo“ (SQ2) und „Optimiert“ (Opt2)	98
Abbildung 24: Vergleich Endenergieverbrauch (inkl. Heizen, Kühlen, Warmwasser und Haushaltsstrombedarf) der Szenarien „Status Quo“ (SQ2) und „Optimiert“ (Opt2)	99
Abbildung 25: Durchschnittliche Veränderung des PPD-Faktors nach den Optimierungsmaßnahmen im Quartier (Variante Opt1, ohne Kühlung)	100
Abbildung 26: Transformation zu einem klimaneutralen Quartier: Spezifischer Endenergieverbrauch (Strom) des Quartiers	101
Abbildung 27: Lage des Neubauquartiers Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles in Madrid (siehe Roter Kreis)	103

Abbildung 28: Lageplan Naubauquartier Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles in Madrid, Modellgebiet (blau umrandet)	104
Abbildung 29: Ansicht Gebäude Nr.1	104
Abbildung 30: Referenzgebäude Nr.2	105
Abbildung 31: Referenzgebäude Nr.3	105
Abbildung 32: Monatswerte der Außentemperatur Madrid	106
Abbildung 33: Monatswerte der Globalstrahlung und Außentemperatur Madrid	106
Abbildung 35: Modell des Ist-Zustandes des Neubaugebiet Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles in Madrid als Aufsicht und 3D-Ansicht	107
Abbildung 36: Unterschiedliche thermische Bereiche in Madrid (Status Quo) am Beispiel Juli, 04:00 Uhr	108
Abbildung 36: Verteilung des PET-Wertes in Madrid am 07. Juli um 16:00 Uhr für den Status Quo ..	109
Abbildung 37: Verteilung des PET-Wertes in Madrid am 21. Januar um 16:00 Uhr für den Status Quo	109
Abbildung 38: Modell des optimierten Szenarios des Neubaugebiet Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles in Madrid als Aufsicht und 3D-Ansicht	110
Abbildung 39: Thermisches Verhalten der Gebäudeblöcke in Madrid im März (oben) und Juli (unten) jeweils um 04:00 Uhr	111
Abbildung 40: Veränderung des PET-Wertes in Madrid am 07. Juli um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen	112
Abbildung 41: Veränderung des PET-Wertes in Madrid am 21. Januar um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen	113
Abbildung 42: Lage der Referenzwohnungen im Quartier im Ausgangszustand (Status Quo)	114
Abbildung 43: Lage der Referenzwohnungen im Quartier im optimierten Quartier	114
Abbildung 44: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Kühlung der Referenzwohnungen der Varianten SQ1 (Ausgangszustand) und SQ2 (optimiertes Quartier)	118
Abbildung 45: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Heizung der Referenzwohnungen der Varianten SQ1 (Ausgangszustand) und SQ2 (Optimiertes Quartier)	118
Abbildung 46: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Kühlung der Referenzwohnungen der Varianten Satus Quo 2, Optimiert 1 und Optimiert 2	119
Abbildung 47: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Heizung der Referenzwohnungen der Varianten Status Quo 2, Optimiert 1 und Optimiert 2	119
Abbildung 48: Vergleich des Endenergiebedarfs der Referenzwohnungen der Varianten Status Quo 2, Optimiert 1 und Optimiert 2	120
Abbildung 49: Aufteilung des Endenergiebedarfs am Beispiel der Variante Status Quo 2	120
Abbildung 50: Vergleich des Endenergiebedarfs der Quartiersvarianten	121
Abbildung 51: Lage des Clouth-Quartiers in Köln (siehe roter Kreis)	122
Abbildung 52: Lageplan Clouth-Quartier	123
Abbildung 53: Straßenansicht im Clouth-Quartier	123
Abbildung 54: Monatswerte der Außentemperatur Köln	124
Abbildung 55: Monatswerte der Globalstrahlung und Außentemperatur Köln	125
Abbildung 56: Modellgebiet Köln (Status Quo) als Aufsicht und 3D-Ansicht	125
Abbildung 57: Verteilung des PET-Wertes in Köln am 25. Juli um 16:00 Uhr für den Status Quo	126

Abbildung 58: Verteilung des PET-Wertes in Köln am 18. Januar um 16:00 Uhr für den Status Quo	127
Abbildung 59: Modellgebiet der optimierten Variante als Aufsicht und 3D-Ansicht	128
Abbildung 60: Differenz der Lufttemperatur zwischen Status Quo und optimierter Variante im Juli	129
Abbildung 61: Verteilung des PET-Wertes in Köln am 25. Juli (16:00 Uhr) für das optimierte Szenario	130
Abbildung 62: Verteilung des PET-Wertes in Köln am 18. Januar (16:00 Uhr) für das optimierte Szenario	131
Abbildung 63: Vergleich der PET-Verteilung zwischen dem Status Quo (Linie) und dem optimierten Szenario (Balken) im Winter	132
Abbildung 64: Ausschnitt des Modellgebietes zur Teilsimulation ohne Vegetation (A) und mit Vegetation (B)	133
Abbildung 65: Lufttemperaturunterschiede [K] vor der Fassade eines Gebäudes	134
Abbildung 66: Qualitative Darstellung zur Positionierung und Ausrichtung der Wohnungen und Zonen in den Gebäudeblocks im Szenario Status Quo	135
Abbildung 67: Lage der Referenzwohnungen im Quartier im Ausgangszustand (Status Quo) rot: Dachgeschoss, blau: Mittelgeschoss, grün: Erdgeschoss	136
Abbildung 68: Lage der Referenzwohnungen im optimierten Quartier	137
Abbildung 69: Nutzenergiebedarf der Referenzwohnungen im Ausgangszustand (Variante SQ2)....	139
Abbildung 70: Endenergieverbrauch der Referenzwohnungen im Ausgangszustand (Variante SQ2)	139
Abbildung 71: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Heizen zwischen Ausgangszustand (SQ 2) und optimiertem Quartier (Optimiert 2)	140
Abbildung 72: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Kühlen zwischen Ausgangszustand (SQ 2) und Optimiertem Quartier (Optimiert 2)	141
Abbildung 73: Vergleich der Überhitzungsstunden im Wohn-/Essbereich einzelner Wohnungen....	141
Abbildung 74: Vergleich der Überhitzungsstunden in Schlaf- und Kinderzimmer	142
Abbildung 75: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der Varianten für das optimierte Quartier	143
Abbildung 76: Lage des Generalsviertels in Hamburg Eimsbüttel	145
Abbildung 77: Lage des Generalsviertels in Hamburg Eimsbüttel im Hamburger Norden (roter Kreis)	145
Abbildung 78: Lage des Auswertungsgebietes	146
Abbildung 79: Luftaufnahme der Gebäude im Modellgebiet	146
Abbildung 80: Gebäudeansichten	147
Abbildung 81: Monatswerte der Außentemperatur Hamburg	147
Abbildung 82: Monatswerte der Globalstrahlung und Außentemperatur Hamburg	148
Abbildung 83: Modellgebiet des Generalsviertels (Status Quo) in Hamburg als Aufsicht und 3D-Ansicht.	148
Abbildung 84: Verteilung des PET-Wertes in Hamburg am 09. Juli um 16:00 Uhr für den Status Quo	149
Abbildung 85: Verteilung des PET-Wertes in Hamburg am 22. Januar um 16:00 Uhr für den Status Quo	150
Abbildung 86: Modellgebiet der optimierten Variante als Aufsicht und 3D-Ansicht	152
Abbildung 87: Einmischung der an den Dachflächen abgekühlten Luft in die unteren Luftschichten	153

Abbildung 88: Veränderung des PET-Wertes in Hamburg am 09.Juli um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen	154
Abbildung 89: Lage der Referenzwohnungen im Quartier	156
Abbildung 90: Vergleich der Überhitzungsstunden der Zone Wohnbereich für die Varianten SQ1 (Ausgangszustand) und SQ2 (Optimiertes Quartier)	159
Abbildung 91: Vergleich der Überhitzungsstunden der Zone Schlafbereich für die Varianten SQ1 (Ausgangszustand) und SQ2 (Optimiertes Quartier)	160
Abbildung 92: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Heizung der Referenzwohnungen der Varianten SQ1 (Ausgangszustand) und SQ2 (Optimiertes Quartier)	160
Abbildung 93: Vergleich der Überhitzungsstunden der Zone Wohnbereich für die Varianten SQ1, SQ2, Opt1 und Opt2	161
Abbildung 94: Vergleich der Überhitzungsstunden der Zone Schlafbereich für die Varianten SQ1, SQ2, Opt1 und Opt2	161
Abbildung 95: Vergleich der CO ₂ -Emissionen einzelner Quartiersvarianten	162
Abbildung 96: Lage des Quartiers „Campo Bornheim“ in Frankfurt (roter Kreis)	163
Abbildung 97: Lage des Untersuchungsgebietes (rotes Rechteck)	164
Abbildung 98: Ansicht Blockrandbebauung Bestandsgebäude	164
Abbildung 99: Ansicht Neubauten	165
Abbildung 100: Monatswerte der Außentemperatur Frankfurt (Prognosewerte für 2050)	165
Abbildung 101: Monatswerte der Außentemperatur und Strahlung Frankfurt (Prognosewerte für 2050)	166
Abbildung 102: Modellgebiet in Frankfurt (Status Quo) als Aufsicht und 3D-Ansicht	166
Abbildung 103: Verteilung des PET-Wertes in Frankfurt am 01. Juli um 16:00 Uhr für den Status Quo	167
Abbildung 104: Verteilung des PET-Wertes in Frankfurt am 22. Januar um 16:00 Uhr für den Status Quo	168
Abbildung 105: Modellgebiet der optimierten Variante als Aufsicht und 3D-Ansicht	168
Abbildung 106: Veränderung des PET-Wertes in Frankfurt am 01. Juli um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen	169
Abbildung 107: Veränderung des PET-Wertes in Frankfurt am 22. Januar um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen	170
Abbildung 108: Lage der Referenzwohnungen im Quartier	171
Abbildung 109: Nutzenergiebedarf der Wohnungen der Variante SQ2 (mit Gebäudekühlung) des Frankfurter Quartiers	176
Abbildung 110: Endenergiebedarf der Wohnungen der Variante SQ2 (mit Gebäudekühlung) des Frankfurter Quartiers	177
Abbildung 111: Vergleich der Überhitzungsstunden (> 27 °C) im Wohn- und Essbereich der Wohnungen im Frankfurter Quartier	178
Abbildung 112: Vergleich der Überhitzungsstunden (> 27 °C) in den Schlaf- und Kinderzimmern der Wohnungen im Frankfurter Quartier	178
Abbildung 113: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Heizung der Wohnungen im Frankfurter Quartier	179

Abbildung 114: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Kühlung der Wohnungen im Frankfurter Quartier	180
Abbildung 115: Vergleich der CO ₂ -Emissionen verschiedener Varianten.....	181
Abbildung 116: Übersicht des Vorgehens zum Austausch mit Praxisakteuren.	186
Abbildung 117: Anzahl an deutschsprachigen Publikationen zum Thema urbane Hitzeinseln.	187
Abbildung 118: Übersicht der Veröffentlichungszeitpunkte von Klimaanpassungsplänen in Städten.	188
Abbildung 119: Tafel_1_a_Tunis_SQ	228
Abbildung 120: Tafel_1_b_Tunis_OPT	229
Abbildung 121: Tafel_1_c_Tunis_Detail.....	230
Abbildung 122: Tafel_2_a_Madrid_SQ	231
Abbildung 123: Tafel_2_b_Madrid_OPT.....	232
Abbildung 124: Tafel_2_c_Madrid_Detail	233
Abbildung 125: Tafel_3_a_Koeln_04h	234
Abbildung 126: Tafel_3_b_Koeln_16h	235
Abbildung 127: Tafel_3_c_Koeln_Detail	236
Abbildung 128: Tafel_4_a_Hamburg_SQ.....	237
Abbildung 129: Tafel_4_b_Hamburg_OPT.....	238
Abbildung 130: Tafel_4_c_Hamburg_Detail	239
Abbildung 131: Tafel_5_a_Frankfurt_SQ.....	240
Abbildung 132: Tafel_5_b_Frankfurt_OPT.....	241
Abbildung 133: Tafel_5_c_Frankfurt_Detail	242

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Maßnahmen zur Sicherstellung eines klimaresilienten Komforts in klimaneutralen Gebäuden	20
Tabelle 2: Übersicht der betrachteten Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln	22
Tabelle 3: Overview of measures to ensure climate-smart comfort in climate-neutral buildings	29
Tabelle 4: Overview of the measures considered to avoid urban heat islands.	30
Tabelle 5: Zusammenfassende Bewertung der Beispielgebäude	47
Tabelle 6: Übersicht der Maßnahmen zur Sicherstellung eines klimaresilienten Komforts in klimaneutralen Gebäuden	50
Tabelle 7: Systematisierung der Konzepte zur Sicherstellung eines klimaresilienten Komforts in Gebäuden Legende: x = geeignet; (x) bedingt geeignet; - ungeeignet.....	52
Tabelle 8: Übersicht der betrachteten Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln	54
Tabelle 9: Übersicht der betrachteten Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln	56
Tabelle 10: Übersicht der betrachteten Quartiere in Deutschland.	58
Tabelle 11: Übersicht der betrachtenden Quartiere in Südeuropa und der MENA-Region	59
Tabelle 12: Übersicht über die ausgewählten Simulationstage	76
Tabelle 13: Referenzgebäudetypen in Tunis	91
Tabelle 14: Definition der Varianten – Status Quo (SQ).....	94
Tabelle 15: Definition der Szenarien – Optimierte Quartier	95
Tabelle 16: Übersicht der untersuchten Varianten für das Quartier in Madrid	116
Tabelle 17: Übersicht der untersuchten Varianten für das Kölner Quartier.....	138
Tabelle 18: Übersicht der untersuchten Varianten für das Hamburger Quartier.....	158
Tabelle 19: Übersicht der untersuchten Varianten für das Frankfurter Quartier.....	174
Tabelle 20: Zuständigkeiten für die Umsetzung von Maßnahmen zur Vermeidung urbaner Hitzeinseln	186
Tabelle 21: Maßnahmen auf der Planungsebene	189
Tabelle 22: Maßnahmen in der Praxis.....	190
Tabelle 23: Hemmnisse	191
Tabelle 24: In den Interviews genannte Vorschläge zur Verbesserung der Handlungsoptionen	193
Tabelle 25: Entwurf Checkliste zur Prüfung des sommerlichen Wärmeschutzes bei Bauanträgen ...	202
Tabelle 26: Zielwerte für den Biotopflächenfaktor (BFF) in Berlin.....	211
Tabelle 27: Übersicht der Freiraumtypen in der Wiener Grün- und Freiraumplanung	213

Glossar

Albedo	Anteil von einer Oberfläche reflektierten Solarstrahlung in Bezug auf die Einstrahlung
Beschattung	Von Objekten (z. B. Bäumen oder Gebäuden) verursachte Abschattung
Effizienzhaus 55 bzw. 40-Standard	Energiestandard von Gebäuden. Die Ziffer beschreibt dabei das Verhältnis des energiebezugsflächenspezifischen Primärenergiebedarfs bezogen auf den des Referenzgebäudes im Gebäudeenergiegesetz (GEG) in Prozent
Evapotranspiration	Summe der Verdunstung von Wasser, die von Lebewesen, insbesondere Vegetation, sowie von Boden- und Wasseroberflächen abgegeben wird
fc-Wert	Abminderungsfaktor des Solarenergieeintrags durch Verschattungseinrichtungen
g-Wert	Abminderungsfaktor des Solarenergieeintrags bei Verglasungen
Globalstrahlung	Gesamte auf eine horizontale Fläche treffende Solarstrahlung
Infiltration	Unkontrollierte Lüftung durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle
Low Exergy-Systeme	Heizsysteme mit niedrigen Systemtemperaturen, bzw. Kühlsysteme mit hohen Systemtemperaturen
Quartier	Als Quartier im Rahmen der folgenden Untersuchungen wird ein zusammenhängendes städtisches Mischnutzungsgebiet (Hauptnutzung: Wohnen) mit einer hohen Bebauungsdichte verstanden. Typische Abmessungen sind 500 m * 500 m
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient von Bauteilen
Verschattung	Abminderung des direkten Sonneneinstrahlungseintrags in Gebäude durch Sonnenschutzvorrichtungen bzw. Verschattungselemente
VRF-Klimaanlage	Multisplit-Klimaanlage mit variablem Kältemittelmassenstrom (VRF= <i>Variable Refrigerant Flow</i>)

Abkürzungsverzeichnis

A/V	Verhältnis Gebäudehüllfläche zu Gebäudevolumen
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BFF	Biotopflächenfaktor
CEEB	Energieeffizienzstandard
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
EFH	Einfamilienhaus
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GF	Geschossfläche
GFF	Grünflächenfaktor
GRZ	Geschossflächenzahl
GFZ	Grundflächenzahl gem. BauNVO
HFKW	Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (klimaschädliche Kältemittel)
HFO	Hydrofluorolefine (umweltschädliche Kältemittel)
HQE	Haute Qualité Environmentale - französische Zertifizierung für nachhaltiges Bauen
IEA	International Energy Agency (Internationale Energieagentur)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
MENA	Middle East and North Africa
NECP	Nationaler Energie- und Klimaplan
PET	Physiological Equivalent Temperature
PHI	Passivhaus Institut
PHPP	Passivhausprojektierungspaket (Excel-basiertes Berechnungstool)
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied (vorhergesagter Anteil Unzufriedener) nach ISO 7730. Der PPD steigt mit zunehmender Unbehaglichkeit. Gem. Definition sind 5 % immer unzufrieden
RED	Renewable Energy Directive (Erneuerbaren-Energien-Richtlinie der EU)
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio (Effizienzparameter einer Klimaanlage)
SFP	Specific Fan Power (Effizienzparameter einer Lüftungsanlage)
SRI	Solar Reflectance Index
t_{imax}	Maximale Innenraumtemperatur
TRNSYS	Transient System Simulation Tool (Gebäudesimulationssoftware)
UHIE	Engl. Urban Heat Island Effect: Urbaner Hitzeinseleffekt
VERDE	Nachhaltigkeitszertifikat
WRG	Wärmerückgewinnung
WW	Warmwasser
ZUB	Zentrum für Umweltbewusstes Bauen

Zusammenfassung

Motivation des Projektes

Bedingt durch den Klimawandel, das Bevölkerungswachstum und fortschreitende Urbanisierung wird die sommerliche Überhitzung zu einem zunehmenden Problem für Städte. Betroffen von der Überhitzung sind sowohl die Aufenthaltsbereiche im Stadtraum (Urbaner Hitzeinseleffekt) als auch das Raumklima in Wohn- und Arbeitsräumen.

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist es das Verständnis über die Ursachen, die Zusammenhänge und Lösungsmöglichkeiten zur Vermeidung bzw. Begrenzung der Überhitzung zu verbessern.

Dabei soll die Effektivität und Klimaresilienz von unterschiedlichen Maßnahmen zur Minderung des Hitzeinseleffektes sowie der sommerlichen Überhitzung in Gebäuden quantifiziert werden. Diese sind stark abhängig von den lokalen Gegebenheiten.

Für Innenräume stellt sich außerdem die Frage, ob -und falls ja- unter welchen Bedingungen auch perspektivisch auf eine aktive Kühlung (und damit auch dem Einsatz von klimaschädlichen HFKW-Kältemitteln) verzichtet werden kann. Falls zur Gewährleistung eines sommerlichen Minimalkomforts eine aktive Kühlung unverzichtbar ist, gilt es darüber hinaus zu klären, welche Lösungen hierbei klimazielf kompatibel sind.

Auf der Grundlage dieses Verständnisses sollen schließlich wirksame Vorschläge zur Anpassung des rechtlichen Rahmens und weiterer Instrumente erarbeitet werden. Das Projekt soll somit bestehende Wissenslücken schließen und einen wichtigen Beitrag zur Klimaresilienz und zum Klimaschutz von Städten in Deutschland und darüber hinaus leisten.

Projektstruktur

Um die zuvor beschriebenen Frage- und Aufgabenstellungen zu lösen, wurde folgende Projektstruktur gewählt:

1. Recherche zu Grundlagen und Wissensstand

Hierbei wurde anhand einer Literaturrecherche der aktuelle Wissensstand zum urbanen Hitzeinseleffekt und hinsichtlich möglicher Maßnahmen zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln sowie klimagerechter Maßnahmen zur Vermeidung einer Überhitzung in Innenräumen eruiert.

2. Erstellung und Analyse optimierter Quartierskonzepte

Für fünf reale Quartiere (drei in Deutschland, eines in Madrid und eines in Tunis) wurden jeweils die mutmaßlich wirksamsten Maßnahmen gegen eine sommerliche Überhitzung anhand von Simulationsberechnungen quantifiziert. Dabei wurde ein neuartiges Verfahren angewandt, bei dem erstmalig ganzjährige Mikroklimasimulationen durchgeführt und mit dynamisch thermischen Gebäudesimulationen gekoppelt wurden.

3. Vorschläge zur Anpassung des rechtlichen Rahmens und weiterer Instrumente

Auf Basis dieser Erkenntnisse sowie derjenigen aus der Stakeholdereinbindung (s. u.) wurden schließlich zehn Vorschläge zur Anpassung des rechtlichen Rahmens und weiterer Instrumente entwickelt.

Projektbegleitend wurden, zum einen über einen Workshop, zum anderen über Interviews, Akteure und Stakeholder mit eingebunden, um eine möglichst große Praxisnähe gewährleisten zu können.

Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse aus den Kapiteln zusammengefasst.

1. Recherche zu Grundlagen und Wissensstand

Grundlegendes zu urbanen Hitzeinseln

Die Beschaffenheit von Städten kann bei sommerlichen Temperaturen zur Ausbildung urbaner Hitzeinseln führen, in denen die Temperaturen zum Teil erheblich über denjenigen im Umland liegen. Großflächige Versiegelung, dunkle Bodenflächen und Gebäude haben Oberflächen, welche sich im Sommer schnell und langanhaltend aufheizen. Der urbane Hitzeinseleffekt führt zu einer Beeinträchtigung der Lebensqualität und des Wohlbefindens der städtischen Bevölkerung. Erhebliche gesundheitliche Folgen bis hin zum Tod können vor allem in vulnerablen Bevölkerungsgruppen wie etwa bei alten oder jungen kranken Menschen auftreten.

Der Effekt urbaner Hitzeinseln ist abhängig von der Jahres- und Tageszeit. Während diese im gesamten Jahresverlauf zu beobachten sind, ist der Effekt in den Sommermonaten besonders stark ausgeprägt und kritisch. Große Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland sind vor allem nachts zu verzeichnen.

Klimaresiliente und klimaneutrale Gebäudekonzepte

Die Identifizierung und Analyse wirksamer klimaresilienter und klimaneutraler Gebäudekonzepte erfolgte anhand eines mehrstufigen Ansatzes.

Zunächst wurde dabei eine Recherche durchgeführt, auf deren Grundlage eine Zusammenstellung und anschließende Bewertung von realisierten Gebäuden mit klimaresilienten bzw. klimagerechten Konzeptansätzen erfolgte.

Hieraus wurden die wesentlichen Konzepte extrahiert und in einer Übersicht zusammengefasst (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 1: Übersicht der Maßnahmen zur Sicherstellung eines klimaresilienten Komforts in klimaneutralen Gebäuden

Nr.	Bezeichnung	Kurzbeschreibung
1	Gebäudedesign/ Gebäudevolumen und Orientierung	Der Gebäudeentwurf ist maßgeblich für die physikalischen Eigenschaften des Gebäudes. Das Verhältnis von Außenfläche zu Volumen (A/V) hat einen starken Einfluss auf Wärmeverluste und Wärmegewinne. Zudem ist die Ausrichtung besonderer Flächen, insbesondere der Gebäudeöffnungen (Fenster), wesentlich für den Solareintrag in das Gebäude. Die Positionierung und Größe der Fenster kann daher gezielt für den Gewinn oder zur Vermeidung solarer Wärme genutzt werden.
2	Materialwahl und Ausführung	Die Auswahl des Materials hat einen Einfluss auf die Speicherfähigkeit des Gebäudes. Massive Mauern erhöhen die Trägheit des Gebäudes, wohingegen Leichtbauweise schneller auf Temperaturänderungen reagiert. Diese Möglichkeit kann je nach Klimaanforderungen eingesetzt werden, um den Behaglichkeitsbereich im Innenraum (19-26 °C) aufrecht zu erhalten. Auch die Farbwahl hat einen Effekt auf die Erwärmung des Bauteils. Der <i>solar reflectance index</i> (SRI) gibt die Eigenschaften des Bauteils in Bezug auf die Reflektion solarer Einstrahlung an.
3	Energiestandards Gebäudehülle/ Bauteilqualität	Zusätzliche Dämmung bzw. eine hohe energetische Qualität der Bauteile, wie Fenster und Türen, beeinflusst den Wärmetransfer von außen nach innen (umgekehrt in der Heizsaison). Gut gedämmte Bauteile und eine luftdichte Gebäudehülle halten die gewünschte Innentemperatur durch geringe Wärmetransmission länger aufrecht. Zur Vermeidung sommerlicher Wärme ist auch die Art der Verglasung wesentlich: Selektives Sonnenschutzglas mit einem niedrigen g-Wert reduziert zwar den Solareintrag, ist jedoch kein

Nr.	Bezeichnung	Kurzbeschreibung
		effektiver Sonnenschutz und verhindert solare Gewinne während der Heizperiode.
4	Sommerlicher Wärmeschutz durch Verschattungseinrichtungen	Verschiedene Maßnahmen der Verschattung von Bauteilen, insbesondere von Fenstern sind möglich. Während bei südorientierten Fenstern einfache feste Verschattungselemente wirksam sein können, sind in den meisten Fällen wirksame flexible Lösungen wie außenliegende Schiebeelemente oder Sonnenschutzlamellen empfehlenswert. In Deutschland muss der sommerliche Wärmeschutz von Räumen in Neubauten nachgewiesen werden ¹ .
5	Gebäudelüftung aktiv/ passiv	Durch geeignete Lüftungskonzepte kann ein erheblicher Beitrag zur Vermeidung einer sommerlichen Überhitzung erreicht werden. Lüftungskonzepte reichen von passiven Lösungen wie Querlüftungskonzepten, Nachlüftung und Luftschächte bis hin zu Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und Entfeuchtung sowie Erd- oder Grundwasservortemperierung. Es können auch passive und aktive Maßnahmen kombiniert werden, um eine ausreichende Kühlung zu erreichen.
6	Maßnahmen zur Gebäudekühlung	Neben Klimaanlage mit klimaverträglichen (natürlichen) Kältemitteln können auch andere effiziente Techniken zur Gebäudekühlung zum Einsatz kommen. Z. B. können Sorptionskälteanlagen Kälte mittels Wärme, d. h. ohne signifikanten Strombedarf, erzeugen und daher z. B. solarthermisch erzeugte Wärme effektiv nutzen (=> Solare Kühlung). In gemäßigten Klimaregionen kann auch das Erdreich oder das Grundwasser als Wärmesenke genutzt werden. Eine wirksame Maßnahme zur Verbesserung der Effizienz von Kühlsystemen sind Flächenkühlungen/ -heizungen/ Kühldecken. Diese sog. <i>Low Exergy</i> -Systeme verbessern die Effizienz der Kälteerzeugung, mindern die Verluste und können die Nutzung erneuerbarer Wärme-/ Kälteerzeugung, z. B. die Nutzung von Grundwasser, ermöglichen.
7	Begrünung/ Wassernutzung	Die Begrünung von Dach und Fassade trägt zu einem verbesserten Mikroklima bei. Hierfür kann Regenwasser genutzt und Grauwasser recycelt werden.
8	Effiziente Anwendungen	Elektrische Geräte und Beleuchtung sollten eine hohe Effizienz haben, da sie sowohl den Stromverbrauch als auch die internen Wärmeeinträge reduzieren.
9	Erneuerbare Kälte-/ Wärmeerzeugung	Zur klimaschonenden Kälte- bzw. Wärmeerzeugung können erneuerbare Energiesysteme auf/ in dem Gebäude zur Anwendung kommen, um die gewünschte Innentemperatur aktiv herzustellen. Solarthermische Anlagen, Photovoltaik (z. B. für elektrische solare Kühlung), Biomasse, Geothermie und Grundwasser können dabei zur Versorgung von dezentralen oder zentralen Systemen (z. B. Fernkälte) zum Einsatz kommen.

Auf der Grundlage der oben genannten Analyse wurde schließlich eine klimazonenspezifische Systematisierung der recherchierten Beispielkonzepte erstellt.

Die Systematisierung zeigte, dass fast alle der identifizierten Konzepte für alle Gebäudetypen in allen Klimaregionen anwendbar sind. Ausnahmen betreffen z. B. den Gebäudebestand, wo der Gebäudeentwurf nicht mehr optimiert werden kann oder die Lüftungskühlung, deren Effektivität in tropischen Regionen sehr eingeschränkt ist.

Klimaresiliente Quartierskonzepte

Im Forschungsvorhaben wurde eine Übersicht der wichtigsten Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln zusammengestellt und dabei die technischen und ökonomischen Rahmenbedingung sowie die Anwendbarkeit der Maßnahmen unter verschiedenen klimatischen Bedingungen betrachtet. Tabelle 2 fasst die betrachteten Maßnahmen sowie deren Anwendungsbereiche zusammen.

¹ Der Nachweis ist auf Grundlage der DIN 4108 Beiblatt 2 zu führen.

Tabelle 2: Übersicht der betrachteten Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln

Nr.	Bezeichnung	Wirkung bezüglich der Vermeidung von urbanen Hitzeinseln				Eignung für verschiedene klimatische Bedingungen			Eignung für Neubau/ Bestand	
		Beschattung	Verdunstung	Albedo	Luftzirkulation	Mitteleuropa	Südeuropa	Wüstenklima	Bestand	Neubau
1	Aufhellen von Belägen und Oberflächen im Freiraum	-	-	x	-	x	x	x	x	x
2	Sicherung und Erweiterung des Baumbestandes	x	x	-	-	x	x	-	x	x
3	Sicherung bestehender und Anlage von zusätzlichen Waldflächen	(x)	x	-	-	x	x	-	(x)	x
4	Entsiegelung von Oberflächen im Freiraum/ Vermeidung von Versiegelung	-	x	-	-	x	x	-	x	x
5	Sicherung und Erweiterung von Grün- und Freiräumen	(x)	x	-	(x)	x	x	(x)	x	x
6	Erhaltung der städtischen Luftzirkulation und Vernetzung der Freiräume	-	-	-	x	x	x	x	(x)	x
7	Dach- und Fassadenbegrünung	-	x	-	-	x	x	(x)	x	x
8	Erhöhung des Wasseranteils im Quartier	-	x	-	-	x	x	-	x	x
9	Beschattung von Freiflächen und Wegen	x	-	-	-	x	x	x	x	x

Legende: x = geeignet; (x) = bedingt geeignet; - = ungeeignet

Auf dieser Grundlage wurde eine Auswahl an Beispielquartieren zusammengestellt, in denen Strategien zur Vermeidung von Hitzeinseln erfolgreich umgesetzt wurden.

2. Erstellung und Analyse optimierter Quartierskonzepte

Simulationsgestützter Wirksamkeitsnachweis von optimierten Quartiers- und Gebäudekonzepten

Aufbauend auf bestehenden Erkenntnissen wurden Maßnahmenpakete für hitzeresiliente Quartiere und Gebäude zusammengestellt. Die grundlegenden Pakete bzw. deren Inhalte sind im Folgenden aufgeführt. Weitere Detaillierungen und Spezifizierung z. B. hinsichtlich Klimaregionen oder Gebäudequalitäten sind im entsprechenden Kapitel beschrieben.

Maßnahmen für hitzeresiliente Quartiere:

- ▶ Sicherung des Baumbestandes und bestehender Waldflächen sowie Anpflanzung neuer Bäume, die sowohl Schatten als auch Verdunstungskühle spenden
- ▶ Beschattung von Freiflächen und Wegen
- ▶ Erhaltung der städtischen Luftzirkulation und Vernetzung der Freiräume (=> Maßnahme bei Quartierserstellung)
- ▶ Städtebauliche Planung: Geeignetes Verhältnis von Gebäudevolumen zu Freiräumen (=> Maßnahme bei Quartierserstellung)
- ▶ Verwendung heller Materialien für Dächer, Fassaden, Straßen und Gehwege

Maßnahmen für Gebäude zur Gewährleistung des sommerlichen Behaglichkeitskomforts bzw. zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs

- ▶ Vorsehung eines wirksamen Sonnenschutzes
- ▶ Kühlungs- bzw. Nachtlüftung
- ▶ Dämmung und Wärmeschutzverglasung (Qualitäten in Abhängigkeit der Klimazone)
- ▶ Sicherstellung einer hohen Luftdichtigkeit
- ▶ Kompaktes Gebäudedesign, moderater Fensterflächenanteil (=> Maßnahme bei Neubau)
- ▶ Hohe thermische Speichermassen (=> Maßnahme bei Neubau)

Quartiersauswahl für die Simulationsberechnungen

Die Quartiersauswahl erfolgte zur Abdeckung einer möglichst großen Bandbreite von real existierenden und künftigen Wohnquartieren. Der Schwerpunkt lag dabei bei Stadtquartieren mit hohen Wohndichten, wie sie in den zentrumsnahen Stadtteilen vieler Großstädte vorzufinden sind. Bei den deutschen Quartieren wurde versucht sowohl sommerkühle als auch sommerheiße Regionen abzudecken. Darüber hinaus sollten sowohl Neubau- als auch Bestandsquartiere und Nachverdichtungen berücksichtigt werden.

Auf dieser Grundlage wurden Quartiere in den folgenden Städten ausgewählt:

- ▶ Bestandsquartier Tunis
- ▶ Neubauquartier Madrid
- ▶ Neubauquartier Köln
- ▶ Bestandsquartier Hamburg
- ▶ Nachverdichtungsquartier Frankfurt

Mikroklimasimulationen

Die Anwendung von hochauflösenden Mikroklimamodellen ermöglicht die numerische Vorhersage der Auswirkungen von strukturellen Änderungen in städtischen Planungsgebieten auf das Stadtklima auf der Skala der Gebäude- und Grünplanung.

Hierbei wurden in der vorliegenden Studie zwei unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten hochauflösender Stadtklimamodelle eingesetzt: zum einen besteht die Möglichkeit, regionale (großräumige) Klimadaten an die speziellen Gegebenheiten des Gebäudestandorts in seinem urbanen Kontext anzupassen („Urbanisierung der Klimadaten“). Hierdurch werden die klimatologischen Datenreihen leicht modifiziert, so dass der Einfluss der direkten Umgebung auf das Mikroklima berücksichtigt werden kann. Zum anderen werden die hochauflösenden Simulationsdaten verwendet, um die räumlich-zeitliche Verteilung des thermischen Komforts im Außenbereich darzustellen und zu bewerten. Bei dieser Analyse steht vor allem der Mensch als Nutzer der urbanen Freiräume im Zentrum der Betrachtung. Bei der Analyse der Daten wurde der thermische Komfortindex PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) verwendet. Die PET beschreibt das thermische Empfinden eines Menschen unter der Einwirkung von Strahlungsflüssen (vor allem Sonnenstrahlung), Wind, Lufttemperatur und Luftfeuchte.

Beide Anwendungsmöglichkeiten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung: Für die urbanisierten Klimadaten steht die Weiterverwendung in den Gebäudesimulationen im Zentrum des Interesses. Daher müssen hier längerfristige Zeitreihen, idealerweise ein kompletter Jahresgang generiert und als Randbedingung zur Verfügung gestellt werden. Bei der hochauflösenden Simulation des thermischen Komforts im Außenbereich hingegen werden ausgewählte Situationen, üblicherweise typische Wetterlagen oder Extremsituationen analysiert. Diese erstrecken sich über wenige Tage und können somit nur sehr eingeschränkt für weiterführende energetische Berechnungen verwendet werden.

Ergebnisse:

Die Mikroklimamodellierung liefert eine große Zahl unterschiedlicher Kenngrößen in Raum und Zeit. Um zu einer Bewertung von Maßnahmen zu kommen ist es daher erforderlich, ausgewählte Kenngrößen zu betrachten und gegenüber zu stellen.

Um den thermischen Komfort zu beschreiben wurden in diesem Projekt die Lufttemperatur einerseits und die „Physiologisch Äquivalenten Temperatur“ (PET) andererseits als Indikatoren ausgewählt.

Betrachtet man die Effekte der Quartiersmaßnahmen auf die Lufttemperatur, so sind die Unterschiede zunächst klein. Dieses ist dadurch begründet, dass die veränderten Gebiete relativ klein sind und die Luft als physikalisches Medium zudem träge auf Veränderungen reagiert. Dennoch können bereits Änderungen von 1 -2 K eine deutliche Verbesserung der Situation, insbesondere in den Abend- und Nachstunden bedeuten. Durch das Versprühen von Wasser (Evaporationskühlung) können zudem lokal deutliche Temperaturreduktionen von 5 K und mehr erreicht werden.

Die Veränderungen in der PET sind üblicherweise wesentlich größer, wenn sich die Möglichkeit der zusätzlichen Beschattung bietet. Diese gefühlte Temperatur kann sich in den beschatteten Bereichen um -20 K und mehr von den besonnten Bereichen unterscheiden. Eine Beschattung der Außenanlagen stellt somit während der Tagesstunden, vor allem im Sommer die effizienteste Lösung zur Reduzierung von Hitzestress dar.

Gebäudesimulationen

Die dynamisch-thermischen Gebäudesimulationen wurden mit der Software TRNSYS durchgeführt. Dabei wurden die Gebäude bzw. die Wohnungen in den Gebäuden anhand von Multizonenmodellen abgebildet.

Wie zuvor beschrieben wurden die Ergebnisse der Mikroklimasimulation in die Gebäudesimulationen eingespeist.

Ergebnisse:

Die berücksichtigten Optimierungsmaßnahmen zur Verringerung des Hitzeinseleffektes auf Quartiersebene haben einen messbaren, in der Regel aber verhältnismäßig geringen positiven Einfluss auf den sommerlichen Innenraumkomfort. Am deutlichsten ist der Effekt im Quartier in Madrid zu beobachten. Dort sinkt der Kühlenergiebedarf in vielen Dachgeschosswohnungen um fast 10 kWh/m²a. Hinsichtlich der energetischen Aspekte der Gebäude wird die durch die Maßnahmen geringfügige Minderung des Kühlenergiebedarfs oft durch die leichte Erhöhung des Heizenergiebedarfs nahezu kompensiert.

Bis auf die Gebäude in Hamburg ist in allen Fällen trotz umfänglicher Vermeidungsmaßnahmen (Lüftungskühlung, Sonnenschutz und Verbesserung der Gebäudehüllen) eine Kühlung zur Sicherstellung eines guten sommerlichen Komforts erforderlich². Vor allem die Dach-³ und Mittelgeschosswohnungen erweisen sich bezüglich der Überhitzungsproblematik als kritisch. Der Kühlenergiebedarf der Gebäude ist weitgehend unabhängig vom Baujahr (d. h. der Hüllqualität) und wird, abgesehen vom Lüftungsverhalten, vielmehr von der Sonnenschutzqualität beeinflusst. Im Vergleich zu anderen Verbrauchern, wie z. B. Haushaltsstrom, Warmwasserbedarf oder dem Heizenergiebedarf, ist der Endenergiebedarf für Kühlung in den optimierten deutschen Quartieren vergleichsweise gering. Dies ist nicht zuletzt auch auf die berücksichtigten hocheffizienten Kühlsysteme (z. B. passive, nur mit Erdkälte betriebene Fußbodenkühlung, vgl. Clouth Quartier in Köln) zurückzuführen. Umso wichtiger ist hierbei jedoch der Verzicht auf fluorierte Kältemittel. Derartige Kältemittel verursachen unvermeidbare direkte Treibhausgasemissionen oder im Falle von ungesättigten HFKW (u-HFKW, als Hydrofluorolefinen (HFO) vermarktet) bzw. deren Zerfallsprodukte weitere Umweltschäden. Hinsichtlich der angestrebten Klimaneutralität ist die verfügbare Dachfläche der begrenzende Faktor. Während für das Quartier in Tunis aufgrund der hohen Einstrahlung und der überwiegend geringen Geschosshöhen durch PV-Anlagen auf den Dächern jahresbilanziell ebenso viel Strom erzeugt werden kann wie auch im optimierten Quartier benötigt wird, ist dies selbst im ebenfalls sehr sonnenreichen Quartier in Madrid wegen der dort berücksichtigten hohen Bebauung nicht möglich. Aufgrund der achtgeschossigen Gebäude ergaben sich pro Wohnung geometriebedingt rechnerisch hier lediglich 1 kWp installierter PV-Leistung. Auch bei den untersuchten deutschen Quartieren reicht die zur Verfügung stehende Dachfläche trotz der geringeren Geschosshöhe und der umfangreichen Verbesserungsmaßnahmen an den Gebäuden nicht für eine jahresbilanziell neutrale Strombilanz aus. Dies liegt vor allem am verbleibenden Haushaltsstrombedarf, dessen Minimierung daher ein wesentlicher Baustein zur Herstellung der Klimaneutralität von (Wohn-)Quartieren ist. Eine rechnerische jahresbilanzielle Klimaneutralität ist bei Berücksichtigung differenzierter CO₂-Faktoren (d.h. höherer Emissionsfaktoren für PV und

² Zulässige Innentemperaturen gem. der DIN EN 15251:2012-12 (Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) 2012)

³ Insbesondere bei Altbauten (vgl. Quartier in Frankfurt) ist der Unterschied zwischen Dach (=> hohe Überhitzungsproblematik aufgrund geringer Dachdämmung) und Erdgeschosswohnung (meist keine Überhitzung aufgrund geringer Boden- oder Kellerdämmung) groß.

elektrischer Wärmeerzeugung⁴) möglich. In Großstadtquartieren mit einer hohen Wohndichte (vgl. Quartier Campo Bornheim in Frankfurt) ist dazu jedoch noch eine weitere Verbesserung des CO₂-Strommixfaktors im Stromnetz notwendig.

Akteursanalyse und Workshop

In Deutschland wie auch in vielen anderen Ländern ist die Vermeidung von urbanen Hitzeinseln ein zunehmend wichtiger Bestandteil von stadtplanerischen Prozessen. In zahlreichen größeren Städten wurden im Rahmen von Klimaanpassungskonzepten, basierend auf einer Analyse der Ausgangslage, konkrete Maßnahmen entwickelt (z. B. Berlin, München, Stuttgart, Düsseldorf, Freiburg).

Trotz der zunehmenden Bedeutung des Themas bestehen zahlreiche Hemmnisse, die sich erschwerend auf die Entwicklung und Umsetzung von Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln auf kommunaler Ebene auswirken.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden anhand von Interviews mit Vertreterinnen und Vertretern Hemmnisse bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln auf kommunaler Ebene untersucht und Lösungsvorschläge erarbeitet.

Als zentrales Handlungsfeld wird die Stärkung der Klimaanpassung als Pflichtaufgabe durch einen starken gesetzlichen Rahmen genannt, da die mangelnde Verbindlichkeit und Konkretisierung von Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln in der Praxis ein wichtiges Hemmnis darstellen.

Weitere Handlungsstrategien umfassen die Verbesserung der Datengrundlage auf kommunaler Ebene in Form von Klimaanalysen, durch Quantifizierung der Wirkung von Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln sowie durch die Bereitstellung von quantitativen Informationen zu den Folgewirkungen von Hitzeinseln auf die Bevölkerung.

Als weitere Erfolgsfaktoren wurden die Vernetzung der relevanten Akteure zur Planung und Durchführung von Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln innerhalb der Kommune sowie die Vernetzung und der Austausch mit Akteuren aus anderen Kommunen und Einrichtungen genannt.

3. Vorschläge zur Anpassung des rechtlichen Rahmens und weiterer Instrumente

Im letzten Abschnitt wurden schließlich Vorschläge zur Verbesserung verschiedener Aspekte rund um die Themenfelder Stadtraumklima, sommerlicher Wärmeschutz und nachhaltige Gebäudekühlung entwickelt. Die Auswahl der 10 Handlungsfelder erfolgte auf der Grundlage eines zuvor erstellten Themenspektrums. Es wurden sowohl identifizierte Verbesserungsmöglichkeiten bei kommunalen, länderspezifischen, nationalen als auch internationalen (EU-Ebene) Rechtsvorschriften und Regelungen sowie Förderprogramme aufgegriffen.

Im Einzelnen wurden die folgenden Handlungsfelder bearbeitet:

1. Überwindung der Hindernisse für natürliche Kältemittel
2. Wirtschaftlichkeitsgebot und sommerlicher Wärmeschutz im GEG
3. Schärfung der ordnungsrechtlichen Anforderungen zur Begrenzung des Kühlenergiebedarfs von Gebäuden - Verbesserungsvorschlag zur Umsetzung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG)

⁴ 860 g/kWh für Strombedarf zur elektrischer Wärmeerzeugung, bzw. -860 g/kWh für Vorort erzeugten PV-Strom (Verdrängungsstrommix (GEG 2020)); weitere Hintergründe zum Rechenansatz: Siehe Kapitel 2.2.5.4.3.2

4. Praxishilfe für Prüfbehörden - Vorschläge zur Verbesserung des Vollzugs der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz gem.: DIN 4108-2: 2013-02
5. BEG: Vorschlag zur Berücksichtigung von natürlichen Kältemitteln (Bonus Regelung)
6. Ausarbeitungen zur Forderung eines Stadtklimaneutralitäts-Nachweises in Umweltverträglichkeitsprüfungen für neue Quartiere
7. Definition erneuerbarer Kühlung im Rahmen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU
8. Handlungsvorschläge für die Konkretisierung der Auswirkungen des Mikroklimas auf die Stadtplanung
9. BauNVO: Ausarbeitung eines Vorschlags für einen Grünflächenfaktor GFF (wie GRZ, GFZ)
10. Good Practice-Vorschläge zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen auf kommunaler Ebene

Summary

Motivation of the project

Due to climate change, population growth and ongoing urbanisation, overheating in summer is becoming an increasing problem for cities. Overheating affects both the areas where people stay in urban spaces (urban heat island effect) and the indoor climate in living and working spaces.

The aim of this research project is to improve the understanding of the causes, the interrelationships and possible solutions to avoid or limit overheating.

The effectiveness and climate resilience of different measures to reduce the heat island effect and summer overheating in buildings will be quantified. They are both highly dependent on local conditions.

For indoor spaces, the question also arises as to whether - and if so, under which conditions - active cooling (and thus also the use of climate-damaging HFC refrigerants) can be dispensed with in the long term. If active cooling is indispensable to ensure minimum comfort in summer, it is also necessary to clarify which solutions are compatible with climate objectives.

Finally, on the basis of this understanding, effective proposals for the adaptation of the legal framework and further instruments are to be developed. The project will thus close existing knowledge gaps and make an important contribution to climate resilience and climate protection of cities in Germany and beyond.

Project Structure

In order to solve the questions and tasks described above, the following project structure was chosen:

1. Research on basics and state of knowledge

The current state of knowledge on the urban heat island effect and possible measures to reduce urban heat islands as well as climate-appropriate measures to avoid overheating indoors were determined on the basis of a literature research.

2. Creation and analysis of optimised neighbourhood concepts

On the basis of five real neighbourhoods (three in Germany, one in Madrid and one in Tunis), the presumably most effective measures against overheating in summer were quantified by means of simulation calculations. A novel method was applied, in which year-round micro-climate simulations were carried out for the first time and coupled with dynamic thermal building simulations.

3. Proposals for the adaptation of the legal framework and further instruments

Based on these findings and those from the stakeholder engagement (see below), ten proposals for the adaptation of the legal framework and further instruments were developed.

During the project, actors and stakeholders were involved in a workshop and an online survey in order to ensure the greatest possible practical relevance.

The main findings from the chapters are summarised below.

1. Research on basics and state of knowledge

Basic facts about urban heat islands

The nature of cities can lead to the formation of urban heat islands in summer, where temperatures are sometimes considerably higher than in the surrounding countryside. Large

areas of sealed surfaces, dark ground surfaces, and buildings have surfaces that heat up quickly and for long periods in the summer. The urban heat island effect leads to an impairment of the quality of life and well-being of the urban population. Significant health consequences, including death, can occur, especially in vulnerable populations such as the elderly or young ill people.

The effect of urban heat islands depends on the time of year and time of day. While these can be observed throughout the year, the effect is particularly pronounced and critical during the summer months. Significant temperature differences between city and surrounding countryside occur predominantly during the nighttime.

Climate-resilient and climate-neutral building concepts.

A multi-step approach was used to identify and analyse effective climate-resilient and climate-neutral building concepts.

First, a research was carried out, on the basis of which a compilation and subsequent evaluation of realised buildings with climate-resilient or climate-appropriate concept approaches was carried out.

From this, the most important concepts were extracted and summarised in an overview (see following table).

Tabelle 3: Overview of measures to ensure climate-smart comfort in climate-neutral buildings

No.	Concept	Short description
1	Building design/ building volume and orientation	The building design is decisive for the physical properties of the building. The ratio of external surface to volume (A/V) has a strong influence on heat loss and heat gain. In addition, the orientation of sunlit surfaces, especially the building openings (windows), is essential for solar gain into the building. The positioning and size of windows can therefore be used for the targeted contribution or avoidance of solar heat.
2	Choice of materials and design	The choice of material has an influence on the storage capacity of the building. Solid walls increase the inertia of the building, whereas lightweight construction reacts faster to temperature changes. Depending on climate requirements, this option can be used to maintain the comfort range in the interior (19-26°C). The choice of colour also has an effect on the warming component of the building. The solar reflectance index (SRI) indicates the properties of the component in terms of reflection of solar radiation (black = 0; white = 100).
3	Energy standards building envelope/ component quality	Additional insulation or a high energy quality of building components such as windows and doors influence the heat transfer from inside to outside (vice versa in the heating season). Well-insulated building components and an airtight building envelope maintain the desired indoor temperature for longer due to low heat transmission. To avoid summer heat, the type of glazing is also essential: selective solar control glass with a low g-value keeps solar gain low but does not replace solar shading.
4	Summer thermal protection through solar shading	Various measures for shading building components, especially windows, are possible. While simple fixed shading elements can be effective for south-facing windows, effective flexible solutions such as external sliding elements or sun protection louvers are recommended in most cases. In Germany, the summer thermal insulation of rooms in new buildings must be proven ⁵ .
5	Building ventilation active/ passive	Ventilation concepts range from passive solutions such as cross-ventilation concepts, post ventilation and air shafts to ventilation systems with heat recovery and dehumidification as well as ground or groundwater pre-tempering. Passive and active measures can also be combined to achieve a sufficient cooling function.

⁵ The proof shall be provided on the basis of DIN 4108-2:2013-02.

No.	Concept	Short description
6	Building cooling measures	In addition to air conditioning systems with climate-compatible (natural) refrigerants, other efficient technologies can also be used for cooling buildings. E. g. sorption refrigeration systems can generate cooling by means of heat, i. e. without electricity, and therefore effectively use e.g. solar thermal generated heat (=> solar cooling). In temperate climate regions, the ground or groundwater can also be used as a heat sink. An effective measure to improve the efficiency of cooling systems are surface cooling/heating/cooling ceilings. These so-called low exergy systems improve the efficiency of cooling, reduce losses and enable renewable heat/cooling, e. g. the use of groundwater.
7	Greening/ water use	Greening the roof and façade contributes to an improved microclimate. Rainwater can be utilised and grey water recycled for this purpose.
8	Efficient appliances	Electrical appliances and lighting should have high efficiency to reduce internal heat inputs and reduce electricity consumption.
9	Renewable cooling/ heating	For climate-friendly cooling and heating, renewable energy systems can be used on/ in the building to actively produce the desired indoor temperature. Solar thermal systems, photovoltaics (e. g. for electric solar cooling), biomass, geothermal energy and groundwater can be used.

Based on the above analysis, a climate zone-specific systematisation of the researched example concepts was created.

The systematisation showed that almost all of the identified concepts are applicable to all building types in all climate regions. Exceptions concern, for example, existing buildings, where the building design can no longer be optimised, or ventilation cooling, which is considerably less effective in tropical regions.

Climate-resilient neighbourhood concepts

The research project compiles an overview of the most important measures to avoid heat islands and considers the technical and economic framework conditions as well as the applicability of the measures under different climatic conditions. Table 2 summarises the measures considered and their areas of application.

Tabelle 4: Overview of the measures considered to avoid urban heat islands.

No.	Description	Effect in terms of avoiding urban heat islands			Suitability for different climatic conditions				Suitability for new construction/ existing buildings	
		Shading	Evaporation	Albedo	Air circulation	Central Europe	Southern Europe	Desert climate	Stock	New construction
1	Brightening of coverings and surfaces in open spaces	-	-	x	-	X	x	x	x	x
2	Securing and expanding the tree population	X	x	-	-	X	x	-	x	x
3	Safeguarding existing and creating additional forest areas	(x)	x	-	-	X	x	-	(x)	x

No.	Description	Effect in terms of avoiding urban heat islands			Suitability for different climatic conditions				Suitability for new construction/ existing buildings	
4	Unsealing of surfaces in open space/ avoidance of sealing	-	x	-	-	X	x	x	x	x
5	Securing and expanding green and open spaces	(x)	x	-	(x)	x	x	(x)	x	x
6	Preservation of urban air circulation and interconnectedness of open spaces	-	-	-	x	x	x	x	(x)	x
7	Roof and facade greening	-	x	-	-	x	x	(x)	x	x
8	Increasing the proportion of water in the neighbourhood	-	x	-	-	x	x	-	x	x
9	Shading of open spaces and paths	X	-	-	-	x	x	x	x	x

Legend: x = suitable; (x) conditionally suitable; - unsuitable

On this basis, a selection of sample neighbourhoods was compiled in which strategies to prevent heat islands have been successfully implemented.

2. Creation and analysis of optimised district concepts

Simulation-based proof of effectiveness of optimised district and building concepts

Based on existing findings, packages of measures for heat-resilient neighbourhoods and buildings were compiled. The basic packages or their contents are listed below. Further details and specifications, e. g. regarding climate regions or building qualities, are described in the corresponding chapter.

Measures for heat-resilient neighbourhoods:

- ▶ Securing tree cover and existing wooded areas and planting new trees that provide both shade and evaporative cooling.
- ▶ Shading open spaces and pathways.
- ▶ Preservation of urban air circulation and interconnectedness of open spaces (=> measure when creating neighbourhoods)
- ▶ Urban planning: Appropriate ratio of building volume to open spaces (=> measure for neighbourhood development)
- ▶ Use of light-coloured materials for roofs, facades, streets, and sidewalks.

Measures for buildings to ensure comfort in summer or to reduce cooling energy demand

- ▶ Provision of effective sun protection.
- ▶ Cooling or nighttime ventilation
- ▶ Insulation and thermal glazing (qualities depending on the climate zone)

- ▶ Ensuring a high level of air tightness
- ▶ Compact building design, moderate proportion of window area (=> measure for new buildings)
- ▶ High thermal storage masses (=> measure for new buildings)

Neighbourhood selection for the simulation calculations

The neighbourhoods were selected to cover as wide a range as possible of real and future residential neighbourhoods. The focus was on urban neighbourhoods with high residential densities, such as those found in the city centres of many large cities. In the case of German neighbourhoods, an attempt was made to cover both summer-cool regions and regions that are hot during summer. In addition, both new construction and existing neighbourhoods as well as post-densification areas were to be considered.

On this basis, neighbourhoods were selected in the following cities.

- ▶ Existing neighbourhood Tunis
- ▶ New-build district of Madrid
- ▶ New-build district of Cologne
- ▶ Existing neighbourhood in Hamburg
- ▶ Redensification neighbourhood Frankfurt

Microclimate simulations

The application of high-resolution microclimate models enables the numerical prediction of the effects of structural changes in urban planning areas on the urban climate at the scale of building and green planning.

In this context, two different applications of high-resolution urban climate models were used in the present study: first, there is the possibility to adapt regional (large-scale) climate data to the specific conditions of the building site in its urban context ("urbanisation of climate data"). This slightly modifies the climatological data series so that the influence of the immediate surroundings on the microclimate can be considered. On the other hand, the high-resolution simulation data is used to represent and evaluate the spatio-temporal distribution of outdoor thermal comfort. This analysis focuses primarily on humans as users of urban open spaces. The thermal comfort index PET (Physiologically Equivalent Temperature) was used in the analysis of the data. The PET describes the thermal sensation of a person under the influence of radiation fluxes (especially solar radiation), wind, air temperature and humidity.

Both application possibilities differ with respect to their spatial and temporal resolution: For urbanised climate data, the further use in building simulations is the focus of interest. Therefore, longer-term time series, ideally a complete annual cycle, must be generated here and made available as boundary conditions. In the high-resolution simulation of outdoor thermal comfort, on the other hand, selected situations, usually typical weather conditions or extreme situations, are analysed. These extend over a few days and can therefore only be used to a very limited extent for further energy calculations.

Results

Microclimate modeling provides a large number of different parameters in space and time. In order to come to an evaluation of measures, it is therefore necessary to consider and compare selected parameters.

In order to describe the thermal comfort, the air temperature on the one hand and PET on the other hand were selected as indicators in this project.

Looking at the effects of the neighborhood measures on air temperature, the differences are initially small. This is due to the fact that the changed areas are relatively small and the air as a physical medium also reacts sluggishly to changes. Nevertheless, already achievable changes of 1 to 2 K can mean a significant improvement of the situation, especially in the evening and night hours. In addition, significant local temperature reductions of 5 K and more can be achieved by spraying water (evaporative cooling).

The changes in PET are usually much greater when the opportunity for additional shading presents itself. This perceived temperature can differ by -20 K or more in the shaded areas from the sunlit areas. Thus, shading of outdoor facilities is the most efficient solution for reducing heat stress during daytime hours, especially in summer.

Building simulations

The dynamic thermal building simulations were carried out using TRNSYS software. The buildings or the apartments in the buildings were modelled using multizone models.

As previously described, the building simulations were fed with the microclimate simulation results.

Results

The optimisation measures considered to reduce the heat island effect at the neighbourhood level have a measurable, but generally relatively small, positive impact on summer indoor comfort. The most noticeable effect can be observed in the Madrid neighbourhood, where cooling energy demand in many attic apartments is reduced by almost 10 kWh/m²a. With regard to the energy aspects of the buildings, the slight reduction in cooling energy demand resulting from the measures is often almost compensated for by the slight increase in heating energy demand. Except for the buildings in Hamburg, cooling is required in all cases to ensure good summer comfort in order to meet the selected comfort criteria, despite extensive avoidance measures (ventilation cooling, solar shading and improvement of the building envelopes). The rooftop and mid-floor apartments in particular prove to be critical in terms of overheating issues. The cooling energy demand of the buildings is largely independent of the year of construction (i.e. the envelope quality) and, apart from the ventilation behaviour, is rather influenced by the envelope and sun protection quality. Compared to other consumers, such as household electricity, hot water demand or heating energy demand, the final energy demand for cooling in German neighbourhoods is comparatively low. This is not least due to the highly efficient cooling systems taken into account (e. g. passive floor cooling powered only by geothermal energy, cf. Clouth Quartier in Cologne). In this context, it is all the more important to avoid the use of fluorinated refrigerants, which cause unavoidable direct greenhouse gas emissions or, in the case of hydrofluorolefins (HFO) or their decay products, further environmental damage. With regard to the targeted climate neutrality, the available roof area is the limiting factor. While the neighbourhood in Tunis can generate as much electricity through PV systems on the roofs as is needed in the optimised neighbourhood due to the high irradiation and the predominantly low number of storeys, this is not possible even in Madrid, which is also very sunny. Due to the eight-storey buildings, only 1 kWp of installed PV power was possible per

flat. In the German neighbourhoods studied, the available roof area is also not sufficient for an annual neutral electricity balance, despite the lower number of storeys and the extensive improvement measures on the buildings. This is mainly due to the remaining household electricity demand. A minimisation of the household electricity demand is therefore an essential element for achieving climate neutrality in (residential) neighbourhoods. A calculated annual climate neutrality is possible if differentiated CO₂ factors (i.e. higher emission factors for PV and electric heat generation⁶) are taken into account. In large city districts with a high residential density (cf. Campo Bornheim district in Frankfurt), however, a further improvement of the CO₂ electricity mix factor in the electricity grid is necessary.

Stakeholder analysis and workshops

In Germany, as in many other countries, the avoidance of urban heat islands is an increasingly important component of urban planning processes. In numerous larger cities, concrete measures have been developed as part of climate adaptation concepts, based on an analysis of the initial situation (e. g. Berlin, Munich, Stuttgart, Düsseldorf, Freiburg).

Despite the increasing importance of the topic, there are numerous obstacles that hamper the development and implementation of measures to prevent heat islands at the municipal level.

Within the framework of the research project, obstacles to the implementation of measures to prevent heat islands at the municipal level were investigated on the basis of interviews with representatives and solutions were proposed.

Strengthening climate adaptation as a mandatory task through a strong legal framework is named as a central field of action, since the lack of binding and concrete measures to avoid heat islands is an important obstacle in practice.

Other strategies for action include improving the data base at the municipal level in the form of climate analyses, by quantifying the effect of heat island avoidance measures, and by providing quantitative information on the consequential effects of heat islands on the population.

Networking of relevant actors to plan and implement heat island prevention measures within the municipality as well as networking and exchange with actors from other municipalities and institutions were named as further success factors.

3. Proposals for adapting the legal framework and further instruments

Finally, in the last section, proposals were developed to improve various aspects around the topics of urban climate, summer heat protection and sustainable building cooling. The 10 fields of action were selected based on a previously drawn up longlist. Thematically, identified opportunities for improvement in municipal, state-specific, national and international (EU level) legislation and regulations as well as funding programmes are addressed.

In detail, the following fields of action were addressed:

1. overcoming the obstacles for natural refrigerants
2. economic efficiency requirement and summer thermal insulation in the Building Energy Act (GEG)
3. tightening the regulatory requirements for limiting the cooling energy demand of buildings - improvement proposal for the implementation of the GEG

⁶ 860 g/kWh (Verdrängungsstrommix (GEG 2020)); for further background on the calculation approach, see Chapter 2.2.5.4.3.2

4. practical assistance for inspection authorities - proposals for improving the enforcement of the requirements for summer thermal insulation in accordance with: DIN 4108-2: 2013-02
5. BEG (Federal Support Programme for efficient Buildings): Proposal for the consideration of natural refrigerants (bonus regulation)
6. elaboration on the requirement of an urban climate neutrality verification in environmental impact assessments for new neighbourhoods
7. definition of renewable cooling within the framework of the EU Renewable Energies Directive
8. proposals for action to concretise the impact of the microclimate on urban planning
9. building regulations: Elaboration of a proposal for a green space factor GFF (like GRZ, GFZ)
10. best practice proposals for the implementation of climate adaptation measures at municipal level

1 Grundlagen und Wissensstand

1.1 Urbane Hitzeinseln und ihre Ursachen

Die Beschaffenheit von Städten kann bei sommerlichen Temperaturen zur Ausbildung sogenannter urbaner Wärme- oder Hitzeinseln führen, was bedeutet, dass Temperaturen zum Teil erheblich über denjenigen des Umlands liegen. Großflächige Versiegelung, dunkle Bodenflächen und Gebäude stellen Oberflächen dar, welche sich im Sommer schnell und langanhaltend aufheizen. Dieser urbane Hitzeinseleffekt führt zu einer Beeinträchtigung der Lebensqualität und des Wohlbefindens der städtischen Bevölkerung. Gesundheitliche Folgen können vor allem für vulnerable Bevölkerungsgruppen wie Kinder, alte oder kranke Menschen auftreten.

Der Effekt urbaner Hitzeinseln ist abhängig von der Jahres- und Tageszeit. Während urbane Hitzeinseln im gesamten Jahresverlauf zu beobachten sind, ist der Effekt in den Sommermonaten besonders stark ausgeprägt und kritisch. Im Tagesverlauf ist die Intensität der städtischen Hitzeinsel in der Nacht am größten. Dies ist dadurch begründet, dass die Erhitzung urbaner Gebiete im Vergleich zum Umland im Tagesverlauf zunächst weniger stark ausfällt, da es durch die Bebauungsstruktur in der Regel zu einer erhöhten Beschattung kommt. Dahingegen kommt es nach Sonnenuntergang in ländlichen im Vergleich zu städtischen Gebieten zu einer schnelleren Abkühlung, da in Letzteren die in den versiegelten Flächen und Gebäuden gespeicherte Wärme an die Umgebung abgegeben wird.

Die Erhöhung der Temperatur im urbanen Bereich im Vergleich zum unbebauten Umland ist auf verschiedene Effekte zurückzuführen:

- ▶ **Reduzierte Albedo im Vergleich zu ländlichen Gebieten:** In urbanen Gebieten wird abhängig von der Beschaffenheit und Farbe der Oberflächen (z. B. Dächer, Fassaden, Straßen, Parkplätze etc.) solare Energie stärker absorbiert und in Wärme umgewandelt als im ländlichen Raum.
- ▶ **Reduzierte Evapotranspiration im Vergleich zu ländlichen Gebieten:** Durch den deutlich geringeren Anteil an durchlässigen Oberflächen und Vegetation steht in Städten deutlich weniger Wasser und somit Verdunstungskälte zur Verfügung.
- ▶ **Anthropogene Wärmeerzeugung:** Im Vergleich zu ländlichen Gebieten erfolgt in Städten eine erhöhte Wärmeerzeugung durch Verbrennungsprozesse (z. B. Motorenabwärme, industrielle Produktion) oder Abwärme elektrischer Geräte (z. B. Klimaanlage).
- ▶ **Wärmespeicherung in Gebäuden:** Im Vergleich zu einer ländlichen Umgebung haben die städtischen Gebiete aufgrund der Bebauungsstruktur eine ausgeprägtere dreidimensionale Oberfläche, was die Gesamtoberfläche, auf der Wärme aufgenommen werden kann, erhöht.
- ▶ **Veränderung der Windverhältnisse:** In städtischen Gebieten kommt es durch die Bebauung zu einer Verminderung der Windgeschwindigkeit. Diese ist abhängig von der Bebauungsstruktur sowie der Rauigkeit der Oberflächen.

Vor dem Hintergrund der globalen Erwärmung, des Bevölkerungswachstums und der zunehmenden Verstädterung gewinnt der urbane Hitzeinseleffekt massiv an Bedeutung, da das Klima in den Städten nicht nur wärmer wird, sondern auch immer mehr Menschen von dieser Erwärmung betroffen sein werden.

Die Anpassung der städtischen Bevölkerung an Hitze ist keineswegs ein Phänomen des Industriezeitalters. So werden beispielsweise im arabischen und mediterranen Raum seit Jahrtausenden helle Oberflächenmaterialien bei der Errichtung von Gebäuden verwendet.

In Deutschland wie auch in vielen anderen Ländern ist die Vermeidung von urbanen Hitzeinseln ein zunehmend wichtiger Bestandteil von stadtplanerischen Prozessen. In zahlreichen größeren Städten wurden im Rahmen von Klimaanpassungskonzepten, basierend auf einer Analyse der Ausgangslage, konkrete Maßnahmen entwickelt (z. B. Berlin, München, Stuttgart, Düsseldorf, Freiburg). Die Strategien zur Vermeidung urbaner Hitzeinseln beinhalten folgende Handlungsbereiche:

- ▶ Kühlung durch Verdunstung: z. B. Entsiegelung bzw. Erhalt nicht versiegelter Flächen, Erhöhung der Vegetation durch Erhalt bzw. Erweiterung von Grünflächen und Stadtbäumen, Dach- und Fassadenbegrünung, Steigerung des Wasseranteils.
- ▶ Aufhellen von Oberflächen: Steigerung der Albedo durch Aufhellen von Oberflächen, z. B. Verwendung von hellerem Asphalt, nachträgliches Aufbringen von heller Farbe, Verwendung von hellen Baumaterialien.
- ▶ Erhalt bzw. Verbesserung der Luftzirkulation: z. B. Berücksichtigung von lokalen Windgegebenheiten bei der Planung von Quartieren, Erhalt von zusammenhängenden Freiflächen.
- ▶ Beschattung: Reduzierung der direkten Sonneneinstrahlung durch Beschattungselemente, z. B. Stadtbäume oder mobile Sonnensegel.

Trotz der zunehmenden Bedeutung des Themas bestehen zahlreiche Hemmnisse, die sich erschwerend auf die Entwicklung und Umsetzung von Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln auf kommunaler Ebene auswirken.

1.2 Klimaresiliente und klimaneutrale Gebäude: Stand der Technik

1.2.1 Methodik

Zur Identifizierung und Analyse von wirksamen klimaresilienten und klimaneutralen Gebäudekonzepten wurde ein mehrstufiges Verfahren gewählt.

1. Recherche und Zusammenstellung von geeigneten realisierten Gebäuden und Konzepten

Auf der Grundlage einer Literatur- und Internetrecherche sowie der Projekterfahrungen des Projektteams und dessen Netzwerken, wurde eine Liste von klimaresilienten und klimaschonenden Gebäuden zusammengestellt. Berücksichtigt und dokumentiert wurden je Klimaregion und Gebäudetyp jeweils nur Konzepte, die mindestens über eine allgemein anwendbare wirksame Maßnahme verfügen, die zielführend hinsichtlich Klimaresilienz und Klimaneutralität ist. Für die jeweiligen Gebäude wurden Steckbriefe erstellt, in denen die wesentlichen Daten aufgeführt sind:

- a) Gebäudetyp (Wohn- oder Nichtwohngebäude)
- b) Status (Neubau oder Sanierung)
- c) Energetischer Standard
- d) Eingesetzte Technik
- e) Beschreibung
- f) Quellen

2. Zusammenfassende Bewertung der Beispielgebäude

Die zuvor in den Steckbriefen beschriebenen Beispielgebäude wurden im nächsten Schritt hinsichtlich der folgenden relevanten Parameter bewertet:

- a) Klimaresilienz
- b) Klimaschutzwirkung
- c) Raumklimaqualität
- d) Wirtschaftlichkeit
- e) Übertragbarkeit

Die weitere Berücksichtigung der Konzepte im Rahmen des Projektes erfolgte auf der Grundlage dieser Bewertung.

3. Extraktion und Zusammenfassung der wesentlichen Konzepte zur Sicherstellung eines klimaresilienten Komforts in Gebäuden

Aus den unter Stufe 1 und 2 beschriebenen Projekten wurden in der 3. Stufe die hinsichtlich der Sicherstellung eines klimaresilienten Komforts wesentlichen Konzepte nochmals zusammengestellt und detaillierter beschrieben.

4. Systematisierung und Beurteilung der Anwendbarkeit nach Klimazonen

Abschließend wurden die gefundenen Maßnahmen qualitativ hinsichtlich Ihrer Eignung für

- a) Verschiedene Nutzungen (Wohngebäude, Nichtwohngebäude),

- b) Klimazonen (Gemäßig: Mitteleuropa, Subtropisch: Südeuropa/ Nordafrika/ Wüstenklima, Tropisch) sowie
- c) Bestand und Neubau beurteilt.

Zusammen mit den Ergebnissen aus Kapitel 1.3 (Klimaresiliente Quartiere) und Kapitel 1.4 (Praxisbeispiele Hitzeinselvermeidung) bilden die Ergebnisse dieses Kapitels die Grundlage für die Entwicklung der empfohlenen Maßnahmenpakete in Kapitel 2.

1.2.2 Steckbriefe Beispielgebäude

Im Folgenden sind die im Rahmen der Recherche identifizierten klimaresilienten und klimaschonenden Gebäude in Form von Steckbriefen dargestellt.

Bei der Zusammenstellung der Beispielgebäude war die (bilanzielle) Klimaneutralität ausschlaggebend. Idealerweise sollten die Gebäude dabei Energieautarkie ohne Mehrkosten (als Summe aus Investitions- und Betriebskosten über den Lebenszyklus) gegenüber dem lokalen Standard erreichen. Gleichsam sollte für die Innenraumklimakonzepte gelten, dass auch bei künftig steigenden Außentemperaturen im Sommer maximal 26 °C (bzw. Außentemperatur -6K) vorherrschen, d. h. eine nachhaltig hohe Behaglichkeit erreicht werden soll. Aufgrund der begrenzten Anzahl an verfügbaren Beispielen waren die o. g. Ziele jedoch keine notwendige Bedingung. Es wurde als ausreichend erachtet, dass (Teil-) Konzepte umgesetzt wurden, die grundsätzlich das Potenzial haben den o. g. Zielen genügen zu können.

Die Beispielgebäude inklusive der umgesetzten Maßnahmen lassen sich den verschiedenen Klimazonen nach folgenden Kriterien zuordnen:

- ▶ Tropisches Klima (inkl. Wüstenklima) - Schwerpunkt auf Kühlung
- ▶ Subtropisch: Südeuropäisches, mediterranes Klima (MENA-Region) - Heizen und Kühlen
- ▶ Mitteleuropäisches, gemäßigtes Klima - Schwerpunkt auf Heizung

1.2.2.1 Tropisches Klima (inkl. Wüstenklima)

1. AREE Aqaba Residence (Jordanien)

- ▶ **Gebäudetyp:** Einfamilienhaus
- ▶ **Status:** Neubau (2009)
- ▶ **Standard:** Niedrigenergie mit passiven Komponenten; Primärenergiebedarf 52 kWh/m²a
- ▶ **Technik:** Solaranlage, Solare Kühlung (Adsorptionskälteanlage), Verschattungseinrichtungen, passive Kühlung (Belüftungssystem), Dachbegrünung mit Grauwasserfilteranlage
- ▶ **Beschreibung:** EU-gefördertes Pilotprojekt zur Erprobung von passiven und aktiven Maßnahmen für heißes Klima



Quelle: Khasawneh 2011

2. Forschungsinstitut Passivhaus Dubai (VAE)

- ▶ **Gebäudetyp:** Büro
- ▶ **Status:** Neubau (2016)
- ▶ **Standard:** Passivhaus –
Kühlenergiebedarf: 50 kWh/m²a;
Kühllast: 9,7 W/m²;
Primärenergiebedarf 143 kWh/m²a
- ▶ **Technik:** Photovoltaik, Stromspeicher, Lüftung mit Kälterückgewinnung, Erdwärme, Wärmepumpe, Zuluftkühlung bzw. -entfeuchtung, Umluft- und Bodenkühlung, Verschattungselemente
- ▶ **Beschreibung:** EU-gefördertes Pilotprojekt zur Erprobung von passiven und aktiven Maßnahmen für heißes Klima



Quelle: Passivhaus Institut (PHI) -a

3. Österreichische Botschaft Jakarta (Indonesien)

- ▶ **Gebäudetyp:** Büro
- ▶ **Status:** Neubau (2016)
- ▶ **Standard:** Passivhaus; Primärenergiebedarf 117,1 kWh/m²a
- ▶ **Technik:** Lüftung mit Wärme- und Feuchterückgewinnung, Bauteilaktivierung, thermische Solaranlage für WW, Kleinwärmepumpe, feststehende Verschattungselemente
- ▶ **Beschreibung:** PHI-zertifiziertes Passivhaus, Massivbau, Ziegel, Berücksichtigung lokaler Klimabedingungen, Kombination aus traditionellen Techniken, lokalen Materialien und moderner Technik um Raumqualität, Klimakomfort und Nachhaltigkeit zu gewährleisten

Quelle: Passive House Institute (PHI) -b

1.2.2.2 Subtropisches Klima

1. Autonomous urban habitat Rabat (Marokko)

- ▶ **Gebäudetyp:** Einfamilienhaus
- ▶ **Status:** Bestand
- ▶ **Standard:** Sanierung zum energieautonomen Haus
- ▶ **Technik:** Solarthermie (Thermosiphon), Photovoltaik, Batteriespeicher, Regen- und Grauwassernutzung, Dachbegrünung, Dämmung mit Kork, natürliche Belüftung
- ▶ **Beschreibung:** Altes Riad (traditionelles marokkanisches Haus) in der Altstadt wurde renoviert und als Energie, Wasser und Abfall-autonomes Haus konzipiert, Heizung ausschließlich durch solare Gewinne.

Quelle: Soussan 2015

2. African Development Bank Casablanca (Marokko)

- ▶ **Gebäudetyp:** Büro
- ▶ **Status:** Neubau (2016)
- ▶ **Standard:** Niedrigenergie (HQE Class C) Primärenergiebedarf 132 kWh/m²a
- ▶ **Technik:** Wärmepumpe, Solarthermie, VRF-Klimaanlage⁷
- ▶ **Beschreibung:** Regionales Pilotprojekt, Energieoptimiertes Design mithilfe thermischer Simulation, ISO 14001 und ISO 9001 zertifiziert

Quelle: Agadi 2019

3. 32 Hanaa El Fal Casablanca (Marokko)

- ▶ **Gebäudetyp:** Mehrfamilienhaus (640 WE)
- ▶ **Status:** Neubau (2015)
- ▶ **Standard:** Niedrigenergie - Energy Efficiency in the Construction (CEEb), Primärenergiebedarf 53 kWh/m²a
- ▶ **Technik:** Natürliche Lüftung (Öffnungen Treppenhaus), Sonnenschutz, therm. Gebäudeoptimierung, Solarthermie, feuchtegesteuerte Lüftung
- ▶ **Beschreibung:** Europe Aid Demo Projekt, Energieoptimiertes Design mithilfe therm. Simulation

Quelle: Sadik 2015

⁷ In VRF Klimaanlagen werden klimaschädliche Kältemittel eingesetzt, wodurch die Klimaverträglichkeit dieses Beispielgebäudes vermindert wird

4. Nahwärme-/ Nahkältenetz Olot (Spanien)

- ▶ **Gebäudetyp:** Wohnheim/ Schule, Büro, Museum
- ▶ **Status:** Netzinstallation (2016)
- ▶ **Standard:** -
- ▶ **Technik:** Erneuerbare Energien für ein Wärme-/ Kältenetz
- ▶ **Beschreibung:** Nahwärme- und Nahkältenetz für ein urbanes Quartier in Spanien, basierend auf Biomasse, Photovoltaik und Geothermie

Quelle: Laudy 2016

5. Fuencarral Wohngebäude Madrid (Spanien)

- ▶ **Gebäudetyp:** Mehrfamilienhaus (2 WE) + Geschäft im EG
- ▶ **Status:** Bestand
- ▶ **Standard:** Sanierung zum Niedrigenergiestandard „3 hojas VERDE“ Cert. A; Primärenergiebedarf 26 kWh/m²a
- ▶ **Technik:** Photovoltaik, Tageslichtlenkung, Dämmung, Austausch Fenster, Wärmepumpe, Fußbodenheizung, Solarthermie, reversible. Wärmepumpe zur Kälteerzeugung, Kühldecke, Lüftung mit Wärmerückgewinnung
- ▶ **Beschreibung:** Sehr umfassende Sanierung zum Niedrigstenergiegebäude

Quelle: Greciano 2014

6. Wohnhaus Lleida (Spanien)

- ▶ **Gebäudetyp:** Einfamilienhaus
- ▶ **Status:** Neubau (2009)
- ▶ **Standard:** Passivhaus; Primärenergiebedarf 52 kWh/m²a
- ▶ **Technik:** Solarthermie, Photovoltaik, Biomasse-Kessel, natürliche Lüftung, Verschattungselemente
- ▶ **Beschreibung:** Solar optimiertes Passivhaus mit Innenhof; Holzbau mit Schafwolldämmung; angeblich positive CO₂-Bilanz unter Berücksichtigung der CO₂-Bindung der verwendeten Baumaterialien



Quelle: Passivhaus Institut (PHI) -c

7. Notre Dame du Mont (Libanon)

- ▶ **Gebäudetyp:** Wohnheim
- ▶ **Status:** Bestand
- ▶ **Standard:** keiner, 83 % solare Deckung
- ▶ **Technik:** Solarthermie (Solar Pergola), Pufferspeicher
- ▶ **Beschreibung:** Nachträgliche Installation eines Dachverschattungs- und Solarsystems (Patent)



Quelle: Aoun 2015

1.2.2.3 Gemäßigtes Klima

1. Klimaschutzsiedlung Dieckmannstrasse in Münster

- ▶ **Gebäudetyp:** Mehrfamilienhaus (34 WE)
- ▶ **Status:** Neubau (2012)
- ▶ **Standard:** Passivhaus, solare Deckung 90 %, Heizlast $\leq 10 \text{ W/m}^2$; Primärenergiebedarf $\leq 120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$
- ▶ **Technik:** Lüftung mit Wärmerückgewinnung, Solarthermie (350 m^2 Kollektorfläche), Thermischer Speicher (50 m^3 Wasser), Wärmepumpe
- ▶ **Beschreibung:** Gefördert durch NRW Landesprogramm "100 Klimaschutzsiedlungen", erfüllt Passivhaus-Kriterien, Solarhaus



Quelle: Energieagentur NRW

2. Klimaschutzsiedlung Projekt 42 in Bonn

- ▶ **Gebäudetyp:** Wohnheim (32 WE)
- ▶ **Status:** Neubau (2015)
- ▶ **Standard:** Passivhaus und Effizienzhaus 40 Plus
- ▶ **Technik:** Lüftung mit Wärmerückgewinnung, Photovoltaik, Erdwärmepumpe, Batteriespeicher, Smart home, gesteuerte Verschattungselemente, Holzbauweise, 40 cm Zellulosedämmung
- ▶ **Beschreibung:** Ökologisches Studentenwohnheim, gefördert durch NRW Landesprogramm "100 Klimaschutzsiedlungen", erfüllt Passivhaus-Kriterien, Plusenergiehaus



Quelle: 42! 2017

3. Aktiv Stadthaus Frankfurt am Main

- ▶ **Gebäudetyp:** Mehrfamilienhaus (74 WE)
- ▶ **Status:** Neubau (2015)
- ▶ **Standard:** Effizienzhaus Plus
- ▶ **Technik:** Photovoltaik (Dach und Fassade), Wärmepumpe mit Abwärmenutzung aus Abwasserkanal, Puffer- und Batteriespeicher, Carsharing mit Elektroautos
- ▶ **Beschreibung:** Pilotprojekt Plusenergie mit 45 % solarer Deckung, Jahresbilanz klimaneutral, keine aktive Kühlung



Quelle: HHS Hegger Hegger Schleiff Architekten 2015

4. Aktiv Stadthaus im Bestand Frankfurt am Main (DE)

- ▶ **Gebäudetyp:** Mehrfamilienhaus (74 WE)
- ▶ **Status:** Bestand
- ▶ **Standard:** Sanierung zum Effizienzhaus Plus (Nur-Strom-Haus);
Hüllstandard: KfW 70-Standard
Primärenergiebedarf 15 kWh/m²a
- ▶ **Technik:** Sanierung Gebäudehülle, Photovoltaik (auf Dach und an Fassade), Lüftungsanlage
- ▶ **Beschreibung:** Plusenergie durch Photovoltaik



Quelle: ABG Frankfurt Holding 2021

5. LVR-Zentralverwaltung Köln

- ▶ **Gebäudetyp:** Büro
- ▶ **Status:** Bestand
- ▶ **Standard:** kein
- ▶ **Technik:** Grundwasserkälteanlage (passive Kühlung über Wärmeübertrager)
- ▶ **Beschreibung:** Da in Rheinnähe bietet sich diese Art der Kühlung an. Das erwärmte Wasser wird in den Rhein zurückgeleitet



Quelle: Umweltbundesamt (UBA) 2015

6. Max-Planck-Gymnasium in Karlsruhe

- ▶ **Gebäudetyp:** Schule/Kita
- ▶ **Status:** Bestand
- ▶ **Standard:** Effizienzhaus Plus
- ▶ **Technik:** Dämmung der Gebäudehülle, Austausch Fenster mit automatischer Fensteröffnung für die ventilatorunterstützte Nachtlüftung, CO₂-gesteuerte Aktivierung
- ▶ **Beschreibung:** Sanierung einer Schule, Entwicklung eines Fensterlüftungssystems als geringinvestive Maßnahme



Quelle: Umweltbundesamt (UBA) 2014

7. ZAE Forschung und Verwaltung Würzburg (DE)

- ▶ **Gebäudetyp:** Büro
- ▶ **Status:** Neubau (2013)
- ▶ **Standard:** -
- ▶ **Technik:** Passive Infrarot-Kühlanlage (PINC), Kühldecken, Regenwasser-Kältespeicher, Gebäudeautomationssystem, Vakuumisulationspaneele, energieoptimierte textile Hülle, Phasenwechselmaterial (PCM)
- ▶ **Beschreibung:** Pilotprojekt zu Forschungszwecken; Test und Monitoring verschiedener Techniken. Ein mit Regenwasser gefüllter Löschwassertank dient als Kühlwasserspeicher. Die Rückkühlung erfolgt durch natürliche Abkühlung (Dachkollektoren zur Ausnutzung der Nachtkälte)



Quelle: Umweltbundesamt (UBA) 2012

1.2.3 Zusammenfassende Bewertung der Beispielgebäude

Die Auswertung der 18 Beispielgebäude aus verschiedenen Klimazonen ergibt eine gute Übersicht des Stands der Technik, insbesondere im Hinblick auf die Gebäudekühlung. Sowohl Maßnahmen der Entwurfsoptimierung als auch aktive und passive Techniken zur Kühlung und Lüftung wurden in vielen Gebäuden umgesetzt. Die Auswertung zeigt, dass in den Klimazonen mit erhöhtem Kühlbedarf vielfältige Maßnahmen zur Gebäudekühlung eingesetzt werden. Dagegen sind aktive Kühlmaßnahmen bei den Beispielen des gemäßigten Klimas (Deutschland) eher selten. Der künftigen Entwicklung in Bezug auf sommerlicher Hitze und deren Vermeidung wird dabei oft noch nicht ausreichend Rechnung getragen.

Beispiele aus Deutschland zeigen, dass der sommerliche Komfortbereich (d. h. operative Raumtemperaturen bis 27°C) in vielen Wohnungen nicht (mehr) eingehalten werden kann⁸. Selbst bei neuen, als vorbildlich geltenden Niedrigstenergiegebäuden treten häufig Probleme beim sommerlichen Komfort auf. Beispielsweise gaben im Rahmen eines Monitorings und einer Nutzerbefragung bei dem im Jahr 2015 errichtete Aktivhaus in Frankfurt (siehe oben) 35 % der befragten Bewohner an, dass sich die Wohnung im Sommer schnell aufheize (Nusser und Dietel 2016).

Die folgende Tabelle zeigt eine bewertende Übersicht der Beispielgebäude.

⁸ Siehe z. B. Schröder 2019

Tabelle 5: Zusammenfassende Bewertung der Beispielgebäude

Gebäude	Klima	Klimaresilienz	Klimaschutzwirkung	Raumklimaqualität ⁹	Angaben zur Kosten- bzw. zur Wirtschaftlichkeit	Übertragbarkeit des Konzeptes
AREE Aqaba Residence (Jordanien)	Tropisch, bzw. Wüste	passive und aktive Maßnahmen zur Kühlung	nicht klimaneutral – aber gute Ansätze bzgl. passiver Maßnahmen	gut - passive und aktive Maßnahmen zur Kühlung	Investitionen 50 % höher als in konventionellen Gebäuden	gute Übertragbarkeit der verschiedenen Maßnahmen
Forschungsinstitut Passivhaus Dubai (VAE)	Tropisch, bzw. Wüste	passive und aktive Maßnahmen zur Kühlung	gut - Passivhaus	gut - passive und aktive Maßnahmen zur Kühlung	Keine Angaben	da zu Forschungszwecken konzipiert, techn. Konzept nur eingeschränkt übertragbar
Österr. Botschaft Jakarta (Indonesien)	tropisch	passive und aktive Maßnahmen zur Kühlung	gut – Passivhaus	gut - passive und aktive Maßnahmen zur Kühlung	Keine Angaben	da Vorzeigebäude, nur eingeschränkt übertragbar
Autonomous urban habitat Rabat (Marokko)	subtropisch	passive Maßnahmen zur Kühlung	klimaneutral	ausreichend - passive Maßnahmen zur Kühlung (Lehmmauern, Belüftung)	Sanierungskosten: 70.000 €	gute Übertragbarkeit der verschiedenen Maßnahmen
African Development Bank Casablanca (Marokko)	subtropisch	passive und aktive Maßnahmen zur Kühlung	nicht klimaneutral – aber guter Ansatz für Maßnahmen im Neubau,	gut - passive und aktive Maßnahmen zur Kühlung	Neubau 18 Mio. € inkl. Datacenter; Investitionskosten: ca. 1.000€/m ²	gute Übertragbarkeit der verschiedenen Maßnahmen, abgesehen vom HFKW-Einsatz
32 Hanaa El Fal Casablanca (Marokko)	subtropisch	passive Maßnahmen zur Kühlung	nicht klimaneutral – aber gute Ansätze zu passiven Maßnahmen	ausreichend - passive Maßnahmen zur Kühlung (Belüftung, Orientierung)	Investitionskosten: 12,5 Mio. €; 380 €/m ²	gute Übertragbarkeit der verschiedenen Maßnahmen

⁹ Qualitative Bewertung der Autoren, auf der Grundlage des angegebenen Kühlsystems

Gebäude	Klima	Klimaresilienz	Klimaschutzwirkung	Raumklimaqualität ⁹	Angaben zur Kosten- bzw. zur Wirtschaftlichkeit	Übertragbarkeit des Konzeptes
Nahwärme-/kältenetz Olot (Spanien)	subtropisch	aktive Kühlung	klimateutral	gut – aktive Kühlung	Investitionskosten: 935.000 €	gute Übertragbarkeit des Gesamtkonzeptes
Fuencarral Wohngebäude Madrid (Spanien)	subtropisch	passive und aktive Maßnahmen zur Kühlung	nicht klimateutral – aber guter Ansatz für Maßnahme im Bestand	gut - passive und aktive Maßnahmen zur Kühlung	Investitionskosten: 200.000 €; 950 €/m ²	gute Übertragbarkeit der verschiedenen Maßnahmen
Wohnhaus Lleida (Spanien)	subtropisch	passive und aktive Maßnahmen zur Kühlung	klimateutral	ausreichend - passive Maßnahmen zur Kühlung, Sonnenschutzverglasung	Investitionskosten: 195.000 €; 1.100 €/m ²	gute Übertragbarkeit der verschiedenen Maßnahmen oder Gesamtkonzept
Notre Dame du Mont (Libanon)	subtropisch	Verschattungseinrichtungen, Solarenergie	solare Erzeugung	keine Angaben zur Kühlung	Keine Angaben	gute Übertragbarkeit
Klimaschutzsiedlung Dieckmannstraße Münster	Gemäßigt	guter Dämmstandard, keine Maßnahmen zur Kühlung	90 % solarer Deckungsbeitrag	keine Angaben zur Kühlung	Keine Angaben	gute Übertragbarkeit
Klimaschutzsiedlung Projekt 42 Bonn (DE)	Gemäßigt	guter Dämmstandard, Holzbauweise	klimateutral	guter Wärmeschutz, gesteuerte Verschattung	Keine Angaben	gute Übertragbarkeit
Aktiv Stadthaus Frankfurt am Main	Gemäßigt	keine Maßnahmen zur Kühlung	klimateutral	keine Angaben zum Wärmeschutz – laut Monitoring für 35 % der Befragten zu warm	Keine Angaben	gute Übertragbarkeit für innerstädtisches Wohnen

Gebäude	Klima	Klimaresilienz	Klimaschutzwirkung	Raumklimaqualität ⁹	Angaben zur Kosten- bzw. zur Wirtschaftlichkeit	Übertragbarkeit des Konzeptes
Aktiv Stadthaus im Bestand Frankfurt am Main	Gemäßigt	Verbesserung durch Sanierung	klimaneutral	Verbesserung durch Sanierung	Keine Angaben	gute Übertragbarkeit, da viele Gebäude gleichen Typs in Deutschland
LVR-Zentralverwaltung Köln	Gemäßigt	Verbesserung durch geringinvestive Maßnahmen	nicht klimaneutral – aber guter Ansatz für Maßnahme im Bestand	gut - effiziente Kältebereitstellung	Keine Angaben	eingeschränkte Übertragbarkeit der Maßnahme, da Problem der Aufheizung von Grundwasser/ Fluss
Max-Planck-Gymnasium Karlsruhe	Gemäßigt	Verbesserung durch geringinvestive Maßnahmen	nicht klimaneutral – aber gute Ansätze für Maßnahmen im Bestand	gut - CO ₂ -Konzentration und sommerliche Wärme reduziert	Keine Angaben	gute Übertragbarkeit der Maßnahmen auf andere Schulen/ Kindertagesstätten
ZAE Forschung und Verwaltung Würzburg	Gemäßigt	Verbesserung durch geringinvestive Maßnahmen	nicht klimaneutral – aber guter Ansatz für Maßnahme im Neubau	gut - effiziente Kältebereitstellung	Keine Angaben	gute Übertragbarkeit der Maßnahmen auf andere Bürogebäude

1.2.4 Extraktion und Zusammenfassung klimaneutraler Konzepte zur Sicherstellung eines klimaresilienten Komforts in Gebäuden

Als Ergebnis der Recherche zu den Praxisbeispielen wurden die verschiedenen Maßnahmen, die zur Vermeidung von zu hohen Raumtemperaturen auf Gebäudeebene zur Anwendung kommen, in Tabelle 6 zusammengestellt:

Tabelle 6: Übersicht der Maßnahmen zur Sicherstellung eines klimaresilienten Komforts in klimaneutralen Gebäuden

Nr.	Bezeichnung	Kurzbeschreibung
1	Gebäudedesign/ Gebäudevolumen und Orientierung	Der Gebäudeentwurf ist maßgeblich für die physikalischen Eigenschaften des Gebäudes. Das Verhältnis von Außenfläche zu Volumen (A/V) hat einen starken Einfluss auf Wärmeverluste und Wärmegewinne. Zudem ist die Ausrichtung besonderer Flächen, insbesondere der Gebäudeöffnungen (Fenster), wesentlich für den Solareintrag in das Gebäude. Die Positionierung und Größe der Fenster kann daher für den gezielten Gewinn oder zur Vermeidung solarer Wärme genutzt werden.
2	Materialwahl und Ausführung	Die Auswahl des Materials hat einen Einfluss auf die Speicherefähigkeit des Gebäudes. Massive Mauern erhöhen die Trägheit des Gebäudes, wohingegen Leichtbauweise schneller auf Temperaturänderungen reagiert. Diese Möglichkeit kann je nach Klimaanforderungen eingesetzt werden, um den Behaglichkeitsbereich im Innenraum (19-26°C) aufrecht zu erhalten. Auch die Farbwahl hat einen Effekt auf die Erwärmung des Bauteils. Der <i>solar reflectance index</i> (SRI) gibt die Eigenschaften des Bauteils in Bezug auf die Reflektion solarer Einstrahlung an.
3	Energiestandards Gebäudehülle/ Bauteilqualität	Zusätzliche Dämmung bzw. eine hohe energetische Qualität der Bauteile, wie Fenster und Türen, beeinflusst den Wärmetransfer von außen nach innen (umgekehrt in der Heizsaison). Gut gedämmte Bauteile und eine luftdichte Gebäudehülle halten die gewünschte Innentemperatur durch geringe Wärmetransmission länger aufrecht. Zur Vermeidung sommerlicher Wärme ist auch die Art der Verglasung wesentlich: Selektives Sonnenschutzglas mit einem niedrigen g-Wert reduziert zwar den Solareintrag, ist jedoch kein effektiver Sonnenschutz und verhindert solare Gewinne während der Heizperiode.
4	Sommerlicher Wärmeschutz durch Verschattungseinrichtungen	Verschiedene Maßnahmen der Verschattung von Bauteilen, insbesondere von Fenstern sind möglich. Während bei südorientierten Fenstern einfache feste Verschattungselemente wirksam sein können, sind in den meisten Fällen flexible Lösungen wie außenliegende Schiebeelemente oder Sonnenschutzlamellen empfehlenswert. In Deutschland muss der sommerliche Wärmeschutz von Räumen in Neubauten nachgewiesen werden ¹⁰ .
5	Gebäudelüftung aktiv/passiv	Durch geeignete Lüftungskonzepte kann ein erheblicher Beitrag zur Vermeidung einer sommerlichen Überhitzung erreicht werden. Lüftungskonzepte reichen von passiven Lösungen wie Querlüftungskonzepten, Nachlüftung und Luftschächte bis hin zu Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und Entfeuchtung sowie Erd- oder Grundwasservortemperierung. Es können auch passive und aktive Maßnahmen kombiniert werden, um eine ausreichende Kühlung zu erreichen.
6	Maßnahmen zur Gebäudekühlung	Neben Klimaanlage mit klimaverträglichen (natürlichen) Kältemitteln können auch andere effiziente Techniken zur Gebäudekühlung zum Einsatz kommen. Z. B. können Sorptionskälteanlagen Kälte mittels Wärme, d. h. ohne signifikanten Strombedarf erzeugen und daher z. B. solarthermisch erzeugte Wärme effektiv nutzen (=> Solare Kühlung). In gemäßigten Klimaregionen kann auch das Erdreich oder das Grundwasser als Wärmesenke genutzt

¹⁰ Der Nachweis ist auf der Grundlage der DIN 4108 Beiblatt 2

Nr.	Bezeichnung	Kurzbeschreibung
7	Begrünung/ Wassernutzung	werden. Eine wirksame Maßnahme zur Verbesserung der Effizienz von Kühlsystemen sind Flächenkühlungen/ -heizungen/ Kühldecken. Diese sog. <i>Low Exergy</i> -Systeme verbessern die Effizienz der Kälteerzeugung, mindern die Verluste und können die Nutzung erneuerbarer Wärme- und Kälteerzeugung, z. B. die Nutzung von Grundwasser, ermöglichen. Die Begrünung von Dach und Fassade trägt zu einem verbesserten Mikroklima bei. Hierfür kann Regenwasser genutzt und Grauwasser recycelt werden.
8	Effiziente Anwendungen	Elektrische Geräte und Beleuchtung sollten eine hohe Effizienz haben, was einerseits den Stromverbrauch und andererseits den internen Wärmeeintrag reduziert.
9	Erneuerbare Kälte-/ Wärmeeerzeugung	Zur Klimaschonenden Kälte- bzw. Wärmeeerzeugung können erneuerbare Energiesysteme auf/ in dem Gebäude zur Anwendung kommen, um die gewünschte Innentemperatur aktiv herzustellen. Solarthermische Anlagen, Photovoltaik (z. B. für elektrische solare Kühlung), Biomasse, Geothermie und Grundwasser können dabei zur Versorgung von dezentralen oder zentralen Systemen (z. B. Fernkälte) zum Einsatz kommen.

Vor allem in Klimazonen, in denen Heizen und Kühlen zu etwa gleichen Anteilen notwendig ist (subtropisches Klima), kann häufig durch passive und geringinvestive Maßnahmen bereits viel erreicht werden. Dies ist bedingt durch die relativ geringe Abweichung der Außentemperatur von der Innenraumtemperatur (Durchschnittstemperaturen: Indonesien 25,8 °C (tropisch), Tunesien 19,2 °C (subtropisch), Deutschland 8,5 °C (gemäßigt)).

Eine Analyse der IEA-Fallstudien (Donn und Garde 2014) ergab, dass es in kalten und gemäßigten Klimazonen am effizientesten ist, den Wärmefluss durch eine gute Dämmung der Gebäudehülle zu begrenzen. Daher ist die Wahl eines möglichst niedrigen U-Wertes für Wände, Dach, Boden und Fenster sowie eine luftdichte Gebäudehülle wesentlich. In subtropischen Klimazonen sollten vor allem das Dach und ggf. die Wände über einen guten Wärmeschutz verfügen, während der Boden nicht gedämmt werden sollte, um die Wärmeabfuhr durch den Boden im Sommer zu ermöglichen. Hier führt die Umsetzung einer optimalen Kombination aus passiven Designparametern zu erheblichen Energieeinsparungen durch Reduzierung der jährlichen Heiz- und Kühllasten. Passive Maßnahmen zur Kühlung wie Verschattungseinrichtungen und natürliche Belüftung führen in fast allen Regionen zu Einsparungen bei der Kühllast von über 50 %.

Gemäß der IEA-Fallstudien ist die am häufigsten eingesetzte passive Maßnahme bei Wohngebäuden die natürliche Belüftung. Erdwärmeüberträger werden hauptsächlich in mediterranen Klimazonen eingesetzt, wo natürliche Belüftung während der Kühlperiode aufgrund der hohen Nachttemperaturen weniger effektiv ist. Bei Nichtwohngebäuden werden meist noch zusätzliche Maßnahmen angewandt. Neben natürlicher Belüftung kommen Erdwärmeüberträger, Gründächer oder -fassaden, „Thermokamine“ und Verdunstungskühlung zur Anwendung. Die Ergebnisse zeigen, dass in ca. 70 % der Fälle auf eine aktive Kühlung verzichtet wurde.

1.2.5 Systematisierung der Ergebnisse

Als Grundlage für die Entwicklung von Quartierskonzepten mit klimaschonenden Gebäuden werden im Folgenden die Ergebnisse der Recherche zu den Maßnahmen auf Gebäudeebene nach den folgenden Kriterien systematisiert:

- Eignung für verschiedene Nutzungsarten
- Eignung für unterschiedliche klimatische Bedingungen

► Eignung für Neubau/ Bestand

Tabelle 7: Systematisierung der Konzepte zur Sicherstellung eines klimaresilienten Komforts in Gebäuden

Legende: x = geeignet; (x) bedingt geeignet; - ungeeignet

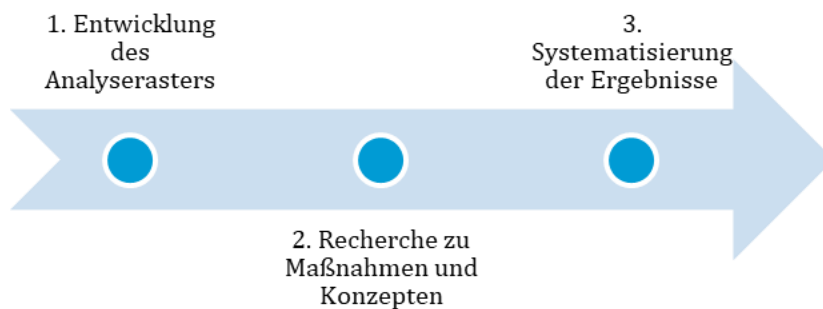
Nr.	Konzept	Eignung für verschiedene Nutzungsarten		Eignung für klimatische Bedingungen			Eignung für Neubau/ Bestand	
		Wohngebäude	Nichtwohngebäude	Gemäßigt (Mitteleuropa)	Subtropisch (Südeuropa / Nordafrika)	Tropisch	Bestand	Neubau
1	Gebäudedesign/ Gebäudevolumen und Orientierung	x	x	x	x	x	-	x
2	Materialwahl und Ausführung	x	x	x	x	x	(x)	x
3	Energiestandards Gebäudehülle/ Bauteilqualität	x	x	x	x	x	(x)	x
4	Sommerlicher Wärmeschutz durch Verschattungseinrichtungen	x	x	x	x	x	x	x
5	Gebäudelüftung aktiv/ passiv	x	x	x	x	(x)	x	x
6	Maßnahmen zur Gebäudekühlung	(x)	x	(x)	x	x	(x)	x
7	Begrünung/ Wassernutzung	(x)	x	x	(x)	x	(x)	x
8	Effiziente Anwendungen	x	x	x	x	x	x	x
9	Erneuerbare Kälte/ Wärme Erzeugung	x	x	x	x	x	(x)	x

Insgesamt zeigt sich, dass die aufgeführten Maßnahmen auf Gebäudeebene fast vollständig für alle Gebäudetypen anwendbar sind. Einschränkungen ergeben sich vor allem im Gebäudebestand, wo z. B. der Gebäudeentwurf nicht mehr optimiert werden kann. Maßnahmen zur aktiven Kühlung der Gebäude in Wohngebäuden der gemäßigten Klimazone sind u. a. aus wirtschaftlichen Gründen bisher nicht weit verbreitet.

1.3 Klimaresiliente Quartiere: Stand der Technik

Im vorliegenden Abschnitt erfolgt eine Analyse zum Stand der Technik zur Klimaresilienz von Quartieren in Bezug auf die Entwicklung von urbanen Hitzeinseln. Das methodische Vorgehen bei der Recherche gliedert sich in drei Arbeitsschritte (siehe Abbildung 1), die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

Abbildung 1: Übersicht des Vorgehens zur Analyse der Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

1.3.1 Erstellung eines Analyserasters

Im ersten Schritt wurde ein Analyseraster zur systematischen Darstellung der zu eruierenden Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln entwickelt. Dabei wurden die folgenden Elemente herausgearbeitet:

1. Kurzbeschreibung: Kurze Zusammenfassung der Wirkweise der Maßnahme, je nach Datenverfügbarkeit quantitative Wirkung, Darstellung verschiedener Parameter zur Ausgestaltung.
2. Einschränkungen: Beschreibung möglicher Hemmnisse und Zielkonflikte im Zusammenhang mit der Maßnahme.
3. Anwendbarkeit nach Klimazonen: Kurze Einschätzung, inwiefern die Maßnahme sich neben Mitteleuropa auch für weitere Klimazonen eignet.
4. Rechtliche Rahmenbedingungen: Darstellung der Regularien, die im Zusammenhang mit der Maßnahme eine Rolle spielen können.
5. Praxisbeispiele: Kurze Beschreibung von Praxisbeispielen, bei denen die jeweilige Maßnahme umgesetzt wurde.
6. Quellen: Angabe der verwendeten Literatur.

Die genannten Punkte wurden in einer Vorlage zusammengefasst, die die Grundlage für die Recherche bildete (siehe folgender Abschnitt).

1.3.2 Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln

Im zweiten Schritt werden anhand einer Literaturrecherche Maßnahmen identifiziert und bezüglich der im Analyseraster dargestellten Punkte untersucht. Tabelle 8 gibt eine Übersicht

der betrachteten Maßnahmen. Die Ergebnisse der detaillierten Untersuchung anhand des Analyserasters (siehe Abschnitt 1.3.1) sind in Anhang A dargestellt.

Tabelle 8: Übersicht der betrachteten Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln

Nr.	Bezeichnung	Kurzbeschreibung
1	Aufhellen von Belägen und Oberflächen im Freiraum	Durch Einsatz von hellen und reflektierenden Oberflächenmaterialien mit geringer Wärmespeicherungsfähigkeit wird die Strahlungsabsorption an heißen Tagen verringert. Je heller die Gebäude und Oberflächen in einer Stadt sind, desto geringer ist die Aufheizung, weil kurzwellige Strahlung reflektiert wird und die Materialien sich weniger erwärmen. Im Gegenzug führt die erhöhte Reflexion von Flächen im Aufenthaltsbereich von Personen auch zu einer erhöhten Strahlungsexposition. Diese wirkt sich negativ auf das Behaglichkeitsempfinden aus. Der zuvor beschriebene positive Effekt der Temperaturabsenkung kann dadurch vermindert oder gar überkompensiert werden.
2	Sicherung und Erweiterung des Baumbestandes	Reduzierung der (gefühlten) Temperatur und Stabilisierung bzw. positive Beeinflussung des Stadtklimas durch: Beschattung durch Blätter und Baumkrone; Verdunstung: Abgabe von Wasserdampf über Blattoberflächen (Transpiration).
3	Sicherung bestehender und Anlage von zusätzlichen Waldflächen	Stadtnahe Waldflächen tragen aufgrund folgender Wirkweisen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln bei: Verdunstung durch Abgabe von Wasserdampf über Blattoberflächen; Beeinflussung der Luftzirkulation durch Temperaturunterschied zwischen kühlem Wald und aufgeheizter Stadt.
4	Entsiegelung von Oberflächen im Freiraum/ Vermeidung von Versiegelung	Die Entsiegelung von Oberflächen trägt zur Vermeidung des UHIE bei: Gut wasserversorgte, entsiegelte Flächen geben Feuchtigkeit an die Luft ab und kühlen diese. Wenn genügend Regenwasser versickern kann, steigt der Grundwasserspiegel. Auf entsiegelten Flächen ist der Abfluss von Regenwasser in die Kanalisation geringer. Wenn das Regenwasser nicht versickern kann, verdunstet dieses, wodurch Energie in Form von Wärme aus der Umgebung aufgenommen wird und damit kühlend auf das Kleinklima wirkt.
5	Sicherung und Erweiterung von Grün- und Freiräumen	Grüne Infrastrukturen wie Straßenbegleitgrün, begrünte Innenhöfe und Brachflächen sind wichtige Bestandteile der Stadt und tragen zur Reduktion des städtischen Hitzeinseleffektes bei. Der positive Effekt der Pflanzen beruht u. a. auf der Beschattung von horizontalen Erd- und vertikalen Gebäudeoberflächen sowie der Evapotranspiration. Bewässerte Pflanzen weisen eine höhere Verdunstungsleistung auf (Brandenburg et al. 2015). Sowohl für die Bewässerung von Pflanzen als auch die Verdunstung von Wasser zur städtischen Kühlung im Allgemeinen bietet sich die Nutzung von Regenwasser an (Sieker et al. 2019).
6	Erhaltung der städtischen Luftzirkulation und Vernetzung der Freiräume	Durch die Schaffung und Freihaltung von unbebauten, mit dem Umland verbundenen axialen Schneisen kann die städtische Luftzirkulation gefördert und die Versorgung mit Kalt- und Frischluft gewährleistet werden. Insbesondere große, zusammenhängende land- und forstwirtschaftliche Flächen sind Kaltluftproduktionsstätten.
7	Dach- und Fassadenbegrünung	Dach- und Fassadenbegrünungen reduzieren die sommerliche Aufheizung der Gebäudeoberflächen durch Beschattung. Ebenso haben sie aufgrund ihrer Verdunstungsleistung einen positiven Effekt auf die Umgebungstemperaturen und senken durch beide Effekte auch die Innenraumtemperaturen (kleineres ΔT zwischen innen und außen). In Abhängigkeit der Substratschicht wird unterschieden zwischen extensiver und intensiver Dachbegrünung.

Nr.	Bezeichnung	Kurzbeschreibung
8	Erhöhung des Wasseranteils im Quartier	Der kühlende Effekt von Wasserflächen beruht darauf, dass diese der umgebenden Luft die zur Verdunstung erforderliche Energie entzogen wird. Dieser Energieaufwand wird durch Zufuhr warmer Luft aus der Umgebung kompensiert. Bewegtes Wasser (z. B. bei Springbrunnen) trägt aufgrund der größeren Oberfläche generell stärker zur Verdunstungskühlung bei als stehende Wasserflächen. Durch Wasserzerstäuber oder Sprinkleranlagen kann der Kühlungseffekt verstärkt werden.
9	Beschattung von Freiflächen und Wegen	Die Beschattung von Freiräumen und Wegen mindert die Aufheizung von Oberflächen und führt somit zu einer geringfügigen Verbesserung des Mikroklimas. Durch die Verringerung der direkten Strahlungsleistung wird die „gefühlte“ Temperatur deutlich gesenkt und damit das Wohlbefinden der Menschen gesteigert.

1.3.3 Systematisierung der Ergebnisse

Als Grundlage für die Erstellung der Quartierskonzepte werden die Ergebnisse der Recherche zu Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln nach den folgenden Kriterien systematisiert:

- ▶ Wirkung bezüglich der Vermeidung von urbanen Hitzeinseln: Die Wirkung der jeweiligen Maßnahme wird den folgenden vier Kategorien zugeordnet:
 - Beschattung
 - Verdunstung
 - Albedo
 - Luftzirkulation
- ▶ Eignung für verschiedene klimatische Bedingungen: Es erfolgt eine Bewertung der Anwendbarkeit der Maßnahmen in Mitteleuropa (gemäßigtes Klima), Südeuropa (subtropisches Klima) und in tropischen Regionen.
- ▶ Eignung der Maßnahmen für Bestandsquartiere bzw. Neubauquartiere.

Tabelle 9 stellt die Einordnung der Maßnahmen für die oben beschriebenen Kategorien dar.

Tabelle 9: Übersicht der betrachteten Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln

Nr.	Bezeichnung	Wirkung bezüglich der Vermeidung von urbanen Hitzeinseln				Eignung für verschiedene klimatische Bedingungen			Eignung für Neubau/ Bestand	
		Beschattung	Verdunstung	Albedo	Luftzirkulation	Mitteleuropa	Südeuropa	Wüstenklima	Bestand	Neubau
1	Aufhellen von Belägen und Oberflächen im Freiraum	-	-	x	-	x	x	x	x	x
2	Sicherung und Erweiterung des Baumbestandes	x	x	-	-	x	x	-	x	x
3	Sicherung bestehender und Anlage von zusätzlichen Waldflächen	(x)	x	-	-	x	x	-	(x)	x
4	Entsiegelung von Oberflächen im Freiraum/ Vermeidung von Versiegelung	-	x	-	-	x	x	-	x	x
5	Sicherung und Erweiterung von Grün- und Freiräumen	(x)	x	-	(x)	x	x	(x)	x	x
6	Erhaltung der städtischen Luftzirkulation und Vernetzung der Freiräume	-	-	-	x	x	x	x	(x)	x
7	Dach- und Fassadenbegrünung	x	x	-	-	x	x	(x)	x	x
8	Erhöhung des Wasseranteils im Quartier	-	x	-	-	x	x	-	x	x
9	Beschattung von Freiflächen und Wegen	x	-	-	-	x	x	x	x	x

Legende: x = geeignet; (x) bedingt geeignet; - ungeeignet

1.4 Praxisbeispiele zur Vermeidung von Hitzeinseln

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Maßnahmen und Konzepte zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln werden in unterschiedlichem Umfang bereits in der Planung neuer Stadtteile sowie im Bestand berücksichtigt. Als Grundlage für die Entwicklung und Untersuchung der optimierten Quartierskonzepte (siehe Kapitel 2) wurden Praxisbeispiele untersucht, in denen eine oder mehrere der in Tabelle 8 dargestellten Maßnahmen erfolgreich umgesetzt wurden bzw. in der Planungsphase berücksichtigt sind.

Das methodische Vorgehen zur Auswahl und Dokumentation der Praxisbeispiele ist in Abbildung 2 dargestellt.

Abbildung 2: Übersicht des Vorgehens zur Untersuchung von Praxisbeispielen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

1.4.1 Entwicklung von Quartiersteckbriefen

Zur Dokumentation der Praxisbeispiele wurde ein standardisierter Steckbrief entwickelt, der die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- ▶ Kurzbeschreibung: Die relevanten Charakteristika des Quartiers werden dargestellt
- ▶ Konzept: Die im Quartier berücksichtigten Ansätze zur Vermeidung urbaner Hitzeinseln werden beschrieben
- ▶ Struktur des Gebäudebestands: Angaben zur Bauweise und Gebäudestruktur
- ▶ Bewertung: das Quartier wird hinsichtlich der umgesetzten Maßnahmen bewertet und es werden Potenziale für zusätzliche Maßnahmen aufgezeigt
- ▶ Quellen: Angabe der verwendeten Quellen

1.4.2 Auswahl der Praxisbeispiele

Anhand einer Literaturanalyse wurden insgesamt 14 Quartiere als Praxisbeispiele ausgewählt. Um ein breites Spektrum abzudecken, werden acht Quartiere in Deutschland, drei Quartiere in Südeuropa sowie drei Quartiere in der MENA-Region (MENA: Middle East and North Africa) betrachtet.

Als weiteres Kriterium wurden die folgenden drei Baualtersklassen berücksichtigt:

1. Älterer Bestand
2. Neuerer Bestand (ab 2008)
3. Neubau/Planung

Bezüglich der betrachteten Quartierstypen wurden folgende Kategorien berücksichtigt:

- ▶ Innenstadtquartier (kompakte Stadtstruktur, vorwiegend durch Wohnnutzung geprägt, geschlossene Blockrandbebauung)
- ▶ Verdichtetes Wohnquartier (Randbereiche der Innenstadt, vorwiegend Wohnnutzung, kompakte Blockrandstrukturen, große Zeilengebäude sowie Punkthochhäuser)
- ▶ Aufgelockertes Wohnquartier (vorwiegend Wohnnutzung, freistehende Einfamilienhäuser und kleine Mehrfamilienhäuser)
- ▶ Industrie und Gewerbe (Betriebs-, Gelände- und Industrieflächen)

Die ausgewählten Quartiere sind in Tabelle 10 (Quartiere in Deutschland) und Tabelle 11 (Quartiere in Südeuropa und im Nahen Osten) dargestellt.

Tabelle 10: Übersicht der betrachteten Quartiere in Deutschland.

Nr.	Name des Quartiers	Standort	Kurzbeschreibung der UHIE-relevanten Aspekte	Baualter	Quartiertyp
1	Bahnstadt	Heidelberg	Passivhaussiedlung, Dachbegrünung, Beschattung, Leitfaden für Investoren, umweltfreundliche Klimatisierung	Neubau/Planung	Verdichtetes Wohnquartier
2	Siedlung Bausemshorst in Altenessen	Essen	Regenwassernutzung und -versickerung, Einsatz von Wasserflächen	Neuerer Bestand	Innenstadtquartier
3	It's - neue Wohnformen	Düsseldorf	Nachverdichtung, Entsiegelung, Einsatz von Wasserflächen ¹¹	Älterer Bestand	Innenstadtquartier
4	Solarsiedlung Medienhafen	Düsseldorf	Schließung Blockrandbebauung, Solar- und Erdwärmennutzung, passive Kühlung	Neuerer Bestand	Innenstadtquartier
5	Campo Bornheim	Frankfurt am Main	Innerstädtisches Passivhausquartier, Green Building Award 2011	Neuerer Bestand	Innenstadtquartier

¹¹ Quelle: Nationale Stadtentwicklungspolitik 2015

Nr.	Name des Quartiers	Standort	Kurzbeschreibung der UHIE-relevanten Aspekte	Baualter	Quartiertyp
6	Clouth-Quartier	Köln	Freiraumkonzept „Von Grau zu Grün“, Niedrigenergie- und Passivhausstandard	Neubau/ Planung	Verdichtetes Wohnquartier
7	Gewerbegebiet Neuland 23 (in Planung)	Hamburg	Dachbegrünung, PV zur Beschattung, Festschreibung maximaler Gebäudehöhe	Neubau/ Planung	Industrie und Gewerbe
8	Vauban	Freiburg	Autoreduzierter Stadtteil mit geringem Asphaltanteil	Älterer Bestand	Aufgelockertes Wohnquartier

Tabelle 11: Übersicht der betrachtenden Quartiere in Südeuropa und der MENA-Region

Nr.	Name des Quartiers	Standort	Kurzbeschreibung der UHIE-relevanten Aspekte	Baualter	Quartiertyp
1	Bosco Verticale	Mailand, Italien	Dach- und Fassadenbegrünung mit etwa 900 Bäumen und 2000 Sträuchern	Neuerer Bestand	Innenstadtquartier
2	Besòs	Barcelona, Spanien	Wärme- und Kältenetz mit Abwärmenutzung und Meerwasserkühlung	Älterer Bestand	Innenstadtquartier
3	Zorrotzaurre Peninsula	Bilbao, Spanien	Konversionsfläche, Entsiegelung, neue Grünflächen	Neubau/ Planung	Innenstadtquartier
4	Masdar	Abu Dhabi, UAE	Optimierte Bebauungsstruktur, UHI-Analysen	Neubau/ Planung	Innenstadtquartier
5	Hashtgerd	Iran	Optimierte Bebauungsstruktur, UHI-Analysen	Neubau/ Planung	Innenstadtquartier
6	Znata	Marokko	Optimierte Bebauungsstruktur, Regenwassernutzung, Grünflächen	Neubau/ Planung	Innenstadtquartier

1.4.3 Erstellung der Steckbriefe

Anhand einer Literaturrecherche wurden die in Tabelle 10 und Tabelle 11 dargestellten Quartiere hinsichtlich ihrer Konzepte zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln vertiefend betrachtet und deren Merkmale in Form von Steckbriefen zusammengestellt.

1.4.3.1 Steckbriefe der Beispielquartiere in Deutschland

1. Bahnstadt Heidelberg

- ▶ **Kurzbeschreibung:** Neuer, 116 ha großer Stadtteil Heidelbergs auf dem Gelände des ehemaligen Güterbahnhofs und größte Passivhaussiedlung der Welt. Der Stadtteil ist sowohl Wohnviertel als auch Standort für Wissenschaft und Gewerbe und wurde unter ökologischen Gesichtspunkten geplant, welche die Entstehung von urbanen Hitzeinseln hemmen soll.
- ▶ **Konzept:** 66 % des Gebäudebestandes mit extensiver Dachbegrünung; 10 % der Fläche des Stadtteils sind Frei- und Grünflächen; Durch den hohen Anteil an Grün- und Freiflächen und Dachbegrünung kann viel Regenwasser versickern, anstatt abzulaufen, was für zusätzliche Abkühlung sorgt; Helle Fassaden und Oberflächen, welche sich weniger stark erhitzen; Wasserflächen im öffentlichen Raum
- ▶ **Struktur** des Gebäudebestandes: Flächendeckender Passivhausstandard mit bis zu 50 % weniger CO₂-Emissionen als herkömmliche Siedlungen. Die Strom- und Wärmeversorgung der Bahnstadt erfolgt durch Fernwärme, die zu 100 % aus erneuerbaren Energien stammt.
- ▶ **Bewertung:** In der Bahnstadt Heidelberg wurden verschiedene Techniken zur Vermeidung von UHIE bei der Planung, wie die Erhaltung von Freiflächen, eine extensive Dachbegrünung und die Verwendung heller Oberflächenmaterialien und Wasserflächen, implementiert. Durch die Kombination dieser verschiedenen Techniken entstehen Synergieeffekte, welche eine zusätzliche Hitzeinselvermeidung bewirken sollen. Es gibt jedoch auch Hinweise darauf, dass das Konzept nicht im beabsichtigten Maße wirksam ist und die Temperaturen im Quartier sogar höher sind als in anderen Quartieren Heidelbergs (Kükrekol 2020).



Quelle: Wikimedia Commons 2014

2. Siedlung Bausemshorst in Altenessen, Essen

- ▶ **Kurzbeschreibung:** Wohnumfeldverbesserung durch Regenwassermanagement im Mehrgenerationenquartier
- ▶ **Konzept:** Das Regenwasser versickert in Mulden und Rigolen auf dem Siedlungsgelände. Das Regenwasser von den Dächern wird durch offene Bodenrinnen in bepflanzte Wasserbecken in den Innenhöfen der Siedlung geleitet, wodurch aufgrund der Verdunstungskühle des Wassers und der Abgabe von Wasserdampf der Pflanzen eine spürbare Verbesserung des Mikroklimas erreicht wird. 60 % des rund 3 ha großen Areals sind in die naturnahe Regenwasserbewirtschaftung integriert, damit werden ca. 12.240 Kubikmeter Wasser pro Jahr von der Kanalisation ferngehalten.
- ▶ **Struktur des Gebäudebestandes:** Neubau von 99 Wohneinheiten und 10 Einfamilien-Niedrigenergiehäusern gemäß dem KfW-Energieeffizienzhaus-70-Standard
- ▶ **Bewertung:** Durch das umweltfreundliche Regenwasserkonzept wird ein angenehmes Mikroklima im gesamten Siedlungsraum geschaffen. Durch die Versickerung wird das Regenwasser dem natürlichen Wasserkreislauf zugeführt, außerdem entfallen für die mietenden Personen weitgehend die Abwassergebühren. Um einen zusätzlichen Kühlungseffekt zu erreichen, könnten Dach- und Fassadenbegrünungen angelegt werden.

Quellen: Raasch 2015; Wilhelm 2018

3. „It's - Neue Wohnformen“ Düsseldorf

- ▶ **Kurzbeschreibung:** Neubau einer autofreien Wohnanlage mit 82 Wohneinheiten auf dem Gelände eines ehemaligen Autohauses
- ▶ **Konzept:** Revitalisierung eines vollständig versiegelten Geländes; Der Versiegelungs- und Bebauungsgrad konnte um je 30 % reduziert werden; zugleich sind umfangreiche Grün- und Wasserflächen entstanden, welche den Klimakomfort erhöhen; Verwendung heller Oberflächen- und Fassadenmaterialien
- ▶ **Struktur des Gebäudebestandes:** Dreigeschossige Wohnkomplexe in Niedrigenergiehausstandard mit Dachbegrünung und Innenhöfen; Entsiegelung und Bepflanzung umliegender Freiflächen und Anlage von 700 m² Wasserflächen; Tiefgarage mit 82 Stellplätzen. Die Tiefgaragenrampe ist mit einer Pergolakonstruktion überdeckt und begrünt
- ▶ **Bewertung:** Aufgrund des hohen Anteils an entsiegelten Oberflächen stellt sich ein hoher Aufenthaltskomfort für die Anwohnenden ein. Der Mix aus hellen Fassaden, begrünten Dach- und Freiflächen, sowie der großzügigen Wasserflächen entstehen Synergien, welche die Bildung von Hitzeinseln mindern.

Quellen: Nationale Stadtentwicklungspolitik 2015; Rasch 2015

4. Solarsiedlung Medienhafen Düsseldorf

- ▶ **Kurzbeschreibung:** Neugebaute Wohnanlage mit 101 Wohneinheiten, fassadenintegrierter Photovoltaik-Anlage, Erdwärmenutzung und passiver Kühlung
- ▶ **Konzept:** Passive Kühlung der Räume durch Erdsonden; Geschützte Innenhöfe mit Beschattungseffekten; 260 m² Dachbegrünung
- ▶ **Struktur des Gebäudebestandes:** Die im Stadtteil vorherrschende städtebauliche Struktur der Blockrandbebauung wird fortgeführt, wodurch ein attraktiver, geschützter Wohnhof entsteht; Energiestandard: 3-Liter-Haus nach PHPP
- ▶ **Bewertung:** Zusätzlich zur Dachbegrünung könnte eine Begrünung der Fassade angelegt werden

Quellen: Energieagentur NRW; Wortmann & Wember 2009

5. Campo Bornheim, Frankfurt am Main

- ▶ **Kurzbeschreibung:** Gelegen in Frankfurt-Bornheim; Revitalisierung einer innerstädtischen Industriebrache (Innenstadtquartier); Baujahr 2009 (Neuerer Bestand); Wohnhäuser im Passivhauswohnstandard; Ausgezeichnet mit dem deutschen Städtebaupreis 2010 und dem Frankfurter Green Building Award 2011
- ▶ **Konzept:** Konversion des ehemaligen Straßenbahndepots Bornheim zu einem Wohnquartier im Passivhausstandard mit Geschosswohnungsbau, Handel und Gastronomie; 20 % weniger versiegelte Flächen (v. a. Innenhöfe entsiegelt); Tiefgarage mit 250 Stellplätzen (Vermeidung zusätzlicher Versiegelung durch oberirdische Parkplätze); Durch die Gebäude wird ein fünfgeschossiger Blockrand arrondiert und eine Gasse geschaffen (öffentlicher Weg in Nord-Süd-Richtung)
- ▶ **Struktur des Gebäudebestandes:** Areal ca. 10.000 m², davon 1.100 m² Gewerbefläche; 11 Stadthäuser mit insgesamt 140 Wohnungen (vier- und fünfgeschossige Gebäuderiegel); Wohnhäuser werden mit Abwärme des Supermarkts gespeist; Heizenergiebedarf 15 kW pro Quadratmeter im Jahr
- ▶ **Bewertung:** Geringe Pro-Kopf-THG-Emissionen, erhöhter Anteil an Grünflächen, neu angelegter Fußgängerweg. Um eine zusätzliche Abkühlung zu erreichen, könnten auch hier die Dachflächen begrünt werden.

Quellen: AS+P; Deutschen Akademie für Städtebau und Landesplanung 2010; Mauritz; Nationale Stadtentwicklungspolitik 2015

6. Clouth-Quartier Köln

- ▶ **Kurzbeschreibung:** Neues Stadtviertel in Köln auf ehemaligem Industriegelände. Insgesamt entstanden auf dem 14,5 ha großen Gelände 1.200 Wohneinheiten im Niedrigenergie- und Passivhausstandard.
- ▶ **Konzept:** Freiraumkonzept „Von Grau zu Grün“ mit Schaffung einer Vielzahl öffentlicher und halböffentlicher Grünflächen; Neupflanzung von 50 Bäumen auf dem zentral gelegenen Luftschiffplatz; Anlage einer 7.000 m² großen zusammenhängenden Grünfläche; Fußwege innerhalb des Quartiers sind autobefreit und bestehen aus hellem Dolomitsplit, welcher wasserdurchlässig ist
- ▶ **Struktur des Gebäudebestandes:** Die 3-stöckigen Wohnkomplexe sind um begrünte und beschattete Innenhöfe arrondiert; Teilweise Begrünung von Dächern in Form von begehbaren Dachgärten
- ▶ **Bewertung:** Aufgrund der Größe der zusammenhängenden Grünfläche ist eine spürbare Verbesserung des Klimakomforts der Anwohnenden zu erwarten. Da vorwiegend dunkle Fassadenmaterialien mit geringer Albedo verwendet wurden, wird nicht das volle Potenzial einer Vermeidung von Hitzeinselentwicklung erreicht. Um einen zusätzlichen Kühlungseffekt zu erreichen könnten die Dach- und Fassadenflächen begrünt und Wasserflächen auf dem Gelände angelegt werden.



Quelle: Wikimedia Commons 2018

Quellen: Kölner Wochenspiegel 2018; Rhein Exclusiv 2017

1.4.3.2 Steckbriefe der südeuropäischen und subtropischen Quartiere

1. Sant Adria de Bèsos, Barcelona

- ▶ **Kurzbeschreibung:** In den Stadtteilen Forum und 22@ wurde ein städtisches Fernwärme-/ Fernkältenetz entwickelt, welches mit erneuerbaren Energien betrieben wird und seit 2004 in Betrieb ist.
- ▶ **Konzept:** In der Erzeugungszentrale Forum der Districlima S.A. wird zum überwiegenden Teil Dampf aus der nahegelegenen Müllverbrennungsanlage Sant Adrià de Besòs zur Wärme- bzw. Kältebereitstellung genutzt. Über den Prozessdampf werden vier Dampf-/ Wasser-Wärmeüberträger zur Wärmebereitstellung und zwei indirekt mit Meerwasser gekühlte Absorptionskältemaschinen zur Kälteerzeugung betrieben. Die restliche benötigte Kälteleistung wird über insgesamt vier zum Teil direkt, zum Teil indirekt mit Meerwasser gekühlte Kompressionskälteanlagen¹² bereitgestellt. Als Puffermöglichkeit umfasst das System einen 5.000 m³ Kaltwasserspeicher. Die Ausfallsreserve für den Dampf aus der Müllverbrennung bildet ein Gaskessel. Pro Jahr können die Kompressionskälteanlagen 6,7 MWh an Wärme über das Kühlmittel Wasser abführen.
- ▶ **Struktur des Gebäudebestandes:** Insgesamt sind 94 Gebäude an das System angeschlossen. Dabei handelt es sich vor allem um öffentliche Gebäude wie Universitäten und Krankenhäuser, aber auch um Wohnungen und Büros.
- ▶ **Bewertung:** Durch das Fernwärme-/ Fernkältenetz werden pro Jahr ca. 17.000 t CO₂ eingespart. Wie groß der Einfluss der Verlagerung der Kälteerzeugungsanlagen aus dem Stadtzentrum in den Randbereich auf das urbane Mikroklima ist, wird nicht beschrieben. Neben der Kühlung der Gebäude durch das Fernkältenetz hätte man zusätzlich noch Dach- und Fassadenbegrünung etablieren können, um einen zusätzlichen synergetischen Kühlungseffekt zu erreichen.

Quellen: Faustmann und Hollauf 2014; Hollauf und Faustmann 2014; Serrano 2016; ENGIE 2013

¹² Die Anlagen werden vermutlich mit konventionellen Kältemitteln statt mit empfehlenswerten klimafreundlichen natürlichen Kältemitteln betrieben.

2. Bosco Verticale, Mailand

- ▶ **Kurzbeschreibung:** Bosco Verticale (dt. Vertikaler oder Senkrechter Wald) werden die begrünten Zwillingstürme eines Hochhauskomplexes in Mailand genannt.
- ▶ **Konzept:** Konzept des Projektes ist es den urbanen Raum möglichst effektiv zu nutzen, ihn nicht weiter zu versiegeln und gleichzeitig die Biodiversität in der Großstadt Mailand zu verbessern. Mit der Bepflanzung der Türme wurden neue Lebens- und Nahrungsräume für Insekten und Vögel geschaffen; so können die Wohntürme als Trittsteinbiotope zwischen den öffentlichen Parks, den Alleen und innerstädtischen Brachflächen fungieren. Die Türme sollen so einen Beitrag zu einem Biotopverbundsystem einer Stadt liefern. Durch die Bäume und Pflanzen an der Fassade soll das Mikroklima in den Wohnungen und auf den Balkonen verbessert werden; die Pflanzen sollen Lärm, Staub und Hitze mildern. Dadurch wird die Lebensqualität der Bewohner verbessert und der Bezug zur Natur in einer städtischen Umgebung hergestellt. Insgesamt besteht die Fassadenbegrünung aus etwa 900 Bäumen, 5.000 Sträuchern und 11.000 sonstigen Pflanzen, was einer bepflanzten Waldfläche von ungefähr 7.000 m² entspricht.
- ▶ **Struktur des Gebäudebestandes:** Das Hochhausprojekt besteht aus den beiden Türmen Torre E mit 110 m Höhe und 27 Etagen und Torre D mit 80 m Höhe und 19 Etagen.
- ▶ **Bewertung:** In der Literatur finden sich hinreichend Belege, dass durch Bosco Verticale eine ‚Verbesserung‘ des Mikroklimas bewirkt wird. Diese Verbesserung wird in der untersuchten Literatur allerdings nicht in absoluten Zahlen quantifiziert, weshalb eine abschließende Bewertung einer Minderung des UHIE nicht zulässig erscheint. Um eine zusätzliche Abkühlung zu erreichen könnten auf dem Gelände, auf dem die Türme stehen, Wasserflächen angelegt werden. Eine Aufhellung der Fassade kommt nicht in Frage, da diese vollständig begrünt ist. Nicht dokumentiert ist der (vermutlich nicht unerhebliche) Wartungs- bzw. Pflegeaufwand der Pflanzen.



Quelle: Wikipedia.org

Quellen: Giacomello und Valagussa 2015; Spagnoli Gabardi 2014; Wang 2014; Wikipedia 2021a

3. Zorrotzaurre Peninsula, Bilbao

- ▶ **Kurzbeschreibung:** Die Zorrotzaurre Peninsula ist ein neues Stadtviertel in Bilbao, das auf einer künstlichen Halbinsel des Nervión angelegt werden soll.
- ▶ **Konzept:** Die Verwendung heller Oberflächen sowie die Anlage von etwa 130.000 m² Grünfläche (20 % der Gesamtfläche) soll eine Minderung des UHIE bewirken. Die Kühlung der Gebäude soll durch die Nutzung von Erdwärme erreicht werden.
- ▶ **Struktur des Gebäudebestandes:** Insgesamt sollen etwa 5.400 neue Wohnungen entstehen.
- ▶ **Bewertung:** In der Studie 'Design solutions for Urban Heat Island mitigation in the City of Bilbao' wurde festgestellt, dass das Mikroklima in Bilbao positiv durch eine entsprechende Bebauung der Zorrotzaurre Peninsula beeinflusst werden könnte.

Quellen: ZORROTZAURRE MANAGEMENT COMMISSION; RESIN 2016; Sustainia 2018

4. l'Écoquartier Andromède à Blagnac, Toulouse

- ▶ **Kurzbeschreibung:** Das Écoquartier Andromède à Blagnac ist ein Anfang der 2000er Jahre errichtetes „Ökoquartier“ in Toulouse mit etwa 4.000 Einwohnern und 10.000 Arbeitsplätzen.
- ▶ **Konzept:** Das Konzept des Écoquartier ist vergleichbar mit dem der Heidelberger Bahnstadt. Eine Vermeidung des UHIE soll durch Synergieeffekte heller Fassaden, Fassadenbegrünung und Grünflächen bewirkt werden. Die Grünflächen erstrecken sich auf 70 ha, was einem Drittel der Gesamtfläche entspricht. Da das Quartier verkehrsberuhigt ist, ist der Anteil an geschlossenen Asphaltdecken im Vergleich zu herkömmlichen Quartieren geringer, was ebenfalls positiv zur Klimasituation des Écoquartier beiträgt.
- ▶ **Struktur des Gebäudebestandes:** Das Quartier weist eine Mischnutzung aus Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden auf.
- ▶ **Bewertung:** Das Konzept verbindet verschiedene Maßnahmen zur Reduzierung von urbanen Hitzeinseln.

Quelle: Vivre Andromede 2015

5. Masdar, Vereinigte Arabische Emirate

- ▶ **Kurzbeschreibung:** Masdar ist eine geplante „Ökostadt“ im Emirat Abu Dhabi, mit deren Bau im Februar 2008 begonnen wurde. Das als „CO₂-neutrale Wissenschaftsstadt“ angekündigte Vorhaben soll vollständig durch erneuerbare Energien versorgt werden. Nach Fertigstellung sollen hier etwa 47.500 Menschen leben.
- ▶ **Konzept:** Frischluftkorridore und Parkanlagen sollen die Bauflächen durchziehen und die Temperatur im Vergleich zur Stadt Abu Dhabi drastisch senken. Die Wände der Häuser in Masdar sind nach oben hin schräg gebaut, damit sie mehr Schatten spenden. Durch diese eng gestellte schattenspendende Bauweise erhitzen sich die Gebäude weniger stark und benötigen weniger Energie um gekühlt zu werden. Die bewährte lokale Idee der Kühlung durch Windtürme soll in modernisierter Form aufleben: Einige große Gebäude werden um riesige Modern Wind Towers herum gruppiert. Die Modern Wind Towers versprühen einen feinen Wassernebel, der die Luft abkühlt. Da die kühle Luft schwerer als die warme ist, sinkt sie um die Türme rum herab und soll so die umliegenden Quartiere kühlen. Mit solarbetriebenen Entsalzungsanlagen wird Meerwasser aufbereitet und in die zahlreichen städtischen Springbrunnen gepumpt. Tiefe Brunnen, die sich ebenfalls schon in alten arabischen Siedlungen bewährt haben, bringen zudem Kühle aus dem Inneren der Erde nach Masdar City. Sonnensegel und moderne Dämmstoffe schirmen ebenfalls die Hitze ab. Zusätzliche Kühlung soll durch die Anlage von Wasserflächen und ‚urban green‘ erfolgen. Die Temperatur soll durch die beschriebenen Maßnahmen etwa 10 K unter der des benachbarten Abu Dhabi liegen.
- ▶ **Struktur des Gebäudebestandes:** Enge Stellung der Gebäude und Ausbildung beschatteter ‚urban canyons‘; Helle Oberflächen; Etwa 45 m hohe Modern Wind Towers
- ▶ **Bewertung:** Wie stark sich das Nachhaltigkeitskonzept von Masdar City tatsächlich auswirkt, lässt sich bis dato nicht zuverlässig angeben, da sich die stets verkündeten Einsparpotenziale von 65 % auf den Durchschnittsverbrauch im Emirat, respektive auf den der ganzen Arabischen Halbinsel, beziehen, der mit einer der höchsten weltweit ist. Die im Rahmen des Projektes geplanten Maßnahmen sind teilweise sehr kostenintensiv und daher nicht vollständig auf Städte in vergleichbaren Klimaregionen übertragbar (z. B. die zahlreichen städtischen Springbrunnen, die mit Süßwasser aus solarbetriebenen Entsalzungsanlagen betrieben werden). Die Fertigstellung ist für das Jahr 2030 vorgesehen.



Quelle: Wikipedia 2021b

Quellen: (Schulz 2017)

6. Shahre Javan Community, Hashtgerd New Town, Iran

- **Kurzbeschreibung:** Das Pilotprojekt „Shahre Javan Community“ wurde im Rahmen des „Young Cities“ Projekts geplant und umfasst 2.000 Wohneinheiten für 8.000 Einwohner. Das Projekt verfolgt das Ziel, angepasst an den klimatischen, ökologischen, kulturellen und wirtschaftlichen Kontext im Iran, innovative Lösungen für klimaneutrale und klimaresiliente Gebäude und Quartiere zu erproben. Das Quartier umfasst eine Fläche von fast 45 ha im südlichen Teil von New Town Hashtgerd (ca. 35 ha Wohnfläche und ca. 9 ha Frei- und Grünfläche).



Quelle: Wikipedia 2020

- **Konzept:** Innovative Technologien in der Gebäudehülle verringern das Aufheizen im Sommer und das Abkühlen im Winter, so dass der Energieverbrauch der Gebäude herabgesetzt wird. Solarmodule und -kollektoren auf dem Dach erzeugen Strom und Warmwasser für das Gebäude und spenden auch Schatten. Reduzierung der Temperatur durch Beschattung, Frei- und Grünflächen. In der Planungsphase Durchführung von Mikroklimasimulation zur Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Gebäudestrukturen und Vegetationsalternativen auf die Hitzeentwicklung.
- **Struktur des Gebäudebestandes:** Kompakte Bauweise; Energieeffizienz in der Gebäudehülle
- **Bewertung:** Einige der im Projekt angewandten Maßnahmen sind nachgewiesenermaßen hochwirksam und gut übertragbar (z. B. Abschattung durch PV-Elemente).

Quellen: Cleaner Production Germany 2021; Sodoudi et al. 2013

7. Eco-Cité Zenata, Marokko

- ▶ **Kurzbeschreibung:** Die Zenata Eco-City wurde auf Grundlage der drei Grundpfeiler einer nachhaltigen Entwicklung konzipiert, welche die Stadtentwicklung mit den lokalen Gegebenheiten verbinden soll, um eine grüne und offene Stadt zu schaffen. Die Eco-Cité Zenata wird auf einer Fläche von 1830 ha nördlich von Casablanca errichtet. Neben Wohngebäuden für 300.000 Einwohner sind auch ein Campusgelände, ein medizinisches Zentrum sowie ein Einkaufszentrum geplant. Es sollen Grünflächen von insgesamt 470 ha entstehen.
- ▶ **Konzept:** Stadtentwicklung unter Einbeziehung der Windrichtung vom Atlantik zur Durchlüftung der Bebauungsstruktur; knapp 1/3 des Territoriums sind Grünflächen, die so verteilt sind, dass sie den stadträumlichen Durchlüftungsansatz unterstützen; Konzept zur nachhaltigen Wassernutzung auf Basis von Retentionsflächen; Anwendung des Prinzips „Stadt der kurzen Wege“ mit Möglichkeiten der Nahversorgung verteilt über das Quartier; Anbindung an den öffentlichen Nahverkehr.
- ▶ **Struktur des Gebäudebestandes:** Das Quartier weist eine Mischnutzung aus Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden auf, die Bebauungsstruktur ist optimiert zur Nutzung natürlicher Kaltluft.
- ▶ **Bewertung:** Das städtebauliche Konzept basiert auf der Reduzierung von urbanen Hitzeinseln. Hierbei ist die Berücksichtigung nachhaltiger Prinzipien bei der grundlegenden Planung der Stadt positiv hervorzuheben.

Quellen: Agoumi 2016; Roby 2017

2 Erstellung optimierter Quartierskonzepte

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels soll die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Vermeidung urbaner Hitzeinseln in klimaschonenden Stadtquartieren anhand von Simulationsberechnungen quantifiziert werden. Dabei werden zunächst auf der Grundlage der Ergebnisse des vorherigen Kapitels optimierte Maßnahmenpakete für hitzeresiliente Quartiere zusammengestellt.

Bei den Konzepten werden zwei Klimaregionen unterschieden:

- Gemäßigtes Klima: Mitteleuropa, insbesondere Deutschland
- Subtropische Regionen: Südeuropa, Nordafrika

Bei den Untersuchungen für subtropische Regionen werden Maßnahmen betrachtet, welche auch für die tropische Zone relevant sind, so dass die Ergebnisse für Großstädte in allen heißen Klimazonen von Nutzen sind.

Im zweiten Teil erfolgt der rechnerische Nachweis der Wirkung der Maßnahmen. Zum einen hinsichtlich der Vermeidung einer Überhitzung und Minimierung des Kühlenergiebedarfs, zum anderen hinsichtlich der Anforderungen an den Klimaschutz (Ziel: Klimaneutralität).

Mittels der Simulationsberechnungen wurden drei Quartierskonzepte für deutsche (gemäßigte) Klimabedingungen und zwei für subtropische bzw. südeuropäische/ nordafrikanische Klimabedingungen untersucht.

Je Standort wird, aufbauend auf einem Ausgangszustand, zunächst ein mikroklimatisch optimiertes Quartierskonzept entwickelt. Anhand der Mikroklimasimulationen wird die Wirkung der Optimierungsmaßnahmen quantifiziert.

Um die Wirkung der Quartiersmaßnahmen auf die Gebäude aufzuzeigen, wird bei thermischen Gebäudesimulationen der Ausgangszustand der Gebäude zunächst sowohl im Ausgangsquartier als auch im optimierten Quartier berücksichtigt.

Darauf aufbauend wird ein schrittweiser Ansatz verfolgt, bei dem zunächst geprüft wird welcher Behaglichkeitskomfort sich mit „passiven“ Maßnahmen, wie z. B. einer Verbesserung der thermischen Hüllqualitäten und des Sonnenschutzes, erreichen lässt. Anhand weiterer Varianten der thermischen Simulationen werden anschließend sukzessiv geeignete technische Maßnahmen hinzugefügt, bis schließlich sowohl die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit sowie gleichzeitig auch das Ziel der Klimaneutralität erfüllt wird. Die Art und Anzahl der ausgewählten Maßnahmen hängen dabei von den individuellen Gegebenheiten im jeweiligen Quartier ab.

2.1 Maßnahmenpakete für UHIE-optimierte Quartierskonzepte

Auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 1.3 werden im Folgenden Maßnahmenpakete für hitzeresiliente Quartiere zusammengestellt. Dabei wird, soweit erforderlich, zwischen Maßnahmenpaketen für subtropische Regionen (Südeuropa/ Nordafrika) und gemäßigte Klimaregionen (insbesondere Deutschland) unterschieden. Maßnahmen, die nur für Neubauquartiere in Frage kommen, werden entsprechend gekennzeichnet. Die Reihenfolge der Nennung entspricht der Relevanz. Die Aspekte Wirksamkeit und Kosten (Investition und Unterhalt) wurden dabei qualitativ berücksichtigt.

2.1.1 Empfohlenes Maßnahmenpaket

2.1.1.1 Maßnahmenpaket für hitzeresiliente Quartiere

Eine detaillierte Beschreibung der Maßnahmen kann Anhang A entnommen werden.

1. Sicherung des Baumbestandes und bestehender Waldflächen sowie Anpflanzung/ Pflege neuer Bäume, die sowohl Schatten als auch Verdunstungskühle¹³ spenden
2. Beschattung von Freiflächen und Wegen
 - a) Sonnensegel zur Beschattung von Plätzen und Wegen
 - b) PV zur Abschattung von Gehwegen vor Wohn- und Geschäftshäusern und Parkplätzen
3. Erhaltung der städtischen Luftzirkulation und Vernetzung der Freiräume (=> Maßnahme bei Quartierserstellung)
4. Städtebauliche Planung: Geeignetes Verhältnis von Gebäudevolumen zu Freiräumen (=> Maßnahme bei Quartierserstellung)
5. Verwendung heller Materialien für Dächer, Fassaden, ggf. auch Straßen und Gehwege (=> Maßnahme bei Neuerrichtung oder Sanierung)

Spezielle Maßnahmen für gemäßigte Klimaregionen (Deutschland)

- a. Erhöhung des Wasseranteils im Quartier
- b. Entsiegelung von Oberflächen im Freiraum/ Vermeidung von Versiegelung
- c. Dach- und Fassadenbegrünung (Extensiv, mit geringem Pflegeaufwand)

2.1.1.2 Maßnahmen für klimaneutrale- und klimaresiliente Gebäude

1. Maßnahmen zur Gewährleistung des sommerlichen Behaglichkeitskomforts bzw. zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs
 - a) Sonnenschutzmaßnahmen (außenliegender beweglicher Sonnenschutz, z. B. automatische Raffstores, ggf. Überhänge bei südorientierten Fenstern)
 - b) Kühlungs- bzw. Nachtlüftung
 - c) Dämmung und Wärmeschutzverglasung (Qualitäten in Abhängigkeit der Klimazone)
 - d) Maßnahmen zur Verbesserung der Luftdichtigkeit
 - e) kompaktes Gebäudedesign, moderater Fensterflächenanteil (=> Neubau)
 - f) hohe thermische Speichermassen (=> Neubau)
2. Erneuerbare Energieversorgung aus Energiequellen vor Ort
 - a) Installation von PV auf Dächern ggf. mit Batteriespeichern, ausgelegt auf maximale Bedarfsabdeckung (Ziel bei subtropischem Klima: Autarke Stromversorgung)
 - b) Solarthermische Warmwasserbereitung (z. B. über Thermosiphons in Subtropen oder Vakuumröhrenkollektoren im gemäßigten Klima)
3. Verwendung nachhaltiger Baumaterialien (Natursteine, Holzbauweise, Dämmung aus nachwachsenden Rohstoffen) (=> Neubau)

¹³ Bäume, die in subtropischen Regionen heimisch sind, haben nur eine geringe Transpiration.

Spezielle Maßnahmen für subtropische Klimaregionen (Südeuropa, Nordafrika)

- a. Effiziente aktive Kühlung (ohne fluoridierte Kältemittel)
 - A) Kühlung der wichtigsten Nutzungszonen über dezentrale oder zentrale (reversible) Klimageräte/anlagen mit natürlichen Kältemitteln (z. B. Propan), die dargebotsabhängig von PV-Anlagen gespeist werden.
 - B) Alternative bei größeren Neubauten oder als Ergänzung bestehender Anlagen mittels solarwärmegetriebener Kältemaschinen (Solarkollektoren in Kombination mit Sorptionskältemaschinen)
 - C) Klimaneutrale Fernkälteversorgung (=> Neubau)
z. B. gespeist aus Solarenergie, Abwärme oder Meerwasser
 - D) Zentrale Lüftungsanlagen mit Kälte- und Feuchterückgewinnung (=> Neubau)

Spezielle Maßnahmen für gemäßigte Klimaregionen (Deutschland)

- a. Maßnahmen zur Reduktion des Heizenergiebedarfs
 - A) Hoher Dämmstandard (anzustrebende Ziel U-Werte: Dach: $<0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$; Fassade: $<0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$; Boden/Keller: $<0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$), Gute Fensterqualitäten (U_w -Wert $< 1 \text{ W/m}^2\text{K}$ und g-Wert¹⁴ $> 0,55$ ¹⁵).
 - B) Effiziente Lüftung
 - Sanierung*
Bei Notwendigkeit zusätzlicher Lüftungsmaßnahmen nach Prüfung der Anforderungen der (DIN 1946-6) ggf. dezentrale Lüfter mit Wärmerückgewinnung in Schlaf- und Wohnzimmer¹⁶.
 - Neubau*
Mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (Wärmerückgewinnungsgrad $> 80 \%$, Ventilator-Effizienz bei Nennlüftung: $\text{SFP} < 0,45 \text{ Wh/m}^3$)¹⁷
 - C) kompaktes Gebäudedesign; vorwiegend südlich orientierte, im Winter unbeschattete Fensterflächen (=> Neubau))
- b. Effiziente, klimaneutrale Heizung und Warmwasserbereitung
 - Neubau*
Fußbodenheizung (und -kühlung) gespeist von mit Grünstrom angetriebener Wärmepumpe ohne fluoridierte Kältemittel, ggf. als Hybridsystem mit (Gas-) Spitzenlastkessel. Warmwasserbereitung über PV-Dargebot geregelter Zentralsystem mit Speicher, in Mehrfamilienhäusern mit Zirkulationssystem (Systemtemperatur $45 \text{ }^\circ\text{C}$,

¹⁴ Gesamtenergiedurchlassgrad als Maß des nutzbaren Anteils der wärmeaktiven Solareinstrahlung

¹⁵ Ein guter g-Wert ist besonders wichtig für die winterlichen Energiegewinne bei unbeschatteten Südfenstern

¹⁶ Die Nachrüstung einer zentralen Lüftungsanlage ist in der Regel schwierig. In Einfamilienhäusern ist die Beibehaltung der Fensterlüftung meistens möglich (Prüfung gem. DIN 1946-6 erforderlich), bei der ohne permanente Kipp Lüftung der Luftwechsel mit ca. $0,2/\text{h}$ i. d. R. deutlich unter denen einer mechanischen Lüftungsanlage liegen. Dies ist zwar mit Komforteinbußen verbunden, aber aus energetischer und ökonomischer Sicht durchaus vorteilhaft.

¹⁷ Ein mögliche automatische Bedarfsregelung (Luftmengenregelung nach Feuchte, Luftqualität und Temperatur) ist zwar energetisch sinnvoll, derzeit aber i. d. R. (noch) nicht wirtschaftlich

zur Legionellenvermeidung Wärmeübergabestationen und ggf. Nacherhitzer in den Küchen)

Bestandsgebäude

Erneuerbare Fernwärme (*wenn vorhanden*); *Alternative: siehe Neubau*; Da eine Nachrüstung einer Fußbodenheizung nicht sinnvoll ist, ist ggf. zur Sicherstellung der notwendigen niedrigen Vorlauftemperaturen in Teilbereichen eine Nachrüstung von Konvektorheizkörpern notwendig.

c. Effiziente aktive Kühlung

Insbesondere in sommerkühlen Regionen sollte angestrebt werden, einen nachhaltigen sommerlichen Komfort durch Maßnahmen zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes zu erreichen. Ein Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz ist bei Neubauten in Deutschland obligatorisch.

Ist es nicht möglich, auf eine aktive Kühlung zu verzichten, sollten bei Neubauten bevorzugt sog. stille Flächenkühlsysteme (z. B. Fußbodenkühlung) genutzt werden. Die hierbei für die Kühlung möglichen hohen Systemtemperaturen ermöglichen eine hohe Effizienz der Kaltwassererzeuger bzw. bei Erd- und Grundwasserwärmepumpen ggf. sogar eine direkte Nutzung des Bodens- bzw. Grundwassers als Wärmesenke. Außerdem ist der Energieaufwand für die Verteilung (zwischen Erzeuger und Übergabesystem) bei wasserbasierten Verteilsystemen erheblich geringer als bei luftbasierten Verteilsystemen.

2.2 Simulationsgestützter Wirksamkeitsnachweis der Maßnahmenpakete für ausgewählte Quartiere

2.2.1 Grundlegendes zur Modellierung

Die Analyse der Quartiere erfolgt auf zwei unterschiedlichen, miteinander gekoppelten Betrachtungsebenen:

- (a) auf Quartiersebene (Simulation des Mikroklimas innerhalb des Quartieres) und
- (b) auf Gebäudeebene (Gebäudesimulation zur Ermittlung der thermischen Dynamik der Gebäude im Quartier und Quantifizierung des Energiebedarfs für Kühlung und Heizung).

2.2.1.1 Simulation des Mikroklimas

Die Simulation des Mikroklimas hat in diesem Projekt zwei Aufgaben:

- die Lokalisierung der generellen und auf ein großes Gebiet generalisierten Referenzklimadaten auf das spezielle Untersuchungsgebiet mit einer gebäudeauflösenden Genauigkeit als Rahmenbedingungen für die Gebäudesimulationen, und
- die Darstellung und Analyse der mikroklimatischen und bioklimatologischen Verhältnisse im Außenraum über den Tagesverlauf.

Die Mikroklimasimulationen werden mit dem Mikroklimamodell ENVI_MET (Version 5.0; www.envi-met.com) durchgeführt. ENVI_MET wird seit über 25 Jahren für die hochaufgelöste Simulation des Mikroklimas unter anderem in urbanen Gebieten weltweit angewandt und wurde in weit über 300 wissenschaftlichen Aufsätzen unabhängig für unterschiedlichste Klimazonen validiert.

Im Rahmen des Projektes werden Mikroklimasimulationen auf zwei verschiedenen Ebenen durchgeführt:

- Der Rahmenebene (Framework-Level Simulationen) mit einer gröberen räumlichen Auflösung (5 m) der Quartiere bei einer kontinuierlichen Simulation eines kompletten Jahresgangs
- Der Detailebene (Detail-Level Simulationen) mit einer hohen Auflösung (2 m), die für ausgewählte Tage durchgeführt wurde.

2.2.1.1.1 Übersicht Vorgehensweise Jahressimulationen (Framework-Level Simulationen)

Die Hauptaufgabe der Jahressimulationen liegt in der Erzeugung von angepassten Eingangsdaten für die Gebäudesimulation. Zudem eignen sich die Simulationen, um einen jahreszeitlichen Überblick über die Veränderungen der Temperaturverteilungen vor allem unter dem Einfluss unterschiedlicher Sonnenwinkel zu erhalten.

Die Jahressimulation berechnen das Mikroklima in den verschiedenen Untersuchungsgebieten mit einer räumlichen Auflösung von 5 x 5 m. Zudem werden die Simulationen alle 30 min an die extern vorgegebenen Wetterdaten angepasst.

Zur Analyse des Mikroklimas wird für jedes Gebiet zunächst die Verteilung der Lufttemperatur für den **Status Quo** in den verschiedenen Jahreszeiten betrachtet und in jeweils einer Übersichtstafel zusammengestellt. Dazu wird die Lufttemperatur [°C] in 1,8 m Höhe jeweils um 4 Uhr und um 16 Uhr im **Januar** (Teilabbildungen A & B), **März** (Teilabbildungen C & D), **Juli** (Teilabbildungen E & F) sowie im **September** (Teilabbildungen G & H) dargestellt und

analysiert. Hierbei werden für die verschiedenen Städte nicht immer die gleichen Tage im entsprechenden Monat genommen, sondern solche ausgewählt, die eine deutliche Tagesamplitude und geringe Bewölkung aufwiesen, so dass die mikroklimatologischen Eigenschaften deutlich zu Tage treten (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Übersicht über die ausgewählten Simulationstage

	Januar	März	Juli	September
Tunis	14.01.	11.03.	22.07.	02.09.
Madrid	21.01.	20.03.	07.07.	21.09.
Köln	18.01.	21.03.	25.07.	21.09.
Hamburg	22.01.	22.03.	09.07.	22.09.
Frankfurt a. M.	22.01.	22.03.	01.07.	22.09.

Für Frankfurt am Main wurden exemplarisch nicht die bestehenden Klimareferenzdaten, sondern die Klimaprojektionen für 2050 als Eingangsdaten verwendet.

Den Abbildungen des Status Quo werden die Ergebnisse der **Optimierungsmaßnahmen** gegenübergestellt. Hierbei werden üblicherweise die Unterschiede als Differenzbilder (Optimierung – Status Quo) dargestellt, außer für das Untersuchungsgebiet Köln, da sich hier die Bebauungsstruktur grundlegend geändert hat bzw. die Veränderungen lokal auf die Bebauungsstruktur abgestellt waren, so dass eine flächenhafte Differenzbildung wenig Sinn ergibt. Für Köln wurden daher die absoluten Temperaturwerte dargestellt.

Um einen detaillierten Einblick in das Mikroklima der unterschiedlichen Gebiete zu bekommen, wurden anschließend für die ausgewählten Winter- und Sommertage Detailsimulationen erstellt. Hierbei wurden die in der Jahressimulation erzeugten Daten als Rahmenbedingungen für die hochaufgelösten Simulationen verwendet (siehe nächster Abschnitt). Allerdings liegen die räumlichen Auflösungen zwischen den sehr gut aufgelösten Jahressimulationen und den Detailsimulationen recht nahe beieinander (5 m vs. 2 m). Da die in diesem Projekt anvisierten Umgestaltungsmaßnahmen eher genereller Natur und lokal begrenzt sind, unterscheiden sich die Ergebnisse beider Simulationsarten nicht signifikant und es lassen sich somit aus den Detailsimulationen in diesem Projekt auf der generellen Ebene keine zusätzlichen Informationen gewinnen. Als Grundlage für weitere Nutzungsplanungen des Freiraums (Aufenthaltssfunktionen, kleinskalige Gestaltung z. B. mit Straßenmöblierung, etc.) ist eine hohe Auflösung des Mikroklimas hingegen eine notwendige Planungsgrundlage.

2.2.1.1.2 Übersicht Vorgehensweise Detailsimulationen (Detail-Level Simulationen)

Die Detailsimulationen decken im Wesentlichen das gleiche Untersuchungsgebiet ab, wie die Übersichtssimulationen, allerdings mit einer höheren räumlichen Auflösung von 2 x 2 m. Hierdurch ergeben sich stellenweise kleine Veränderungen in der Bebauungsstruktur und teilweise kommen an den Rändern noch Gebäude hinzu, die in der Übersichtssimulation entfallen sind, da sie unrealistisch angeschnitten waren.

Die Detailsimulationen übernehmen die Rahmenbedingungen der Übersichtssimulationen, so dass längerfristige Effekte trotz der nur kurzen Simulationszeiträume berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zu den Übersichtssimulationen wurden bei den Detailsimulationen die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit auf für den betrachteten Tag typische Werte festgelegt und während des Simulationszeitraums nicht geändert. Diese ist für eine hochaufgelöste Analyse des Mikroklimas eine sinnvolle Vorgabe, da hier der Fokus nicht auf der

genauen Abbildung eines vorgegebenen Wetterablaufes liegt, sondern in der Interpretation der Auswirkungen der geplanten Maßnahmen. Diese wird erheblich erschwert, wenn der Wind in Richtung und Stärke im Analysezeitraum variiert.

Durch die gemeinsame Betrachtung von Jahressimulation und Detailsimulation ist es daher möglich, die Wirkung von Maßnahmen sowohl generell (Detailsimulation) als auch auf konkrete Wetterdaten angewandt (Jahressimulation) zu betrachten.

2.2.1.1.3 Der thermische Komfortindikator PET

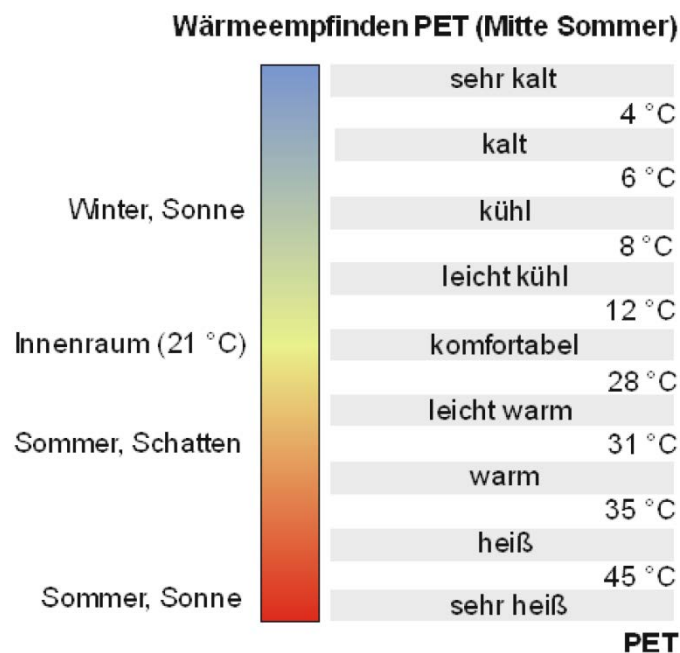
Zur Beurteilung des thermischen Komforts im Außenbereich wird der thermische Komfortindex PET („Physiologisch Äquivalente Temperatur“) verwendet. PET ist, wie viele andere Indikatoren (z. B. PMV, UTCI, Gefühlte Temperatur), der Versuch, komplexe mikroklimatologische Außenraumbedingung in eine einfachere, intuitiv verständliche Innenraumsituation zu transferieren. Eine umfassende Beschreibung von PET inklusive der vorhandenen Schwachstellen lässt sich bei Walther und Goestchel (2018) finden.

Der PET-Wert ist hierbei als eine theoretische Innenraumtemperatur definiert, bei der sich ohne direkte Strahlungseinwirkung und ohne Windbewegung das gleiche Wärmeempfinden beim Menschen einstellt wie unter den betrachteten Außenbedingungen.

Bei einer windstillen, sonnigen Außenraumsituation (1 m/s Wind, 70°C Strahlungstemperatur) kann bei einer Lufttemperatur von 30°C beispielsweise der PET -Wert schnell 37°C und mehr betragen.

Die nachfolgende Abbildung „Wärmeempfinden auf der PET-Skala“ veranschaulicht eine mögliche Klassifizierung von PET und dem Wärmeempfinden des Menschen in neun Empfindungsstufen, wobei eine Innenraumtemperatur von 21°C als Neutralpunkt angenommen wird.

Abbildung 3: Wärmeempfinden auf der PET-Skala



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Die in der Abbildung eingetragenen PET-Grenzwerte zwischen den Empfindungsstufen sind nur als Orientierung zu verstehen. Das Wärmeempfinden des Menschen variiert über das Jahr unter

anderem durch die thermische Adaption des Menschen und es existieren regionale und kulturelle Unterschiede.

Da die PET-Skala auf der simulierten Energiebilanz des Menschen basiert, ist sie theoretisch nach oben und unten offen und kann durch weitere Attribute wie „extrem heiß“ oder „extrem kalt“ frei erweitert werden. Wie bei allen Modellergebnissen ist vor allem die räumliche Verteilung der Werte und deren Veränderungen durch Planungsmaßnahmen relevanter als der exakte numerische Wert von PET.

Der PET-Wert ist ein statischer thermischer Index, das heißt er berechnet das Wärmeempfinden eines Menschen unter der Annahme, dass sich der Mensch so lange an einem Ort aufhält, bis die Energiebilanz seines Körpers ausgeglichen ist. Das kann vor allem im Sommer bis zu 20 Minuten dauern.

Genaugenommen ist der PET-Wert daher nur für verweilende Personen oder sehr homogene Mikroklimasituationen gültig, da sich bewegende Menschen üblicherweise innerhalb weniger Minuten den unterschiedlichsten Mikroklimaten ausgesetzt sind. Die Berechnung des thermischen Empfindens von sich bewegenden Menschen ist komplex, da hierfür Informationen über die Bewegungsmuster der einzelnen Passanten benötigt werden (vgl. Bruse, 2007). Für die praktische Anwendung wird daher der statische PET-Wert verwendet, wobei bei der Interpretation der Werte das Vorgenannte berücksichtigt werden muss.

Die Betrachtung des PET-Wertes ist nur während der Tagesstunden sinnvoll, nach Sonnenuntergang entspricht PET ungefähr der Lufttemperatur mit einer leichten Abhängigkeit zur Windgeschwindigkeit.

Die Ergebnisse der Mikroklimasimulationen sind zum einen auf den Abbildungen in den entsprechenden Kapiteln dargestellt. Weitere Darstellungen finden sich in Form von sog. Farbtafeln im Anhang (siehe entsprechende Textverweise).

2.2.1.2 Gebäudesimulationen

Für die Untersuchungen zum Raumklima und dem Gebäudeenergiebedarf wurden dynamisch-thermische Simulationen mit der Software TRNSYS durchgeführt. Dabei wurden die Gebäude bzw. die Wohnungen in den Gebäuden anhand von Multizonenmodellen abgebildet.

Die Simulationen wurden auf Basis der durch die Mikroklimasimulationen bestimmten ortsfeinen stündlichen Temperatur-, Feuchte- und Strahlungsdaten für ausgewählte Punkte vor den Fassaden der Gebäude/ Wohnungen im Quartier durchgeführt. Die zugrunde gelegten jährlichen Referenzklimadaten beinhalteten jeweils auch heiße sommerliche Perioden, die den Nachweis des Raumklimakomforts auch unter Extrembedingungen ermöglichten. Für die Gebäudesimulation wurden die einzelnen Gebäude in Nutzungsbereiche mit jeweils mehreren Zonen (z. B. Wohn- und Esszimmer, Schlaf- und Kinderzimmer oder Einzelhandel) aufgeteilt. Jedem Nutzungsbereich wurde ein Referenzklimapunkt der Mikroklimasimulationen zugeordnet. Somit konnten für ein Gebäude die unterschiedlichen Temperatur- und Klimabedingungen an verschiedenen Fassadenseiten und Höhenlagen berücksichtigt werden. Dadurch wurde eine realitätsnahe Abbildung der einzelnen Gebäude und Wohnungen im Quartier möglich. Berücksichtigt wurde dabei auch die Besonnung/ Beschattung der einzelnen Nutzungsbereiche. Analog wurden die Strahlungsdaten u. a. nach Orientierung und Beschattung (Lage und Höhe) unterschieden und entsprechend der Lage der Nutzungsbereiche berücksichtigt.

Zur Bestimmung des Gesamtenergiebedarfs und der Energiegewinne (d. h. zum Nachweis der Klimaneutralität) der Gebäude und des Quartiers wurde pro Gebäude und Quartier die Summe der Energiebedarfe und -gewinne über die unterschiedlichen Nutzungstypmodelle, Referenzklimapunkte und Strahlungsdaten gebildet.

Für ausgewählte Nutzungstypen (z. B. extrem ungünstig gelegene und „normale“ Nutzungsbereiche) wurden Behaglichkeitsstatistiken (z. B. Häufigkeit der Temperaturüberschreitungen, bzw. Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)) erstellt, die zusammen mit dem Energiebedarf (für Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten, und Lüften) einen Vergleich der Konzepte ermöglichten und einen Funktionsnachweis liefern. Ein Beispiel für ungünstig gelegene Nutzungsbereiche sind Dachwohnungen, die aufgrund ihrer Exponiertheit und geringer Speichermassen meist zu Überhitzungen im Sommer neigen.

Durch die Berücksichtigung einer repräsentativen Auswahl der Gebäude wurde es möglich, die Auswirkung der im Quartier durchgeführten Maßnahmen auf den thermischen Innenraumkomfort der Bewohner sowie das Bestreben zur Klimaneutralität des ausgewählten Gebiets zu untersuchen. Hierzu wurde der Energiebedarf durch Kühlung, Heizen, Warmwasser und Haushaltsstrom der Gebäude im Quartier bestimmt. Außerdem wurden die resultierenden operativen Temperaturen in den Gebäuden ermittelt und daraus Kennwerte zur Quantifizierung des thermischen Komforts abgeleitet.

2.2.1.2.1 Modellkopplung

Beide Maßstabsebenen werden durch eine passive Kopplung der Programme ENVI_MET und TRNSYS durchgeführt. Hierbei werden die in ENVI_MET berechneten stündlichen Jahres- und Tagesgänge der für die Gebäudesimulation relevanten Klimaparameter (Lufttemperatur, Luftfeuchte sowie lang- und kurzweilige Strahlung) als Rahmenbedingung für die Simulation in TRNSYS übergeben. Berücksichtigt wird dabei sowohl die Lage der Zonen in den Wohnungen/Gebäuden im Quartier als auch die jeweilige Fassadenorientierung und Höhe.

2.2.2 Quartiersauswahl

Bei der Quartiersauswahl wurde versucht eine möglichst große Bandbreite von real existierenden und künftigen Wohnquartieren abzudecken. Der Schwerpunkt lag dabei auf Stadtquartieren mit hohen Wohndichten, wie sie in den zentrumsnahen Stadtteilen vieler Großstädte vorzufinden sind. Bei den deutschen Quartieren wurde versucht sowohl sommerkühle als auch sommerheiße Regionen abzudecken. Darüber hinaus sollten sowohl Neubau- als auch Bestandsquartiere und Nachverdichtungen berücksichtigt werden.

2.2.2.1 Bestandquartier Tunis

Das ausgewählte Quartier in Tunis kann in vielerlei Hinsicht als Repräsentant zahlreicher Quartiere in heißen bzw. subtropischen Regionen herangezogen werden. Das Quartier zeichnet sich durch eine hoch diversifizierte Bebauungsstruktur von überwiegend einfachen Ein-, Zwei- oder Dreifamilienhäusern in den Flächen und größeren Gebäudekomplexen an Hauptstraßen aus. Aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit, aber nicht zuletzt auch der steigenden Notwendigkeit ist davon auszugehen, dass der derzeit geringe Anteil klimatisierter Gebäude in naher Zukunft stark ansteigen wird. Finanzielle Spielräume und damit auch das Bewusstsein für klimagerechte Lösungen sind bei den dortigen Bewohnern aber sehr begrenzt. Im Rahmen der Untersuchung sollen geeignete Lösungswege für derartige Quartiere aufgezeigt und deren Wirksamkeit nachgewiesen werden.

2.2.2.2 Neubauquartier Madrid

Bei dem untersuchten Quartier in Madrid handelt es sich um ein typisches Neubauquartier mit hohen Geschoßwohnungsbauten, wie sie derzeit in vielen Vororten beziehungsweise Konversionsflächen internationaler Metropolen entstehen. Im Rahmen der Untersuchungen für dieses Quartier soll die Wirkung von Verbesserungsmaßnahmen gegenüber dem üblichen Baustandart auf den Energiebedarf aufgezeigt werden und gleichzeitig geprüft werden, inwieweit hierbei eine klimaneutrale Energieversorgung über PV-Anlagen auf den Dächern möglich ist. Die Hauptfragestellung der mikroklimatischen Untersuchungen war dabei, ob und ggf. wieviel die Beschattung durch eine Verdichtung der Bebauungsstruktur und eine intensivere Baumbepflanzung erhöht und damit das Mikroklima verbessert werden kann.

2.2.2.3 Neubauquartier Köln

Analog dem Quartier in Madrid handelt es sich auch bei dem Quartier in Köln um ein typisches großstädtisches Neubauquartier mit Geschoßwohnungsbauten. Auch hierbei wird versucht durch eine geänderte Bebauungsstruktur das Mikroklima positiv zu beeinflussen. Im Gegensatz zu Madrid wird hierbei jedoch neben der Intensivierung der Baumbepflanzung die Bebauungsstruktur aufgelockert. Hinsichtlich der Gebäudeuntersuchungen soll bei diesem Quartier geklärt werden, welche raumklimatischen Verhältnisse im Sommer ohne Kühlung bestenfalls erreicht werden können und welche nachhaltigen Lösungen für die Gewährleistung einer optimalen Behaglichkeit zielführend sind.

2.2.2.4 Bestandsquartier Hamburg

Das Quartier in Hamburg zeichnet sich durch eine Blockrandbebauung mit mehrgeschossigen Bestandsgebäuden aus. Wie in vielen Bestandsquartieren deutscher bzw. europäischer Großstädte können oder sollen die Straßenfassaden (z. B. aus Denkmalschutzgründen) nicht gedämmt werden. Durch das vergleichsweise milde Klima, die üppige Bepflanzung und nicht zuletzt die massive Bauweise der Gebäude ist dieses Quartier sowohl hinsichtlich der Außenklimas als auch des Klimas in den Gebäuden das am wenigsten kritische der im Rahmen dieses Projektes untersuchten Quartiere. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt daher darin aufzuzeigen, ob und durch welche Maßnahmen komfortable Bedingungen im Sommer erreicht werden können und welche Maßnahmen dazu erforderlich sind. Darüber hinaus sollen auch für diese Klimaregion und diesen Quartierstyp klimagerechte Sanierungs- und Energieversorgungslösungen aufgezeigt werden. Wegen des vergleichsweise geringen Solarstrahlungsangebots ist die vor-Ort-Versorgung mit erneuerbaren Energien sehr begrenzt.

2.2.2.5 Nachverdichtungsquartier Frankfurt am Main

Dadurch, dass im Modellgebiet sowohl Bestandsgebäude (mit hohen thermischen Speichermassen und vergleichsweise schlechten thermischen Hüllqualitäten) als auch Neubauten (mit geringen thermischen Speichermassen und guten thermischen Hüllqualitäten) vorkommen, wird ein direkter Vergleich der Klimaresilienz und der Lösungsansätze für unterschiedliche Baujahre und Bauqualitäten möglich. Bei den Berechnungen wurde außerdem ein Extremklima (Klimaprognose 2050¹⁸) berücksichtigt, so dass für alle Gebäude klimaresiliente Lösungen mit aktiver Kühlung gefunden werden mussten.

¹⁸ IPCC Szenario B1 (+2,8 °C)

2.2.3 Bestandsquartier Tunis - El Aouina

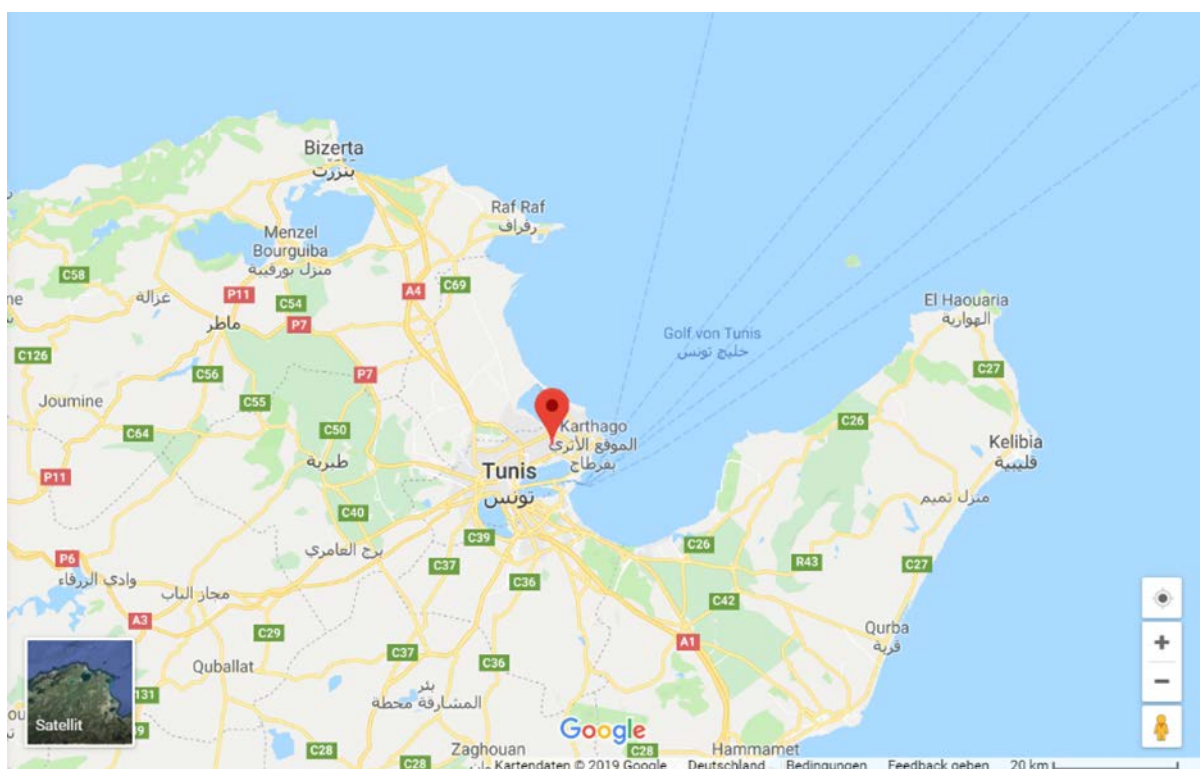
2.2.3.1 Lage und Beschreibung

Tunesien mit seinen elf Millionen Einwohnern hat sich nach den Ereignissen des arabischen Frühlings in Richtung Demokratie bewegt. Im Zuge dieser Entwicklung wurden auch eine Reihe von Maßnahmen im Bereich nachhaltiger Energie und Energieeffizienz umgesetzt. Dies steht im Zusammenhang mit einer wachsenden Bevölkerung und der erheblichen Abhängigkeit von Energieimporten. Das Land zeichnet sich im regionalen Vergleich mit der umfassendsten Energieeffizienzpolitik aus und hat beispielsweise einen Energieeffizienzaktionsplan 2013-2020 verabschiedet.

Der Stadtteil El Aouina ist Teil der die Innenstadt umgebenden Wohngebiete von Tunis und liegt in der Nähe des Flughafens. Die Gebäude sind ein- bis dreigeschossig und werden hauptsächlich von den Eigentümern bewohnt. Viele Gebäude wurden und werden weiterhin aufgestockt, damit weitere Familienmitglieder Wohnraum finden. Typisch ist die dichte, massive Bauweise mit einem zentralen, engen Innenhof, der durch die umgebenden Gebäudeteile beschattet ist. Die Dachflächen werden aufgrund der Hitzebelastung und des mangelnden Sichtschutzes bisher kaum genutzt.

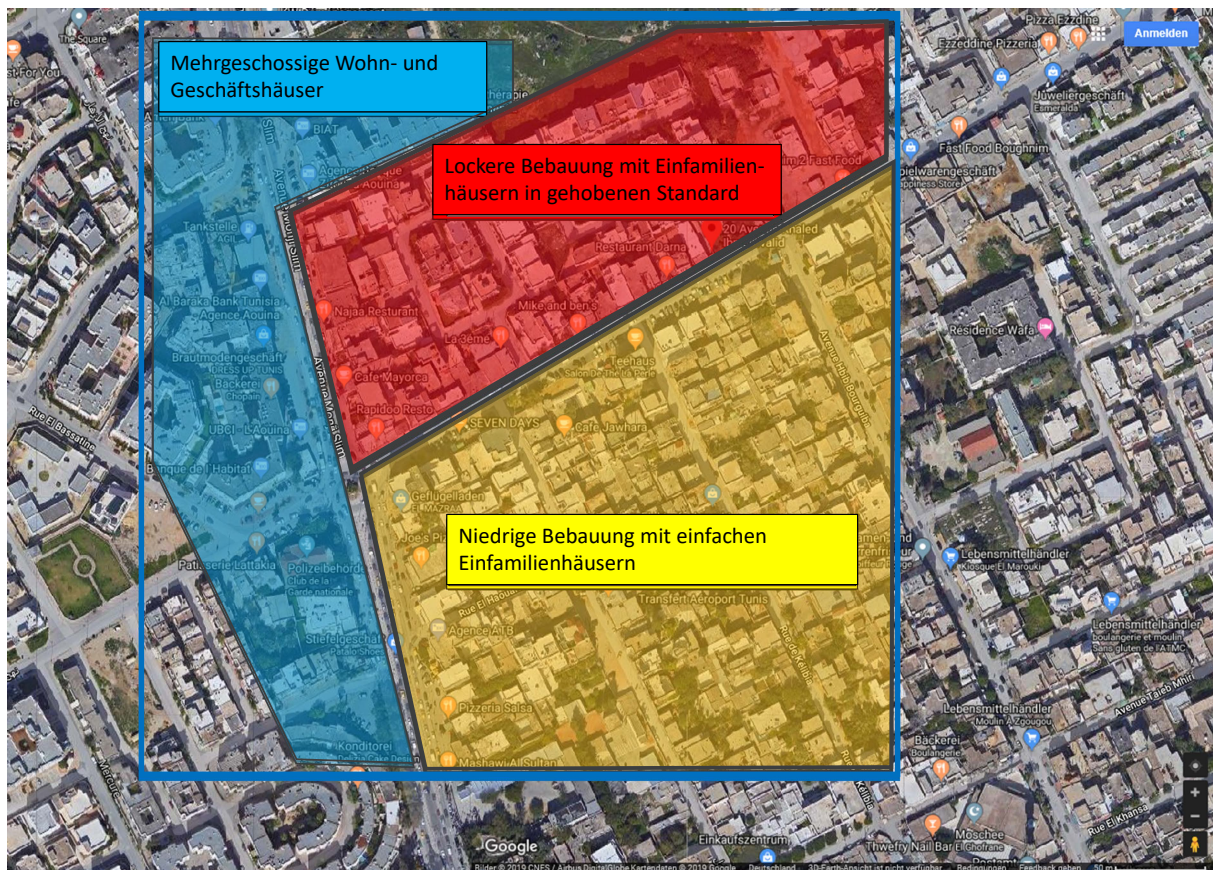
Das Gebiet enthält unterschiedliche relevante Gebäudetypen (einfache und gehobene EFH sowie mehrgeschossige Wohn- und Geschäftshäuser). Es gibt Möglichkeiten für eine Begrünung und Beschattung (insbesondere entlang der großen Straßen und des zentralen Platzes sowie auch in den Randbereichen).

Abbildung 4: Lage des Quartiers El Aouina in Tunis



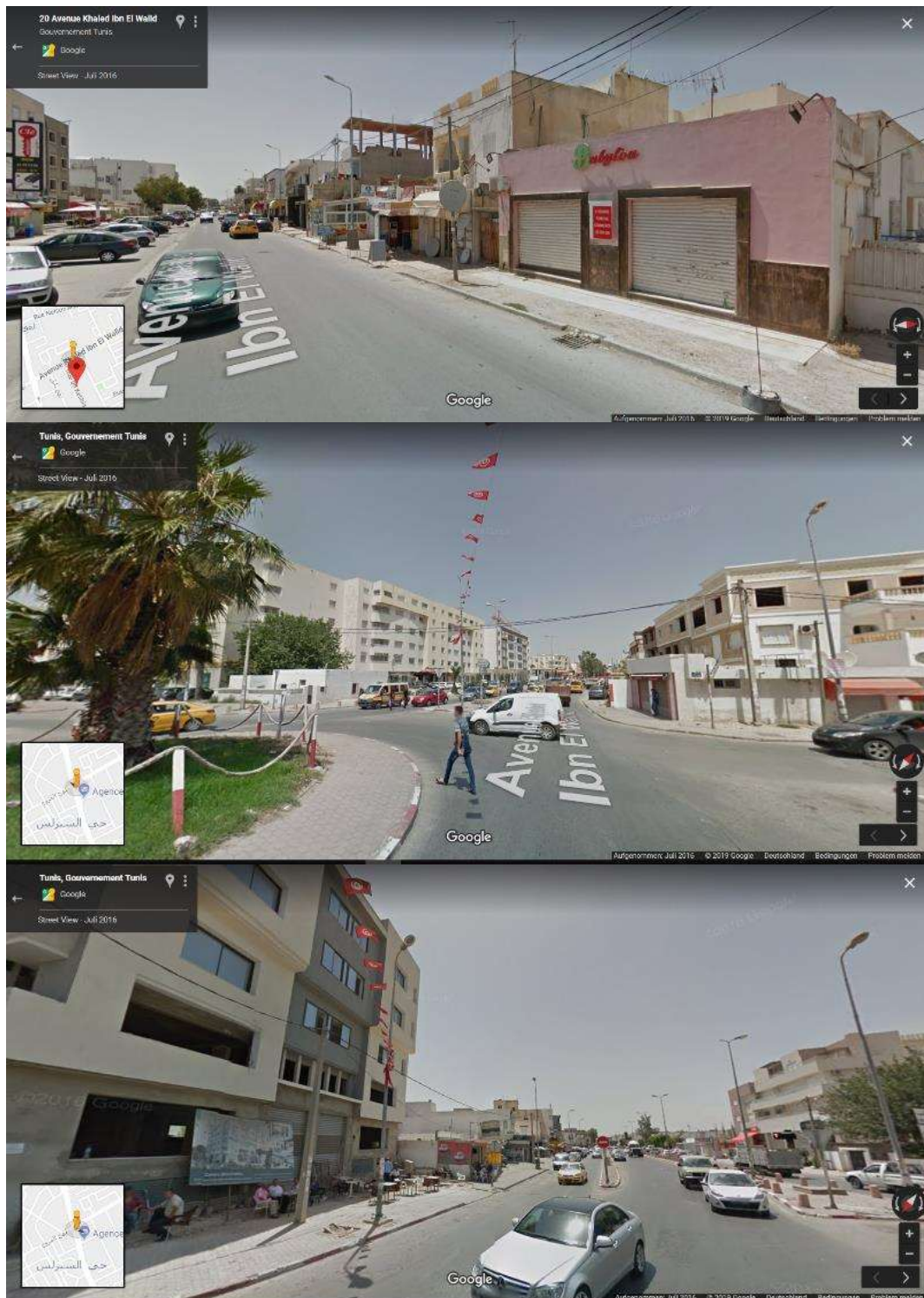
Quelle: Google

Abbildung 5: Gebäudetypen des Quartiers El Aouina in Tunis



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse basierend auf Google (Hintergrund)

Abbildung 6: Straßenansichten des Quartiers - El Aouina in Tunis

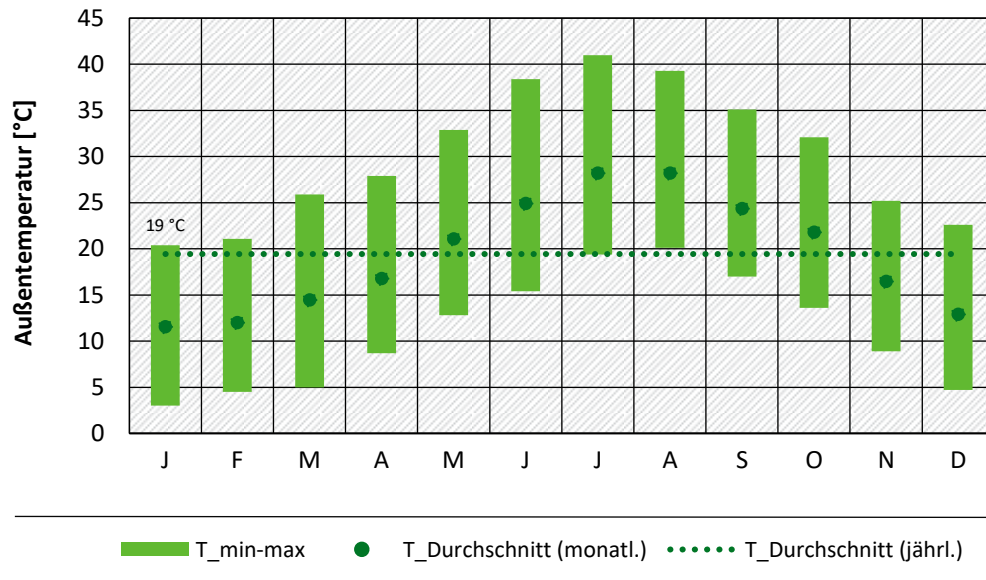


Quelle: Google

2.2.3.2 Klima

Als Grundlage für die Berechnungen wurden die Referenzklimadaten für den Standort Tunis¹⁹ verwendet. Der Jahresmittelwert der Außentemperatur beträgt demnach gemäß Abbildung 7 ca. 19 °C. Die Monatsmittelwerte der Außentemperatur liegen dabei im Bereich von ca. 12 °C (Januar) bis 28 °C (Juli, August). Die sommerlichen Spitzenwerte erreichen über 40 °C.

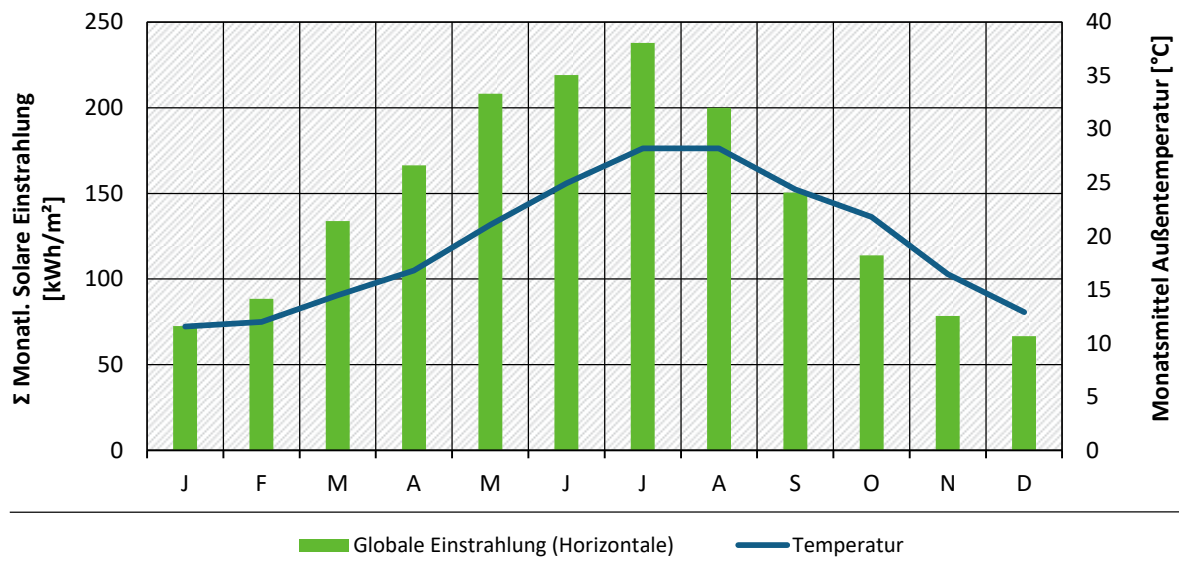
Abbildung 7: Monatswerte der Außentemperatur Tunis (Flughafen)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Die jährliche Globalstrahlungssumme beträgt 1.736 kWh/m²a. Sie ist im Juli mit ca. 240 kWh/m² am höchsten und im Dezember mit ca. 70 kWh/m² am geringsten.

Abbildung 8: Monatswerte der Globalstrahlung und Außentemperatur Tunis (Flughafen)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

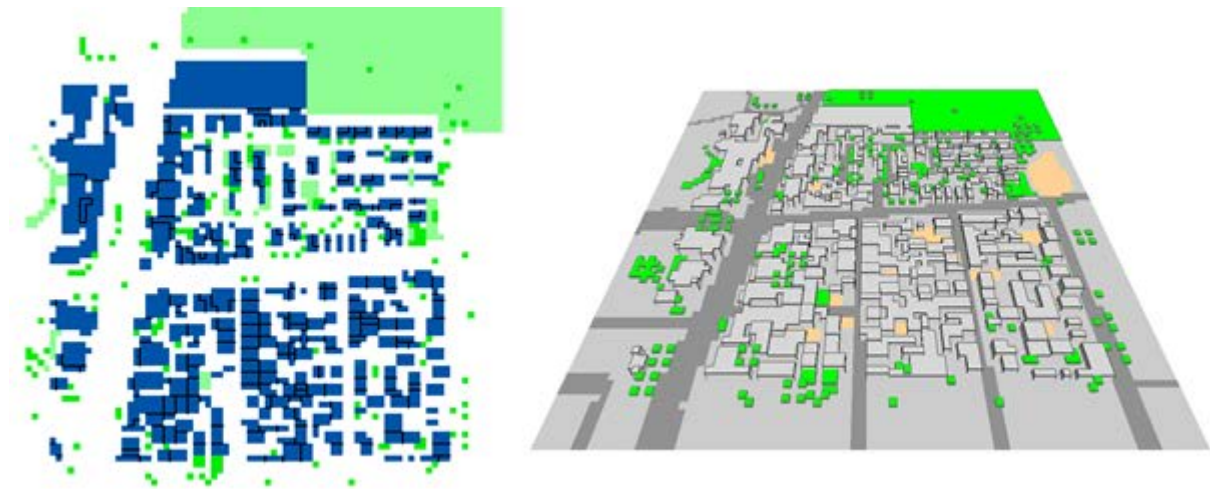
¹⁹ Quelle: Meteonorm Software, Version 7, aktuellster Wetterdatensatz (Periode 2000-2009)

2.2.3.3 Mikroklimasimulation

2.2.3.3.1 Variante Ist-Zustand

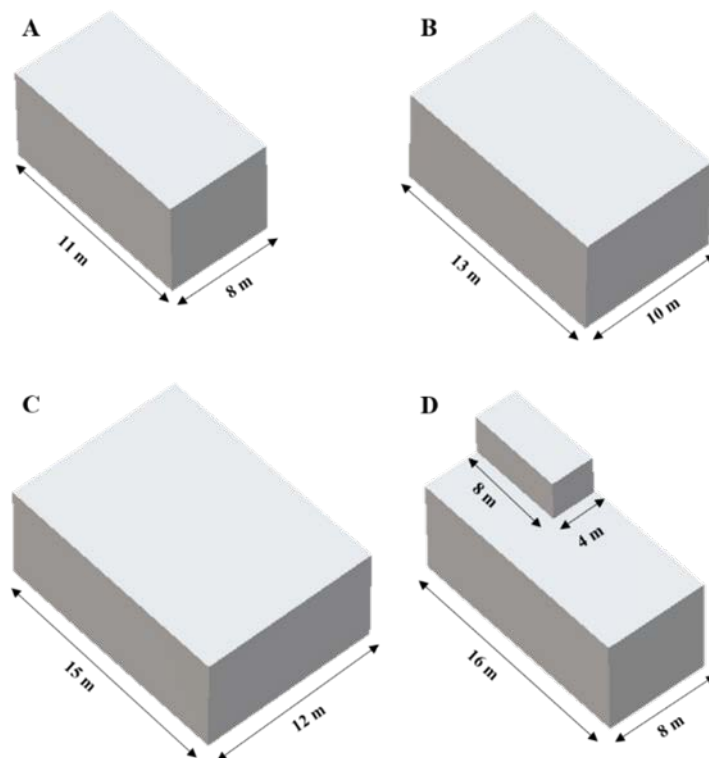
Die Aufteilung des Gebietes wurde im Mikroklimamodell ENVI_MET mit drei verschiedenen Gebäudetypen (vgl. Abbildung 9) realitätsnah abgebildet. Die Bebauungsdichte und allgemeine Stadtstruktur wurden dabei den Luftbildern entnommen und mit standardisierten Gebäudetypen umgesetzt. Das nordöstliche Gebiet mit gehobenen Einfamilienhäusern hat dabei eine wesentlich geringere Bebauungsdichte als der Bereich mit den einfach gehaltenen Familienhäusern im Südosten. Mit steigender Entfernung zu den Hauptstraßen des Gebietes nimmt die Bebauungsdichte zu und die Vegetationsdichte ab.

Abbildung 9: Modellgebiet des Quartiers El Aouina (Status Quo) in Tunis als Aufsicht und 3D-Ansicht



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Um eine generelle Anwendbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebiete in der MENA-Region zu gewährleisten wurden die Gebäudegeometrien standardisiert (Abbildung 10). Dabei wurden die gelb markierten Gebiete in Abbildung 5 mit den Gebäudetypen A bis C in zwei verschiedenen Höhen (6 m und 9 m) digitalisiert. Der Typ D findet Anwendung in dem gehobeneren, rot markierten Gebiet in Abbildung 5. Das blau markierte Gebiet in Abbildung 5 und die direkt an die Hauptstraßen grenzenden Wohngebäude wurde entsprechend der Realität digitalisiert.

Abbildung 10: Standardisierte Gebäudegeometrien

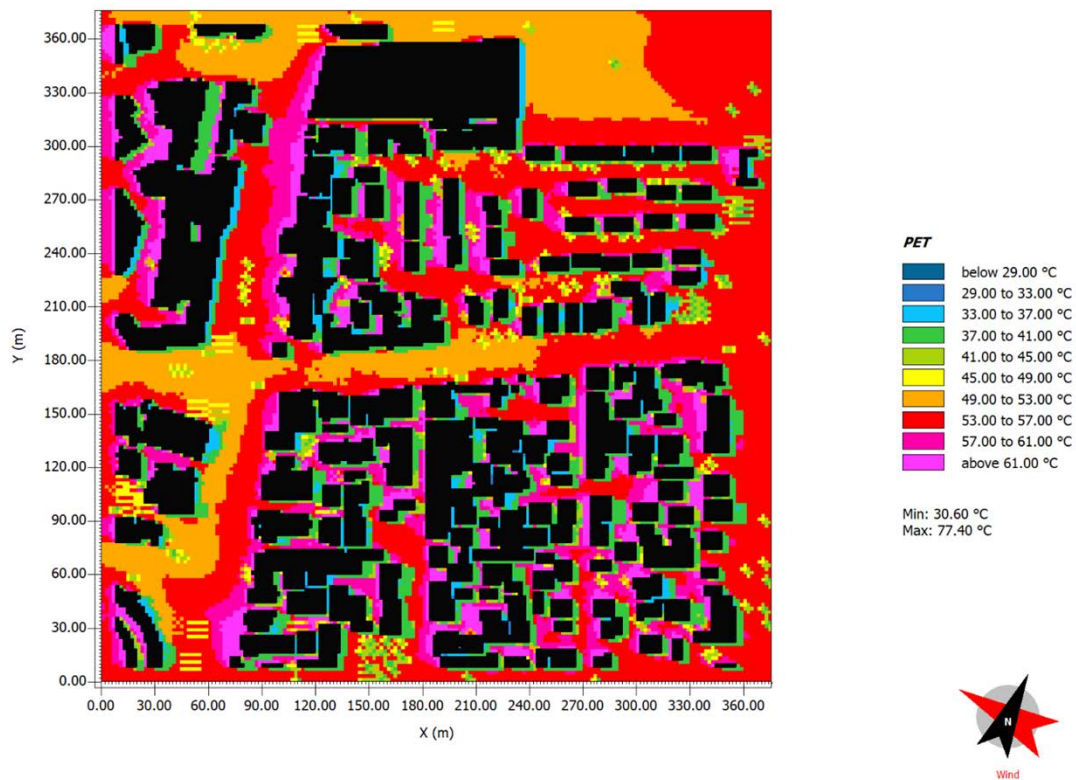
Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.3.3.2 Ergebnisse Mikroklimasimulationen Ist-Zustand

Anhand der Jahresübersichten im Anhang A.3 (Tafel_1_a_Tunis_SQ) sowie der Detailsimulationen (Tafel_1_c_Tunis_Detail) lässt sich feststellen, dass die Gebiete mit der durchgehend höchsten Aufwärmung im Vergleich zur restlichen Umgebung entlang der großen Straßen, des zentralen Platzes und innerhalb des gehobenen Gebietes zu finden sind. Dies lässt sich durch den im Gegensatz zu den einfacheren Gebieten mit dem hohen Sky View Factor (Anteil des von einem Punkt sichtbaren Bereichs des Himmels) und damit der hohen Sonneneinstrahlung erklären. Da mehr Strahlung das Straßenniveau erreichen kann, ist die Aufwärmung der Oberflächen und damit auch der Luft vergleichsweise höher.

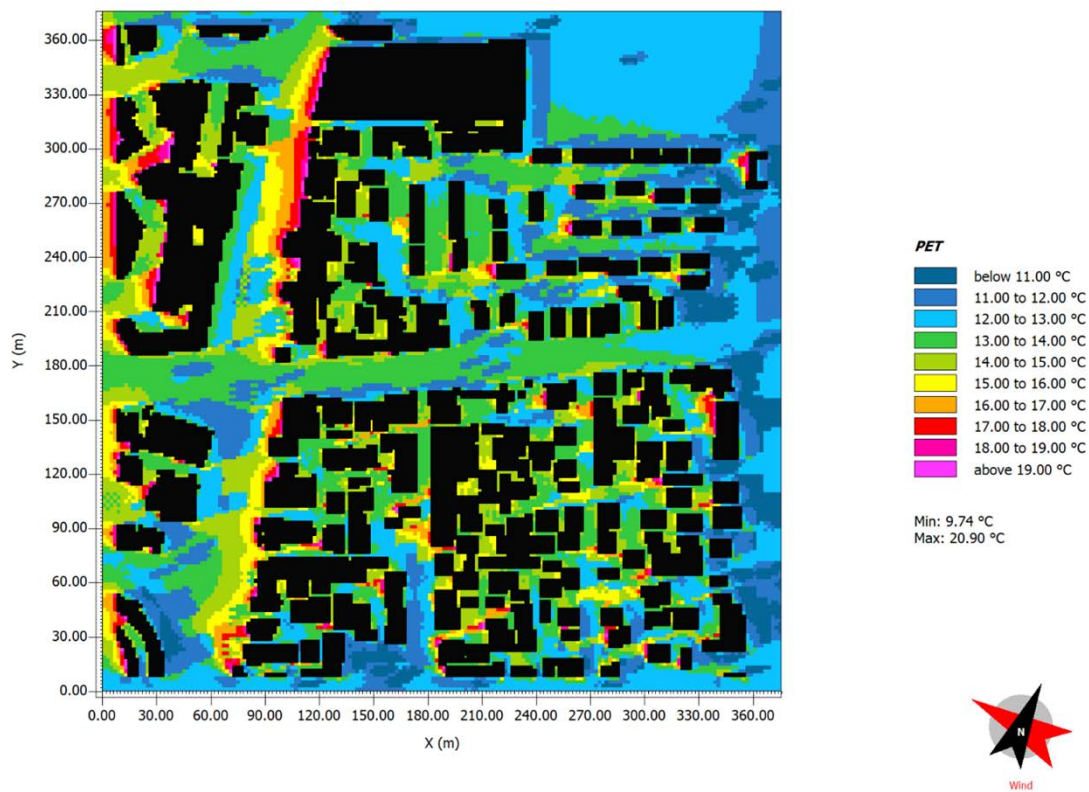
Abbildung 11 zeigt die Verteilung des PET-Wertes am 22. Juli um 16:00 Uhr. Neben der Verteilung der Lufttemperatur ist hier vor allem der Einfluss der kurzwelligen Sonnenstrahlung auf das Temperaturempfinden zu beobachten. Wie man in der Abbildung deutlich erkennt, hat auch das Reflektionsverhalten der Gebäudefassaden einen Einfluss auf das thermische Empfinden der Fußgänger. Vor allem in Nähe der nach Westen ausgerichteten Fassaden kann die durch helle Fassaden ausgelöste Wärmebelastung höher liegen als bei dunkleren Gebäudeoberflächen.

Abbildung 11: Verteilung des PET-Wertes in Tunis am 22. Juli um 16:00 Uhr für den Status Quo



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Abbildung 12: Verteilung des PET-Wertes in Tunis am 14. Januar um 16:00 Uhr für den Status Quo



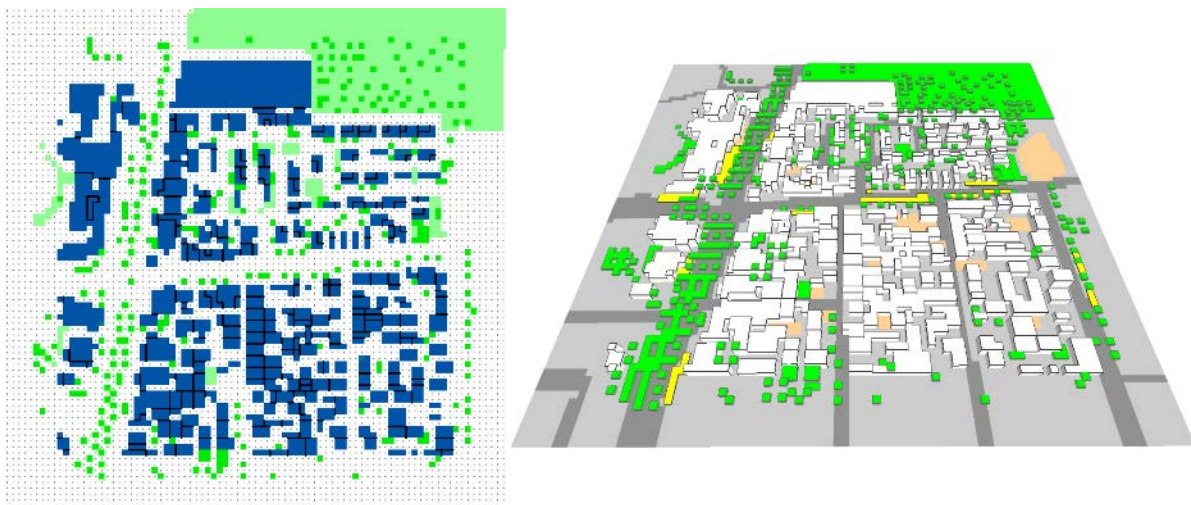
Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

In Abbildung 12 ist die Verteilung des PET-Wertes im Januar dargestellt. Alle Bereiche liegen hierbei im thermisch komfortablen, teilweise leicht kühlen Bereich. Auf der westlichen Straße lässt sich noch eine Differenzierung zwischen den Bereichen mit den noch sonnenbeschienenen Fassaden und der beschatteten Straßenseite erkennen.

2.2.3.3.3 Optimierte Variante

Auf der Grundlage der Ergebnisse des Ist-Zustandes wurden die geplanten Maßnahmen für die optimierte Variante entwickelt. Dazu wurden entlang der großen Straßen landestypische Bäume integriert, um eine höhere Beschattung und einen möglichen Kühlungseffekt der Bäume zu simulieren. Des Weiteren wurden Beschattungselemente (gelb in Abbildung 13) dort installiert, wo eine Nachverdichtung der Vegetation auf Grund der Nähe zu Gebäuden nicht möglich war.

Abbildung 13: Modellgebiet der optimierten Variante als Aufsicht und 3D-Ansicht



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Eine weitere Anpassung, um den Energiehaushalt des Simulationsgebietes zu verbessern, ist die Anpassung der Materialeigenschaften. Um einen möglichst geringen Eingriff in die vorhandenen baulichen Bedingungen zu gewährleisten, beschränkten sich diese auf eine Anpassung des Anstriches. Da die Wände der Gebäude bereits hell sind und so eine geringe Erwärmung der Materialien durch einen hohen Reflexionsgrad gewährleistet wird, wurde diese Maßnahme auf die Dächer angewandt.

2.2.3.3.4 Ergebnisse Mikroklimasimulationen Optimierte Variante

Tafel_1_b_Tunis_OPT sowie Tafel_1_c_Tunis_Detail im Anhang A.3 zeigen die durch die Umgestaltungen hervorgerufenen Lufttemperaturänderungen im Jahresgang (Tafel_1_b_Tunis_OPT) sowie für die Detailsimulationen (Tafel_1_c_Tunis_Detail). Negative Werte bedeuten hierbei eine Reduzierung der Lufttemperatur im Vergleich zum Referenzzustand.

Die absoluten Reduktionen variieren im Jahr und über den Tag. Im Winter sind die Effekte naturgemäß eher gering, da der Sonnenwinkel gering und die Ausgangstemperaturen ebenfalls relativ niedrig sind.

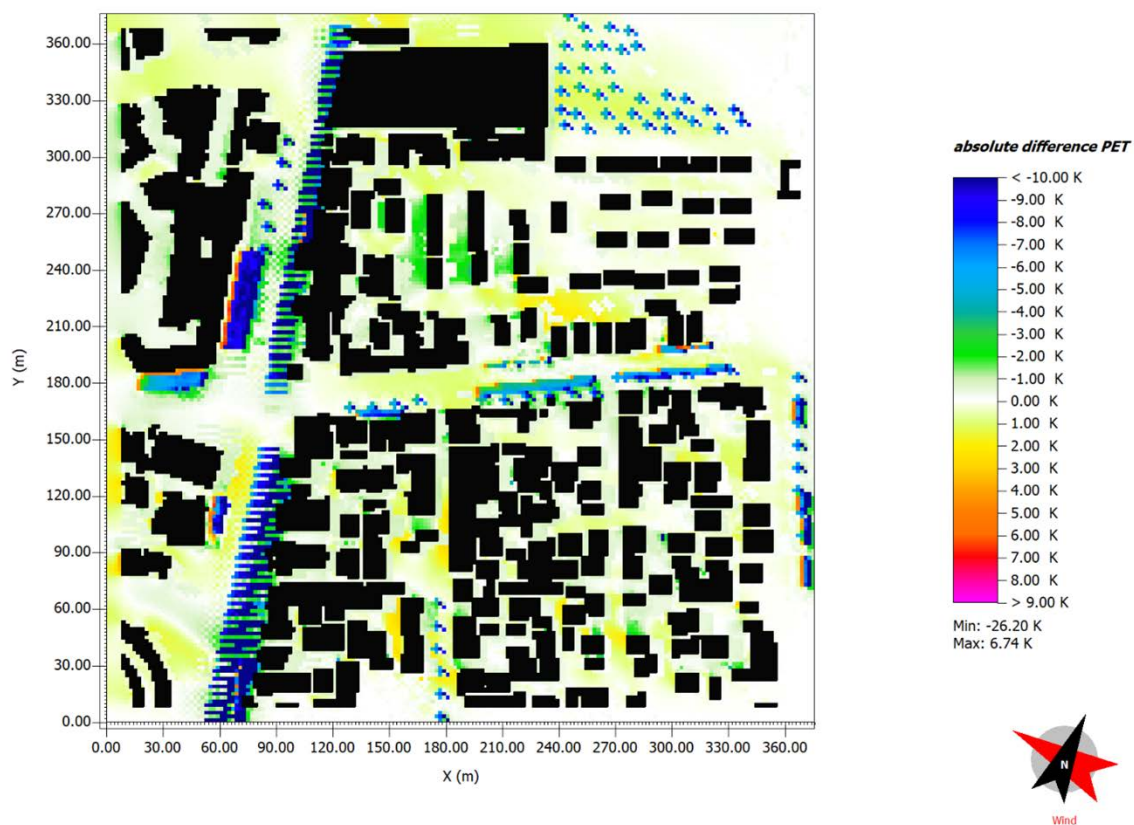
An den Frühlings-, Sommer und Herbsttagen lässt sich hingegen eine flächenhafte Reduzierung der Lufttemperatur um 1 K und mehr beobachten, wobei sich der Effekt durch den Wind während des Durchstreichens des Modellgebiets aufbaut und der maximale Effekt im Lee des Modellgebiets zu beobachten ist.

In den Nachtstunden lassen sich lokal etwas erhöhte Lufttemperaturen beobachten. Diese wärmeren Regionen befinden sich dort, wo die Beschattungselemente angebracht wurden. Hier staut sich in der Nacht die Wärme etwas unter den Elementen und kann nicht nach oben entfliehen, was an diesen Stellen zu höheren Temperaturen von maximal + 0,14 K im Gegensatz zur Ausgangssituation (SQ-Simulation) führt.

Abbildung 14 zeigt die Veränderung des PET-Wertes um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen.

Besonders stark machen sich bei der PET-Verteilung zusätzliche Beschattungszonen bemerkbar, da ein Wegfall der direkten Sonnenstrahlung das Wärmeempfinden unmittelbar reduziert und hierdurch der PET-Wert um 10 K und mehr fällt. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass der PET das statische thermische Empfinden repräsentiert. Speziell die zu beobachtenden kleinräumigen Strukturen sind nur dann relevant, wenn sie über einen längeren Zeitraum eine Veränderung der mikroklimatologischen Verhältnisse bewirken oder immer wieder auf den sich bewegenden Menschen wirken.

Abbildung 14: Veränderung des PET-Wertes in Tunis am 22. Juli um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

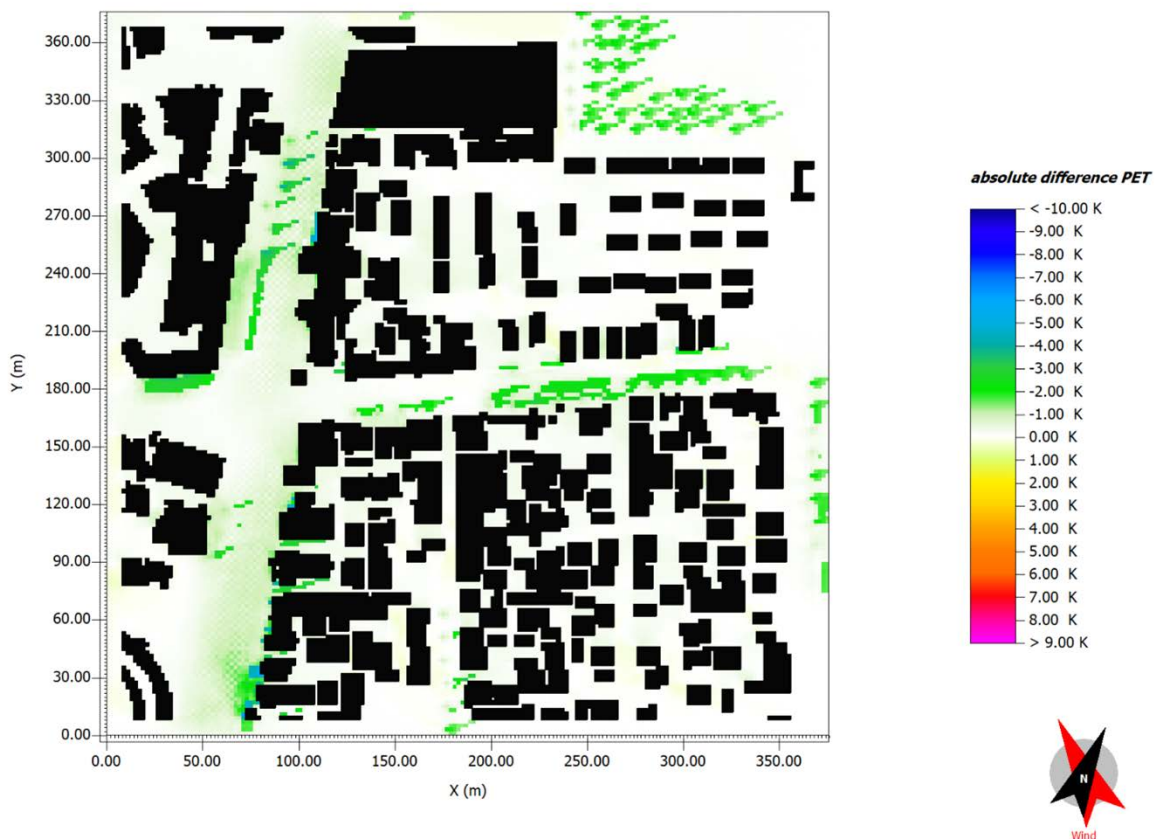
Unter dieser Prämisse sind vor allem durchgehende Baumreihen wie der in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Straße ein wichtiges Element zur Reduzierung der thermischen Belastungen.

Ein weiterer Faktor bei der Bestimmung der thermischen Belastung ist die lokale Windgeschwindigkeit. Dieser Faktor dominiert das Wärmeempfinden zwar nicht so stark wie die kurzweilige Strahlung, kann jedoch insbesondere bei hohen Wärmebelastungen den thermischen Komfort verbessern.

In Tafel_1_c_Tunis_Detail im Anhang A.3 sind hierzu jeweils in den obersten Abbildungen die Windvektoren und die lokale Windgeschwindigkeit aufgezeigt. Speziell in den Nachmittagsstunden sind die lokalen Windgeschwindigkeiten bei einer westlichen oder östlichen Anströmung in den Nord-Süd verlaufenden Straßen gering und verstärken somit nochmals die ohnehin durch die Besonnung hervorgerufene thermische Belastung.

Eine Verbesserung der Durchlüftung ist nur durch invasive Maßnahmen (Entfernen von Gebäuden) möglich und scheidet in dieser Untersuchung als Instrument aus.

Abbildung 15: Veränderung des PET-Wertes in Tunis am 14. Januar um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Abbildung 15 zeigt analog die Veränderungen in der PET-Verteilung für den Januar. Hier sind nur kleine Veränderungen zu verzeichnen, die im Wesentlichen auf den Schattenwurf der neu hinzugefügten Bäume zurückzuführen sind.

2.2.3.3.5 Zusammenfassende Beurteilung

Anhand der Mikroklimasimulationen sind durch die Optimierungsmaßnahmen Verbesserungen sowohl in der Lufttemperatur als auch beim thermischen Komfort (PET) zu erzielen, die zu einem erhöhten Komfort bei Außenaufenthalten führen.

Die untersuchten Optimierungen lassen sich daher, auch bei der Planung eines neuen Quartieres, als sinnvolle Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Komforts im Außenraum der MENA-Region ansehen. Insgesamt gilt bei trockenen, heißen Klimaten eine Reduktion des Strahlungseinfall und eine Erhöhung des latenten Wärmestroms (Verdunstung von Wasser) als geeignete Maßnahme.

Insbesondere in Gebieten mit hoher solarer Einstrahlung können sich jedoch Spannungsfelder zwischen Maßnahmen ergeben, die für den Außenraum günstig sind, und solchen, die für die Energiebilanz der Gebäude günstig sind. Hierzu zählt vor allem die Verwendung von hellen Baumaterialien. Durch die erhöhte Reflektion der Strahlung wird zwar der Energieeintrag in das Gebäude reduziert, gleichzeitig erhöht sich aber durch multiple Reflektionen der Energieeintrag in das Straßensystem und auf Personen im Straßenraum. In diesen Fällen wären alternative Maßnahmen wie Fassadenbegrünungen zu untersuchen.

2.2.3.4 Gebäudesimulation

2.2.3.4.1 Das Simulationsmodell

Im Untersuchungsgebiet gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Gebäuden. Um die Zahl der zu modellierenden Einzelgebäude auf ein handhabbares Maß zu reduzieren, wurden diese zunächst klassifiziert. Für die Klasse wurde anschließend ein Referenzgebäudetyp definiert. Ein Referenzgebäudetyp ist dabei ein normiertes Gebäude bzw. ein Gebäudeteil, das hinsichtlich Geometrie, Bauphysik und Nutzung eine Vielzahl ähnlicher Gebäude repräsentiert.

Die wesentlichen Kennwerte der für das Quartier abgeleiteten Referenzgebäudetypen sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Referenzgebäudetypen in Tunis

Nr.	Typ	Nettofläche	Stockwerke	Fensterfläche	Fläche (extern) Außenwand + Dach	Luftwechsel [1/h]
1	Zweifamilienhaus	260 m ²	2	26,4 m ²	406 m ² ²⁰	0,4 (Infiltration) 1,0 (Nachtlüften)
2	Einzelhandel	65 m ²	1	12,2 m ²	39 m ²	0,4 (Infiltration) 5,0 (tagsüber)
3	Wohnungen in Apartmentblocks	4x75 m ²	2	8,8 m ²	120 / 250 m ² ²¹	0,4 (Infiltration) 1,0 (Nachtlüften)

Neben Geometrie, Bauphysik und Nutzungsart sind Sonneneinstrahlung und lokale Umgebungstemperatur die wesentlichen Einflussfaktoren auf das thermische Gebäudeverhalten. Sowohl die Sonneneinstrahlung als auch die lokale Umgebungstemperatur werden wesentlich durch die Lage des Gebäudes (entweder freistehend, z. B. an einer Straße bzw. Freiflächen oder eingebaut im Quartier) bedingt.

Daher wurden, aufbauend auf den drei oben genannten Referenzgebäudetypen standortspezifische Referenzgebäude entwickelt, welche den individuellen lokalen Gegebenheiten Rechnung tragen.

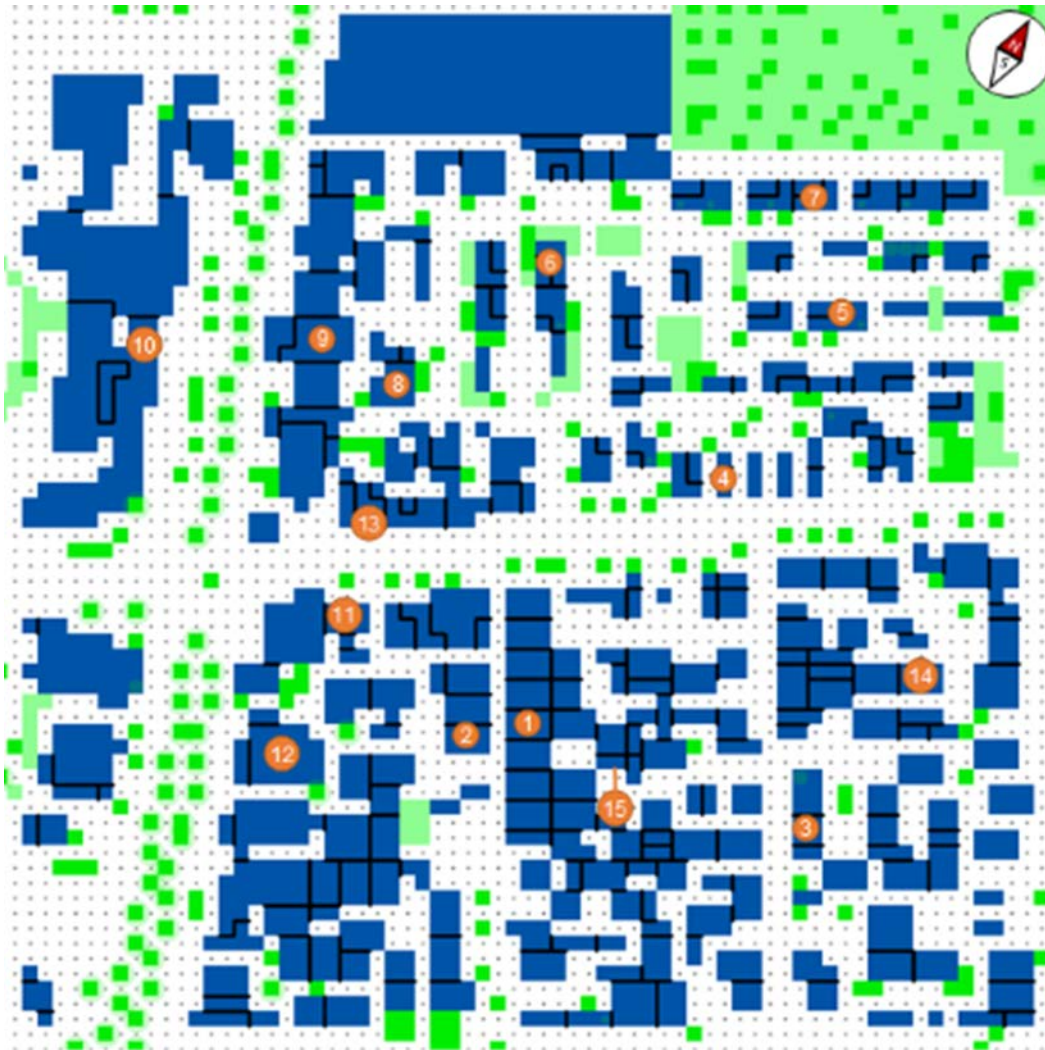
Ein Referenzgebäude ist dabei ein normiertes Gebäude bzw. ein Gebäudeteil, das bzw. der hinsichtlich der Geometrie, Bauphysik, Nutzung und Lage eine Vielzahl ähnlicher Gebäude repräsentiert.

In Abbildung 16 ist die Lage der ausgewählten insgesamt 15 Referenzgebäude dargestellt.

²⁰ Grundgeometrie; wenn das Gebäude angebaut ist, verringert sich die Fläche entsprechend.

²¹ Apartment im Block / Dachgeschosswohnung

Abbildung 16: Auswahl der Referenzgebäude auf der Grundlage der digitalisierten Gebäudestrukturen

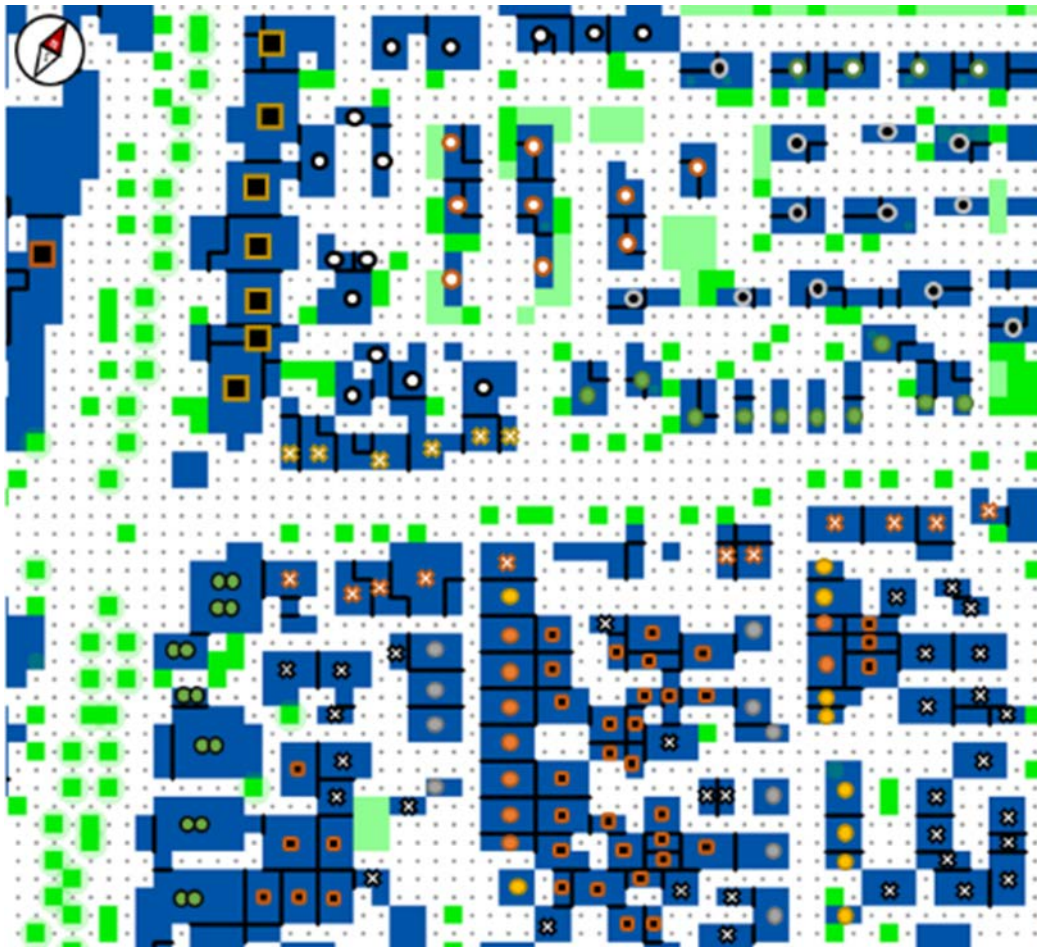


Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse und ENVI_MET

Die folgende Abbildung 17 zeigt die gewählte Zuordnung der 15 Referenzgebäude auf die Gebäude im Untersuchungsgebiet.

Jedes Referenzgebäude ist dabei durch ein unterschiedliches Symbol markiert.

Abbildung 17: Zuordnung der Referenzgebäude zu den digitalisierten Gebäuden



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse und ENVI_MET

Die Zuordnung von Nummern und Symbolen sowie eine Beschreibung der Charakteristik und die Anzahl der durch das Referenzgebäude abgebildeten Einzelgebäude sind der folgenden Abbildung 18 zu entnehmen.

Abbildung 18: Übersicht zur Zuordnung von Nummern und Symbolen inklusive Beschreibung der Charakteristik²²

- | | | |
|-----|---|---|
| 1) | EFH Westfassade – 9 | ● |
| 2) | EFH Ostfassade - 10 | ● |
| 3) | EFH West- und Ostfassade - 10 | ● |
| 4) | EFH gehoben Südfassade - 9 | ● |
| 5) | EFH gehoben Mitte- Ostbereich - 7 | ● |
| 6) | EFH gehoben Mittelbereich - 9 | ● |
| 7) | EFH gehoben Nord-Ostbereich - 4 | ● |
| 8) | EFH gehoben Westbereich - 15 | ● |
| 9) | Hauptstraße Nordwest (Apartments, Geschäft im EG) - 7 | ■ |
| 10) | Hauptstraße Ost (Apartments, Geschäft im EG) - 1 | ■ |
| 11) | Hauptstraße Nord - 11 | ⌘ |
| 12) | Hauptstraße Südwest- 7 | ⌘ |
| 13) | Hauptstraße Süd - 6 | ⌘ |
| 14) | EFH freistehend - 33 | ⌘ |
| 15) | EFH eingeschlossen - 37 | ■ |

Die Nummern beziffern die Anzahl der durch das Referenzgebäude abgebildeten Einzelgebäude

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

2.2.3.4.2 Varianten

2.2.3.4.2.1 Status Quo

Der aktuelle Zustand wird durch das Status Quo-Szenario beschrieben. Als Grundlage der thermischen Berechnungen wurden dabei die Ergebnisse des entsprechenden Szenarios der Mikroklimasimulationen verwendet. Es wurde des Weiteren davon ausgegangen, dass die Gebäude im Winter ortsüblich lediglich teilbeheizt sind, d. h., dass jeweils nur 50 % der Gebäudefläche im Winter auf mind. 20°C geheizt werden.

Hinsichtlich der Klimatisierung erfolgte eine differenzierte Betrachtung. Diese sollte der aktuellen Situation Rechnung tragen, wonach der weit überwiegende Teil der Gebäude nicht klimatisiert ist. Perspektivisch ist jedoch damit zu rechnen, dass der Anteil der klimatisierten Flächen in Wohngebäuden deutlich ansteigen wird. Daher wurden diesbezüglich zwei Varianten definiert (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Definition der Varianten – Status Quo (SQ)

Status Quo	SQ1 (keine Kühlung)	SQ2 (mit Kühlung)
Kühlen (T_{set})	-	2 Räume (24°C)
Heizen (T_{set})	2 Räume (20°C)	2 Räume (20°C)
Kühlung	-	Split-Gerät (geringe Effizienz)
Heizwärmeerzeuger	Gasöfen	Gasöfen

2.2.3.4.2.2 Optimierung

Als Grundlage für die im Folgenden beschriebenen Varianten im optimierten Quartier wurden die Ergebnisse des entsprechenden Mikroklimasimulationsszenarios verwendet. Das optimierte Quartier soll dabei hinsichtlich drei wesentlicher Aspekte untersucht werden:

1. Verbesserung des thermischen Innenraumkomforts,
2. Verringerung des Energiebedarfs und

²² Bei den vielgeschossigen Referenzgebäuden (Nr. 9 und 10) wurden, entsprechend der Lage der Wohnungen im Gebäude (mit oder ohne Dach- oder Erdgeschoss), noch weitere Subtypen berücksichtigt.

3. Transformation zu einem klimaneutralen Quartier.

Hierzu wurden sechs Varianten definiert, deren wesentliche Parameter in Tabelle 15 zusammengefasst sind. Die Parameter der ersten beiden Varianten entsprechen den Berechnungen mit dem Status Quo. Anhand dieser Varianten soll der Einfluss des verbesserten Mikroklimas bei der optimierten Variante aufgezeigt werden. Die darauffolgenden Varianten (Opt3 bis Opt6) untersuchten den Weg hin zu einer klimaneutralen Energieversorgung, durch stetige Verbesserung der Technik und den Einsatz von erneuerbaren Energien. Die schrittweise Anpassung erlaubt es hierbei, den Effekt einzelner Maßnahmen separat einzuschätzen.

Tabelle 15: Definition der Szenarien – Optimiertes Quartier

Variante	Opt1	Opt2	Opt3	Opt4	Opt5	Opt6
Benennung	Keine Kühlung Gas	D 24 Gas	D 24 voll elektrisch	A++ 24 voll elektrisch	A++ 26 voll elektrisch	A++ 26 PV + Batterie
Kühlen (T_{set})	-	2 Räume (24°C)	2 Räume (24°C)	2 Räume (24°C)	2 Räume (26°C)	2 Räume (26°C)
Heizen (T_{set})	2 Räume (20°C)	2 Räume (20 °C)	2 Räume (20°C)	2 Räume (20°C)	2 Räume (20°C)	2 Räume (20°C)
Kühlung	-	Split-Geräte (geringe Effizienz)	Reversible Split- Geräte (geringe Effizienz)	Reversible Split-Geräte (Kältemittel R290 ²³ , hohe Effizienz)	Reversible Split-Geräte (Kältemittel R290, hohe Effizienz)	Reversible Split-Geräte (Kältemittel R290, hohe Effizienz)
Heizwärmeerzeuger	Gasöfen	Gasöfen	Reversibles Split-Gerät s. o.	Reversible Klimageräte s. o.	Reversible Klimageräte s. o.	Reversible Klimageräte s. o.
Warmwasser- Bereitung	Gas- Durchlauf- erhitzer	Gas- Durchlauf- erhitzer	Elektro- Durchlauf- erhitzer	Elektro- Durchlauf- erhitzer	Elektro- Durchlauf- erhitzer	Elektro- Durchlauf- erhitzer
Erneuerbare Energien	-	-	-	-	-	PV mit Batterie ²⁴

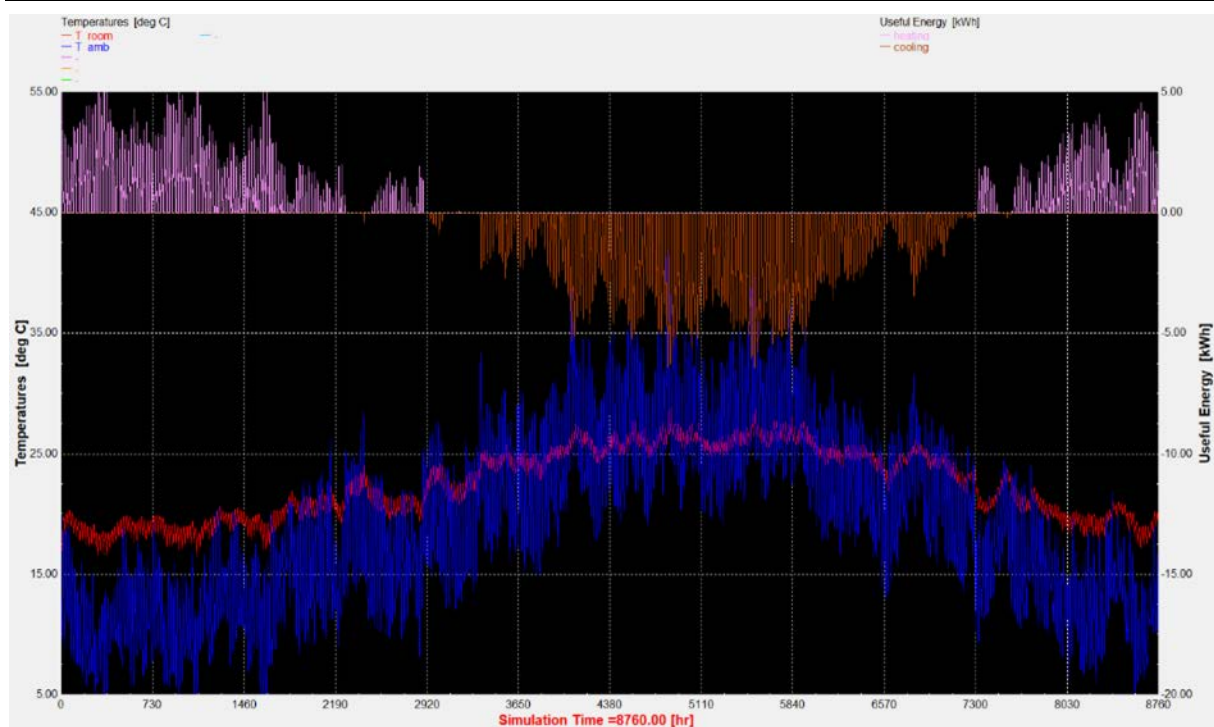
2.2.3.4.3 Ergebnisse

2.2.3.4.3.1 Status Quo

Für jedes der 15 (18 inkl. Subtypen) Referenzgebäude und jede Variante erfolgte eine thermische Ganzjahressimulation mit stündlicher Auflösung. Dabei wurden der Heiz- und Kühlergiebedarf sowie die resultierenden Temperaturen in den einzelnen Räumen berechnet. In Abbildung 19 ist exemplarisch eine Grafik der wesentlichen Ergebnisse einer solchen Simulation dargestellt. Demnach muss in den Monaten November bis April geheizt, in den übrigen Monaten gekühlt werden.

²³ Splitklimageräte mit natürlichen Kältemitteln sind derzeit noch in nur wenigen Ländern erhältlich (Stand Oktober 2021). Es ist jedoch mittelfristig davon auszugehen, dass sich die weltweite Verfügbarkeit verbessern wird. In Deutschland wurden bereits Geräte mit dem Blauen Engel für Klimageräte ausgezeichnet.

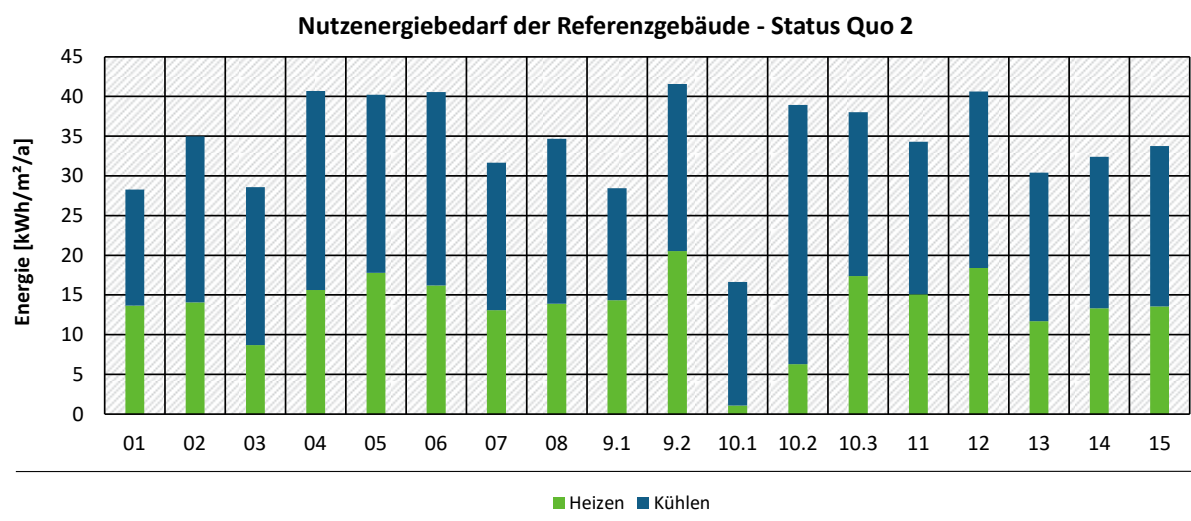
²⁴ Dimensionierung gem. Anforderung zur Erreichung der Klimaneutralität => siehe Ergebnisse

Abbildung 19: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Gebäudesimulation

Gebäudestandorttyp 02 im Szenario „Status Quo 2“ (SQ2, mit Klimatisierung); Wärmebedarf (rosa Balken), Kühlenergiebedarf (orangene Balken), Außentemperatur (blaue Linie), mittlere Raumtemperatur (rote Linie).

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse (Screenshot TRNSYS-Simulationsfenster)

Die Ergebnisse des berechneten Nutzenergiebedarfs (Heizen + Kühlen) für alle Referenzgebäude im Szenario Status Quo 2 (SQ2) sind in Abbildung 20 als spezifische Werte pro m² Nutzfläche dargestellt. Die Energiebedarfe pro Jahr bewegen sich im untersuchten Quartier zwischen 17 kWh/m² für Apartments (siehe Referenzgebäude 10.1) und bis zu 42 kWh/m² bei Einzelhandelsgeschäften (siehe Referenzgebäude 9.2). Der Kühlenergiebedarf überwiegt dabei leicht den Heizenergiebedarf.

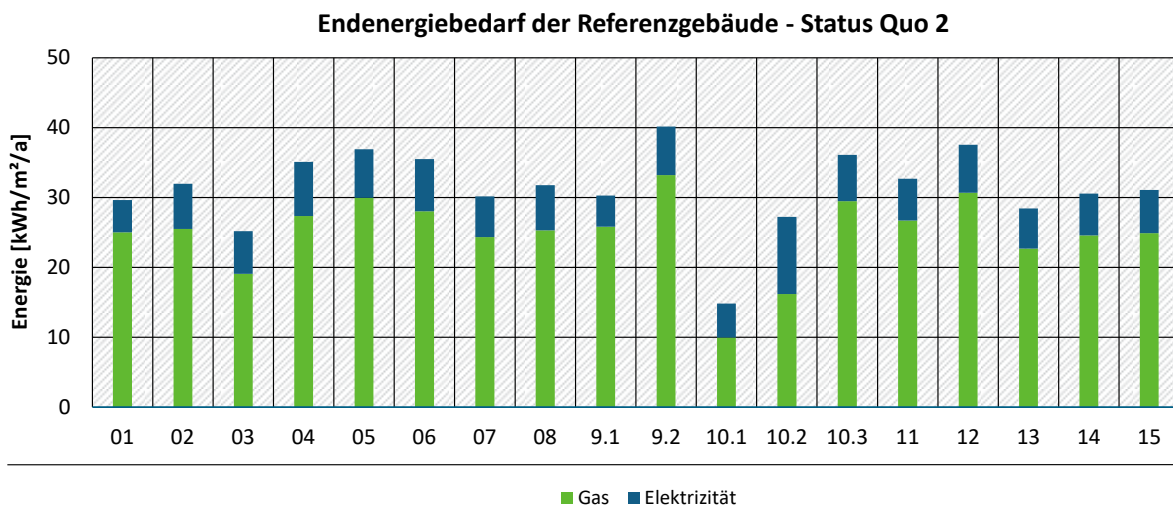
Abbildung 20: Nutzenergiebedarf aller untersuchten Referenzgebäude der Variante Status Quo 2

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Die Einzelhandelsgeschäfte (Referenzgebäude 9.2 und 10.2) haben, vor allem bedingt durch den höheren Luftwechsel, den höchsten Nutzenergiebedarf. Außerdem liegen sie an der Nord-Süd verlaufenden Hauptstraße, an welcher auch weitere Referenzgebäude mit hohem Nutzenergiebedarf für Kühlung (10.3, 12) liegen. Ausgenommen hiervon ist das Referenzgebäude 10.1, bei dem es sich um ein Apartment im Erdgeschoss handelt. Zusätzlich ist zu beobachten, dass die Gebäude im nordwestlichen Gebiet (Referenzgebäude 4, 5, 6) ebenfalls verhältnismäßig viel Nutzenergie, vor allem für Kühlung, benötigen.

In Abbildung 21 ist der Endenergiebedarf, aufgeschlüsselt nach den Energieträgern Elektrizität und Gas, dargestellt. Zum einen aufgrund des zusätzlich eingerechneten Bedarfs für die Warmwasserbereitung, aber auch aufgrund der Erzeugeraufwandszahlen²⁵ ergibt sich für den Endenergiebedarf ein anderes Bild: Der Gasbedarf (Endenergiebedarf Heizung und Warmwasser) überwiegt in dieser Betrachtung deutlich.

Abbildung 21: Endenergiebedarf der Referenzgebäude für Heizen, Warmwasser und Kühlen der Variante Status Quo 2

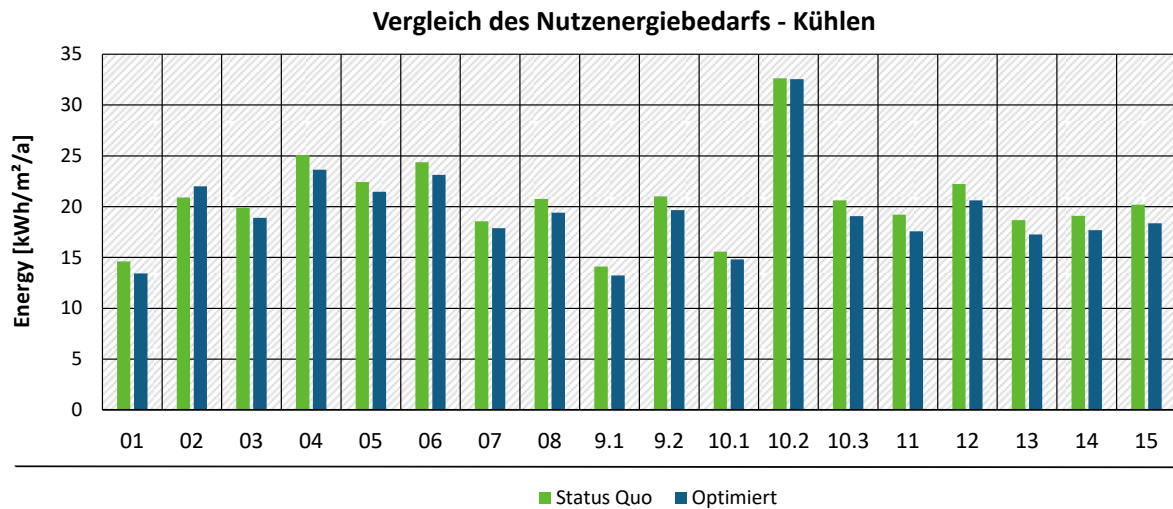


Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

2.2.3.4.3.2 Optimiertes Quartier

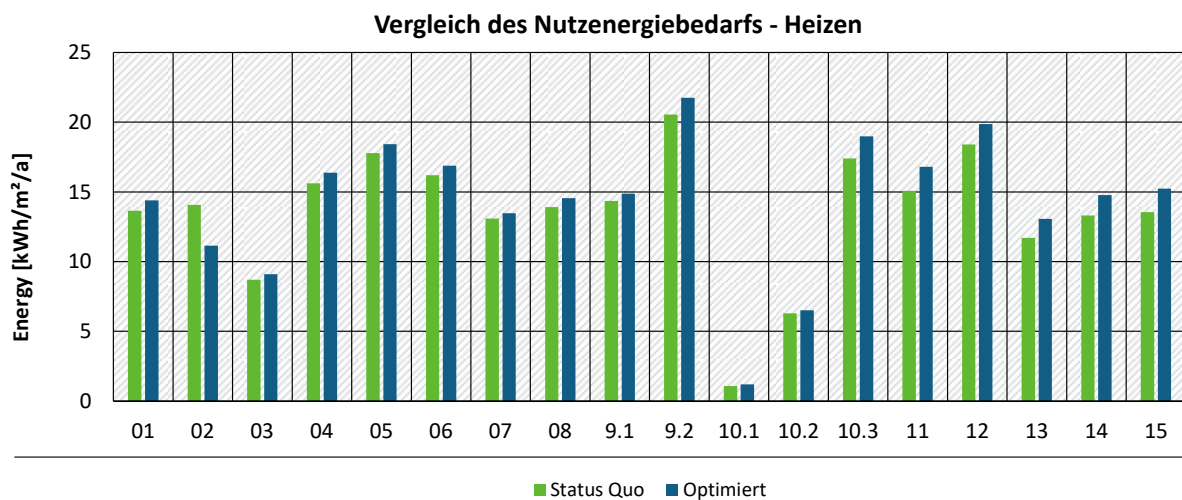
Durch die Umsetzung der Maßnahmen im Quartier zur Eindämmung des Hitzeinseleffekts, wird eine Absenkung des Kühlenergiebedarfs erreicht. Abbildung 22 zeigt, dass bei fast allen Referenzgebäuden der Nutzenergiebedarf für Kühlung sinkt. Die durchschnittliche Reduzierung als Mittelwert über die Referenzgebäude beträgt ca. 5 %.

²⁵ Erzeugeraufwandszahl: Verhältnis Endenergie zu Nutzwärme bzw. -kälte. Dieses beträgt für Gas 1,2 und für Klimakälte (stromgetrieben) ca. 0,3 (bei der Modellierung wurde ein von den aktuellen Betriebsbedingungen abhängiger stündlicher EER-Wert berechnet).

Abbildung 22: Vergleich Kühlenergiebedarf der Szenarien „Status Quo“ (SQ2) und „Optimiert“ (Opt2)

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Gleichzeitig ist gemäß Abbildung 23 aber auch zu beobachten, dass der Heizenergiebedarf im Mittel im gleichen Maße ansteigt.

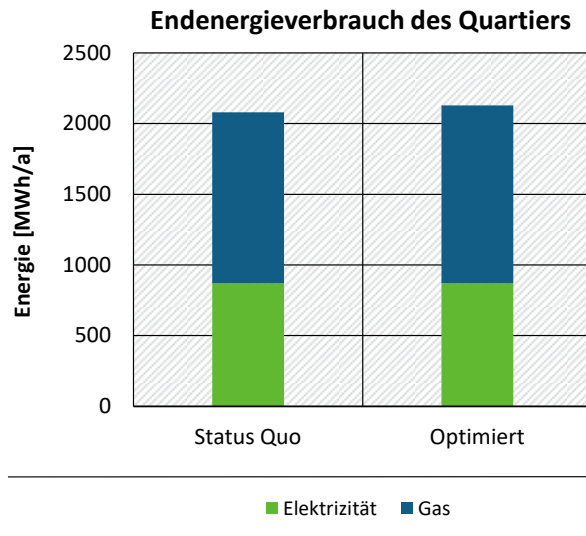
Abbildung 23: Vergleich Heizenergiebedarf der Szenarien „Status Quo“ (SQ2) und „Optimiert“ (Opt2)

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Unter Berücksichtigung der Häufigkeiten der einzelnen Referenzgebäude im Quartier (vgl. Abbildung 17) und der Erzeugeraufwandszahlen ergibt sich, dass im optimierten Quartier ca. 1 %²⁶ mehr Endenergie über das Jahr benötigt werden (siehe Abbildung 24).

²⁶ inkl. Haushaltsstrombedarf

Abbildung 24: Vergleich Endenergieverbrauch (inkl. Heizen, Kühlen, Warmwasser und Haushaltsstrombedarf²⁷) der Szenarien „Status Quo“ (SQ2) und „Optimiert“ (Opt2)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

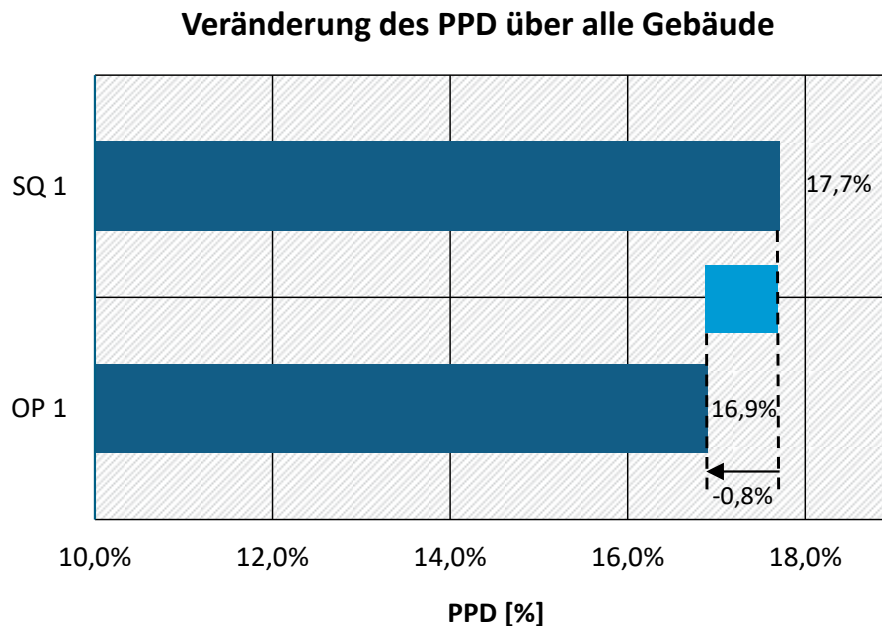
Neben den energetischen Aspekten ist auch der thermische Komfort zu betrachten. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund wichtig, dass die meisten Wohnungen im Quartier derzeit noch nicht klimatisiert sind. Zur Quantifizierung des thermischen Komforts wird der sog. PPD-Wert²⁸ herangezogen. Dieser beziffert den Anteil an Personen, die das vorherrschende Raumklima statistisch gesehen als unbehaglich empfinden. Für diese Analyse wurden die Szenarien ohne Kühlung (Varianten SQ1 und Opt1) herangezogen. Die Einzelhandelsgeschäfte (9.2, 10.2) wurden in dieser Auswertung nicht berücksichtigt, da davon auszugehen ist, dass diese immer gekühlt werden.

Abbildung 25 zeigt die Mittelwerte des PPD in den Innräumen über die Nutzungszeit und alle Gebäude im Quartier, sowie dessen Änderung, die durch die Optimierungsmaßnahmen im Quartier erreicht wird. Im Durchschnitt verbessert sich der PPD in den Gebäuden im optimierten Quartier um 0,8 Prozentpunkte im Vergleich zum Status Quo. Insgesamt ist der Anteil Unzufriedener von ca. 17 % jedoch als sehr hoch einzustufen.

²⁷ Es wurde ein spezifischer Haushaltsstrombedarf von 18 kWh/m² angenommen (z. B. 4680 kWh für die 260 m² großen Zweifamilienhäuser). Dieser Wert ist, bezogen auf deutschen Verhältnisse, als eher gering einzustufen.

²⁸ Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener (Prediced Percentage of Dissatisfied) gem DIN EN ISO 7730

Abbildung 25: Durchschnittliche Veränderung des PPD-Faktors nach den Optimierungsmaßnahmen im Quartier (Variante Opt1, ohne Kühlung)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

2.2.3.4.3.3 Optimiertes Szenario

Im Folgenden soll geprüft werden inwieweit eine klimaneutrale Versorgung der Gebäude im Quartier möglich ist und durch welche Maßnahmen dies konkret umgesetzt werden könnte.

Als verfügbare erneuerbare Energiequelle vor Ort wird Photovoltaik auf den Dächern berücksichtigt. Um PV-Strom für die Gebäudeversorgung nutzen zu können, müssen Heizung und Warmwasserbereitstellung elektrisch betrieben sein. Aus diesem Grund wurden die in Tabelle 15 aufgeführten vier vollelektrischen Varianten definiert. Eine derartige Umstellung wird sowohl aus technischer als auch finanzieller Perspektive als machbar eingeschätzt. Um den künftig wahrscheinlich steigenden Komfortansprüchen Rechnung zu tragen, wurde außerdem bei allen Szenarien eine Kühlung berücksichtigt. Weitere Maßnahmen, wie z. B. eine verbesserte Dämmung wurden nicht berücksichtigt, da hierbei das Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen als unzureichend bzw. nicht praktikabel eingeschätzt wurde.

Bei den vollelektrischen Varianten wurden reversible Klimagräte zum Heizen und Kühlen berücksichtigt, sowie ein elektrischer Durchlauferhitzer zur Warmwasserbereitung. Der Weg zur Klimaneutralität soll zum einen durch Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen und zum anderen durch die Deckung des verbleibenden Energieverbrauchs mit PV erfolgen. Als Effizienzmaßnahmen wurden ausgehend von der Variante D24 (Opt3) zunächst ein hocheffizientes Heiz- und Kühlgerät (Variante Opt4: „A++24“), als Suffizienz-Maßnahme eine Anpassung der Kühltemperatur von 24°C auf 26°C (Variante Opt5 „A++26“) berücksichtigt²⁹.

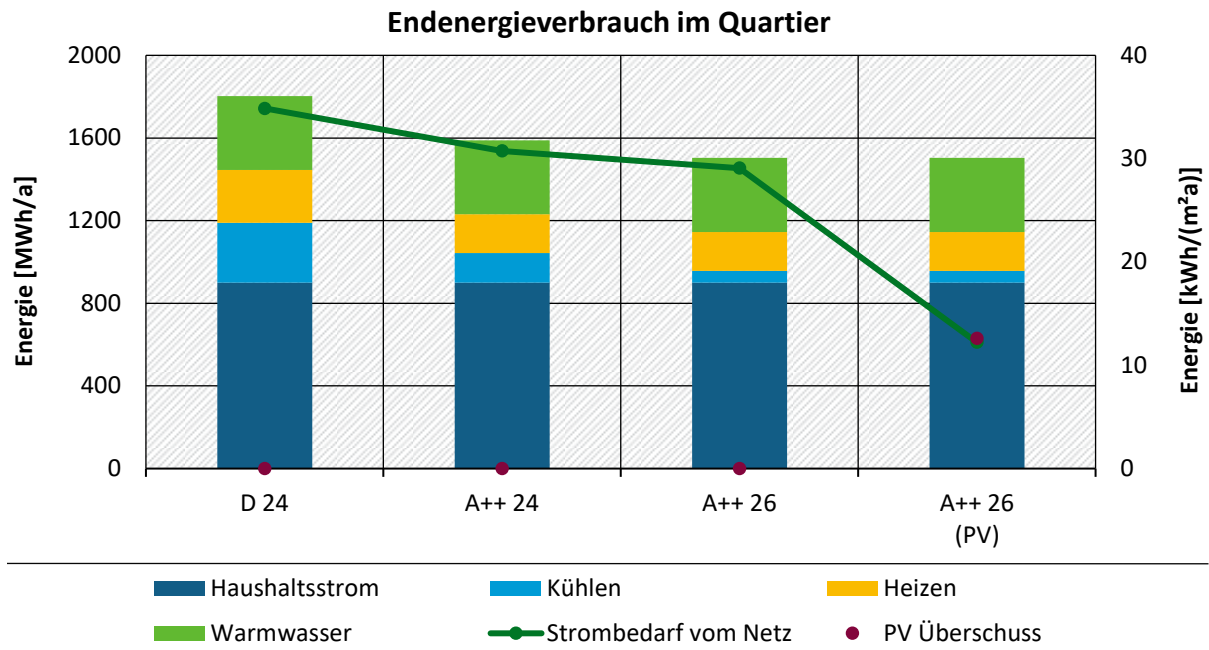
Unter den o. g. Voraussetzungen und einer geeigneten Dimensionierung von PV und Batteriespeicher (vgl. Variante Opt6: A++ 26 PV) ist es möglich, dass über 90 % des Heiz-, Kühl- und Warmwasserbedarfs direkt durch die eigene Energieerzeugung abgedeckt wird³⁰. Die

²⁹ Diese Maßnahme ist sinnvoll, aber nicht notwendig, wie aus der Abbildung zu entnehmen ist.

³⁰ Eine 100 %ige direkte Eigendeckung des Strombedarfs wäre technisch möglich, würde aber eine unverhältnismäßige Mehrinvestition in Erzeugungs- und Speicherkapazität bedeuten. Der ökonomisch erreichbare Deckungsanteil inklusive Haushaltsstrom liegt bei ca. 50 %.

Leistung der PV-Anlagen kann dabei so ausgelegt werden, dass in der Jahresbilanz genug Strom produziert wird, um das untersuchte Quartier mit Heiz- und Kühlenergie zu versorgen, sowie gleichzeitig den Haushaltsstrombedarf und den Strombedarf des Einzelhandels zu decken. Pro Wohneinheit ist dazu im Mittel eine PV-Anlage mit 4 kWp sowie eine Batterie mit 6 kWh Speicherkapazität notwendig³¹. Die Endenergieverbräuche (Strom) der entsprechenden optimierten Varianten sind in Abbildung 26 dargestellt.

Abbildung 26: Transformation zu einem klimaneutralen Quartier: Spezifischer Endenergieverbrauch (Strom) des Quartiers



Darstellung des Endenergieverbrauch nach Anwendung (Balken) sowie der gesamte resultierende Strombedarf aus dem Netz (inkl. PV-Einspeisung, grüne Linie) und die überschüssige PV-Erzeugung (rote Punkte).

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Aus der Grafik wird ersichtlich, dass der Endenergieverbrauch (Strom) von ca. 1.800 MWh/a (ca. 35 kWh/m²a) im vollelektrischen Ausgangsfall „D24“ durch Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen auf ca. 1.500 MWh/a (ca. 30 kWh/m²a) gesenkt werden kann. Durch die lokalen Aufdach-PV-Anlagen und Batteriespeicher kann er weiter auf ca. 600 MWh/a (ca. 11 kWh/m²a) reduziert werden. Dieser verbleibende Energiebedarf entspricht dabei dem Überschuss der PV-Anlagen im Sommer, so dass die Jahresbilanz ausgeglichen ist. Um jederzeit eine klimaneutrale Stromversorgung gewährleisten zu können, sind weitere Maßnahmen erforderlich, die jedoch über die Quartiersebene hinaus gehen müssen (z. B. saisonale Stromspeicherkonzepte wie Power to Gas to Power oder Windkraftanlagen). Die vorgeschlagenen Maßnahmen für die Gebäude im Quartier können jedoch einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung des tunesischen Stromnetzes leisten, dessen Emissionsfaktor 2019 bei 447 g/kWh lag (Irena 2021).

³¹ Bei den Häuserblocks mit mehreren Apartments sowie Geschäften wurden, unter Berücksichtigung der begrenzten Dachflächen, nur 2 kWp pro Apartment angesetzt.

2.2.3.4.3.4 Zusammenfassende Beurteilung

Die berücksichtigten Maßnahmen zur Verringerung des Hitzeinseleffektes im Quartier haben bei fehlender Kühlung einen geringen, aber messbaren positiven Einfluss auf den Innenraumkomfort in den Gebäuden. Hinsichtlich der energetischen Aspekte wird die geringfügige Minderung des Kühlenergiebedarfs durch die leichte Erhöhung des Heizenergiebedarfs neutralisiert.

Eine zumindest jahresbilanziell klimaneutrale Versorgung der Gebäude ist durch entsprechende Umrüstungen auf reversible anstelle von einfachen Splitklimateilgeräten und eine elektrische Warmwasserbereitung sowie die Vorsehung von PV auf den Dächern und Batteriespeichern möglich. Zur Vermeidung direkter Treibhausgasemissionen müssen bei der Umstellung Klimaanlageanlagen mit natürlichen Kältemitteln verwendet werden.

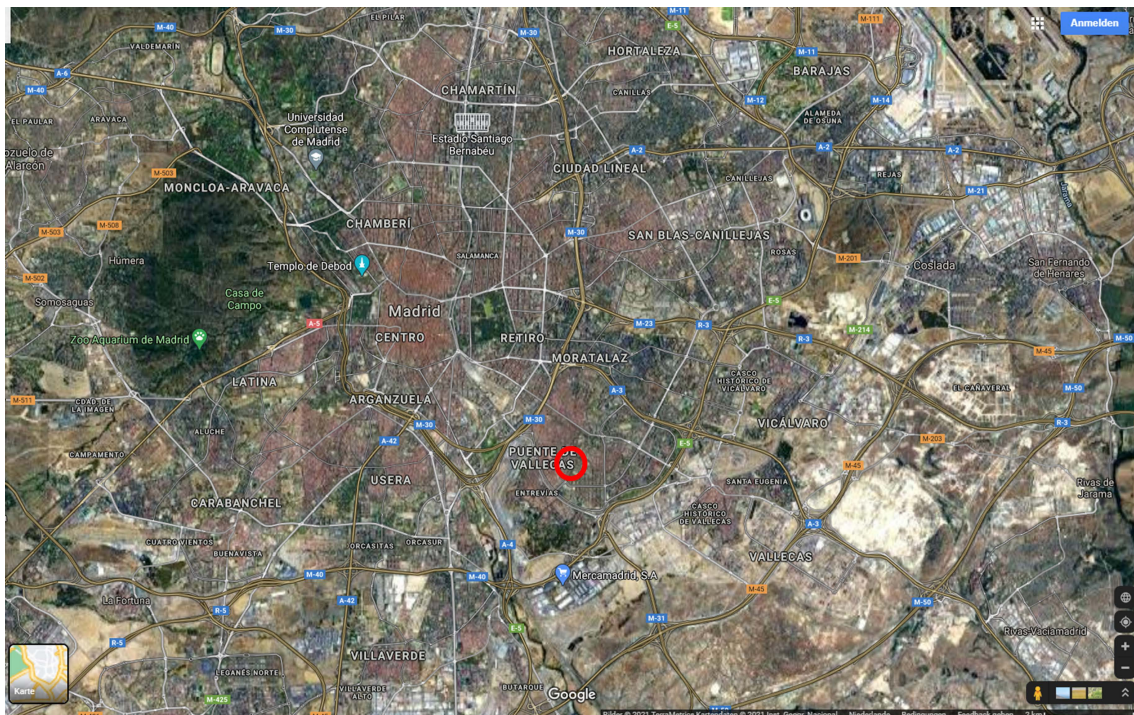
Die beschriebenen Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen sind ökonomisch und ökologisch sinnvoll und in der Lage, eine jahresbilanziell klimaneutrale Versorgung zu gewährleisten. Durch den hohen Eigennutzungsanteil am erzeugten PV-Strom kann der Strombedarf (inkl. Haushaltsstrom) um zwei Drittel auf 11 kWh/m²a gesenkt und somit ein wichtiger Beitrag zur Dekarbonisierung des tunesischen Stromnetzes geleistet werden.

2.2.4 Neubauquartier *Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles* in Madrid

2.2.4.1 Lage und Beschreibung

Das Neubaugebiet *Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles* liegt ca. 4 km südöstlich des Zentrums von Madrid und soll ein Bestandsgebiet, das Ende der 1960er Jahre erbaut wurde, ersetzen. Das Projekt wird auf der Grundlage einer städtebaulichen Planung mit Hilfe öffentlicher Förderung gebaut. Die Wärmeversorgung des Quartiers soll über Fernwärme erfolgen, die mit Biogas aus Siedlungsabfällen generiert wird.

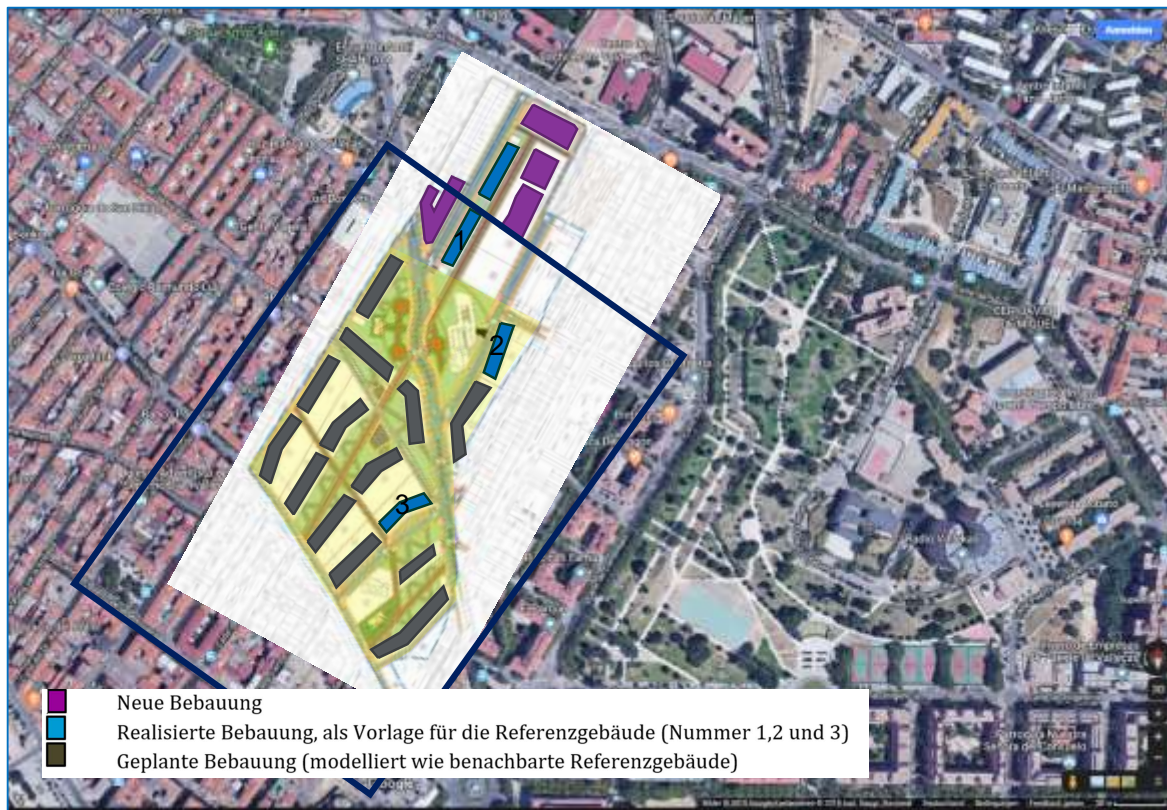
Abbildung 27: Lage des Neubauquartiers *Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles* in Madrid (siehe Roter Kreis)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse basierend auf Google (Hintergrund)

Auf der folgenden Abbildung ist die geplante Bebauungsstruktur des Neubaugebietes zu erkennen, wobei zum Zeitpunkt der Untersuchung (2019) erst wenige Gebäude realisiert wurden.

Abbildung 28: Lageplan Naubauquartier Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles in Madrid, Modellgebiet (blau umrandet)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse basierend auf Google (Hintergrund)

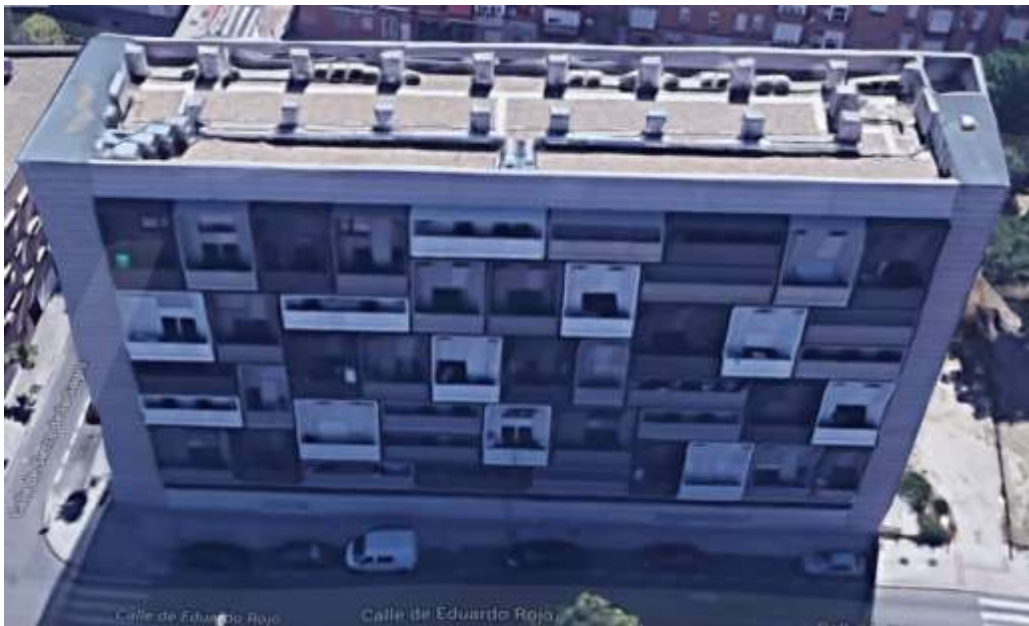
Die folgenden Abbildungen zeigen Ansichten von bereits realisierten Gebäuden, die als Vorlage für die Referenzgebäude herangezogen wurden.

Abbildung 29: Ansicht Gebäude Nr.1



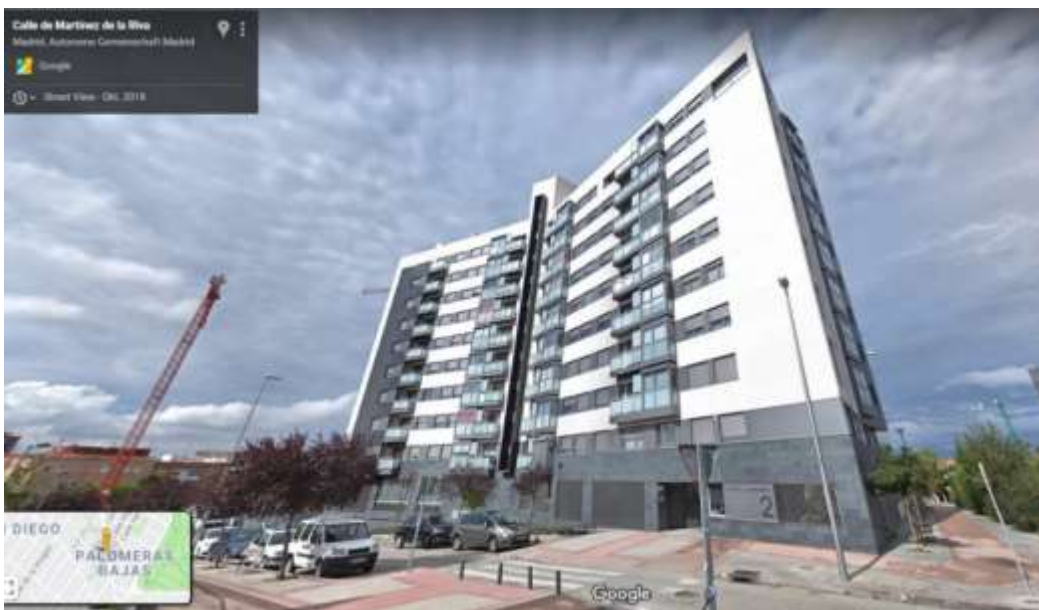
Quelle: Google

Abbildung 30: Referenzgebäude Nr.2



Quelle: Google

Abbildung 31: Referenzgebäude Nr.3

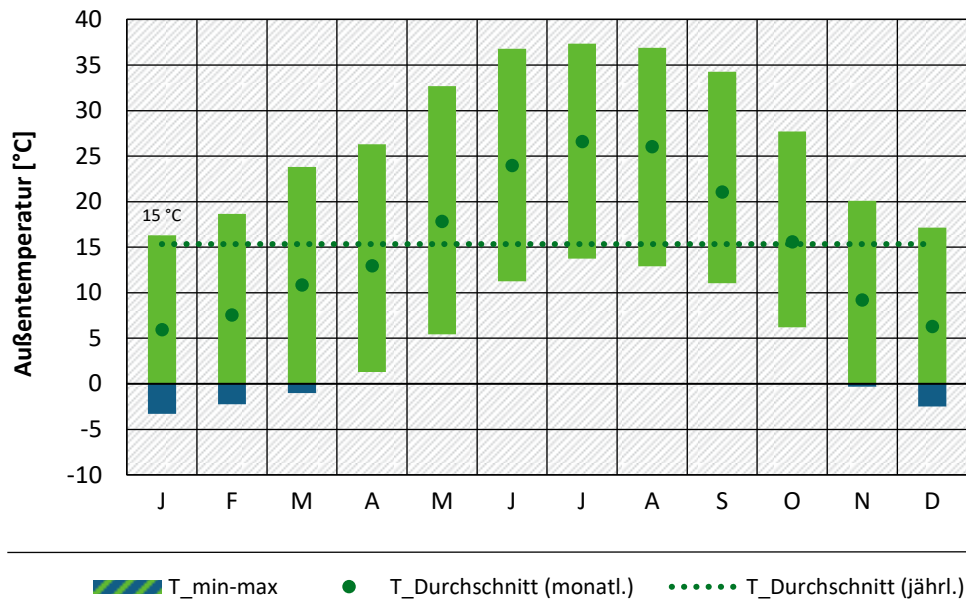


Quelle: Google

2.2.4.2 Klima

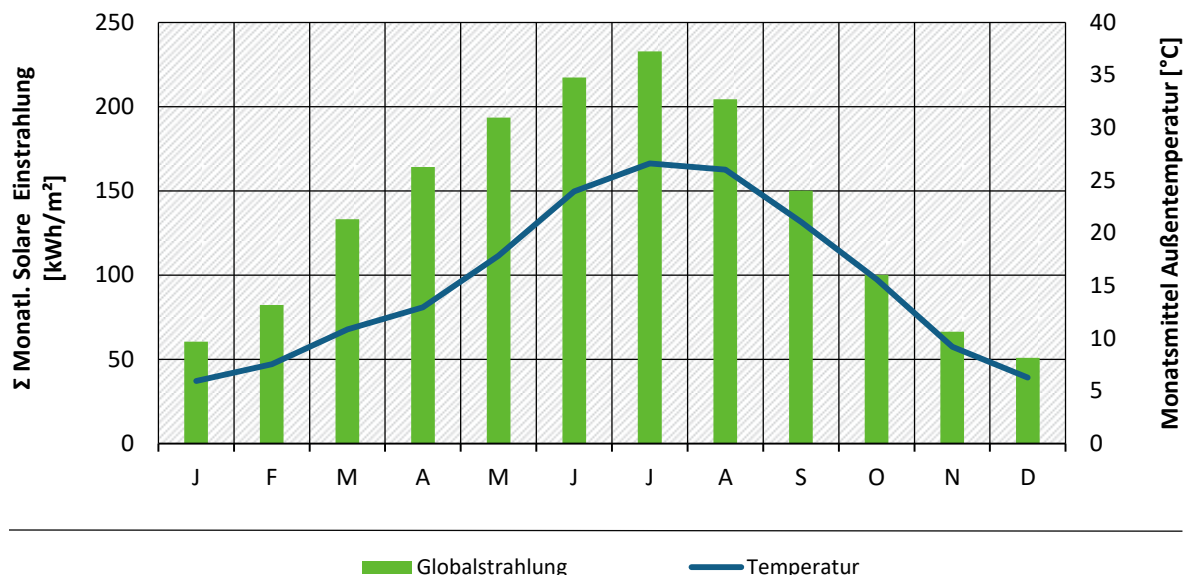
Als Grundlage für die Berechnungen wurden die Referenzklimadaten für den Standort Madrid verwendet³². Der Jahresmittelwert der Außentemperatur beträgt demnach 15 °C. Die Monatsmittelwerte der Außentemperatur liegen dabei im Bereich von ca. 12 °C (Dezember, Januar) bis 26 °C (Juli, August). Die sommerlichen Spitzenwerte reichen deutlich über 35 °C.

Abbildung 32: Monatswerte der Außentemperatur Madrid



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Abbildung 33: Monatswerte der Globalstrahlung und Außentemperatur Madrid



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

³² Quelle: Meteonorm Software, Version 7, aktuellster Wetterdatensatz (Periode 2000-2009)

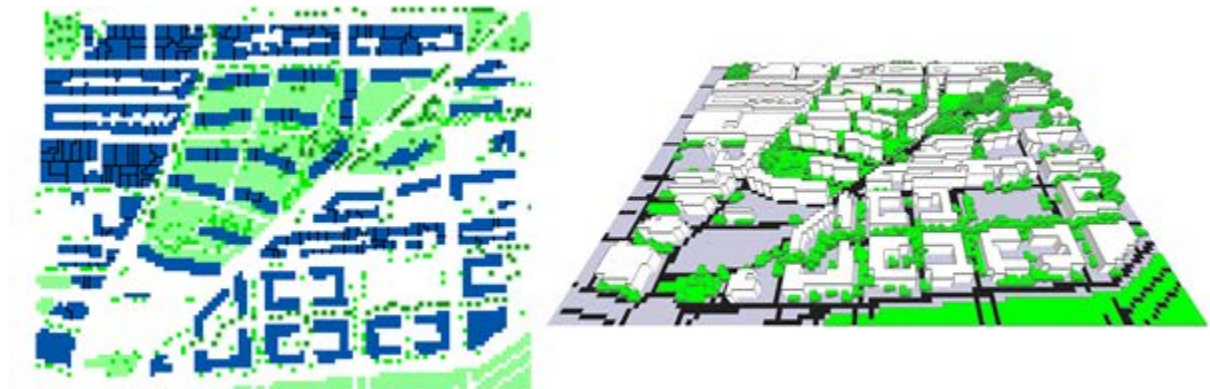
2.2.4.3 Mikroklimasimulation

2.2.4.3.1 Variante Ist-Zustand

Das Neubaugebiet Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles in Madrid wurde im Mikroklimamodell ENVI_MET anhand des bestehenden Bebauungsplans digitalisiert (im Folgenden Status Quo genannt).

Die Qualitäten der Gebäudematerialien entsprechen der in Abschnitt 2.2.4.4 beschriebenen. Der Versiegelungsgrad und die Begrünung des Modells im Ist-Zustand entspricht in etwa der Planung bzw. der tatsächlichen Begrünung (Abbildung 34).

Abbildung 34: Modell des Ist-Zustandes des Neubaugebiet Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles in Madrid als Aufsicht und 3D-Ansicht



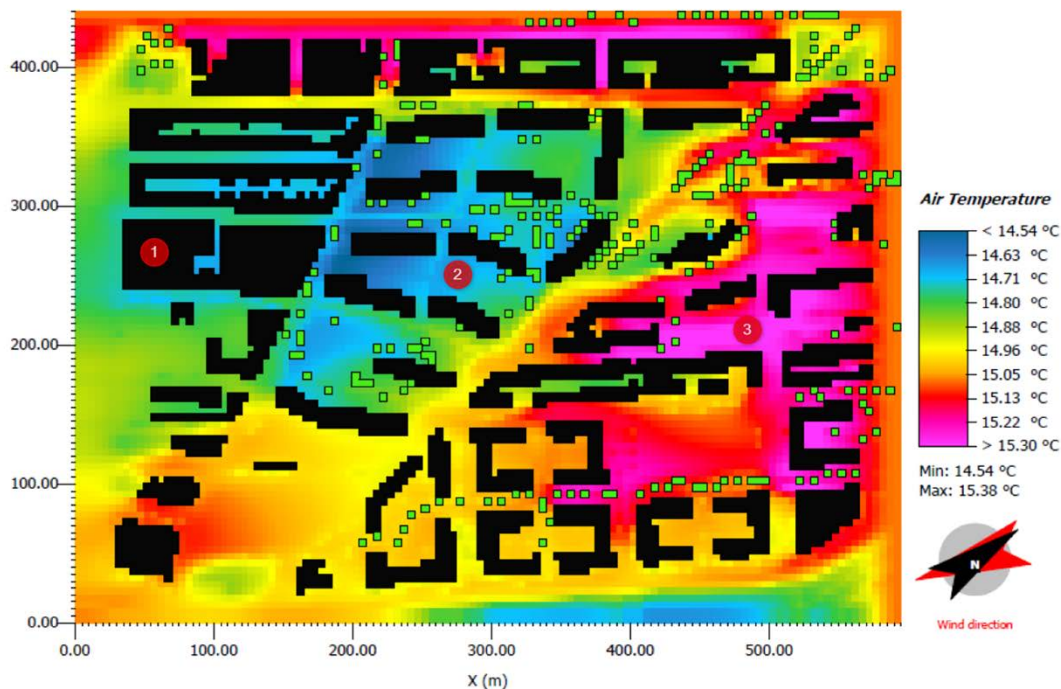
Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.4.3.2 Ergebnisse Mikroklimasimulationen Ist-Zustand

Tafel_2_a_Madrid_SQ im Anhang A.3 zeigt die Verteilung der Lufttemperaturen im Ist-Zustand über die verschiedenen Jahreszeiten. Hierbei lassen sich deutliche Unterschiede zwischen drei thermischen Bereichen erkennen, die in Abbildung 35 exemplarisch gekennzeichnet wurden: Die ursprüngliche Blockrandbebauung im Westen des Neubaugebiets (1), das Neubaugebiet selbst (2) sowie die aufgelockerte und mit Grünbereichen durchzogene Bebauung im Osten (3). Die Unterschiede werden insbesondere in der Nacht offensichtlich, in der das Neubaugebiet bis zu 1 K kühler ist als die beiden angrenzenden Gebiete (vgl. zum Beispiel Tafel_2_a_Madrid_SQ - Abb. E). Dieses liegt vor allem an der offenen Bauweise im Neubaugebiet, welche nachts eine Abkühlung der Struktur ermöglicht.

Während der Tagesstunden fallen die Unterschiede weniger deutlich auf, da hier die offene Bebauungsstruktur auch mit vermehrter solarer Einstrahlung einhergeht.

Abbildung 35: Unterschiedliche thermische Bereiche in Madrid (Status Quo) am Beispiel Juli, 04:00 Uhr

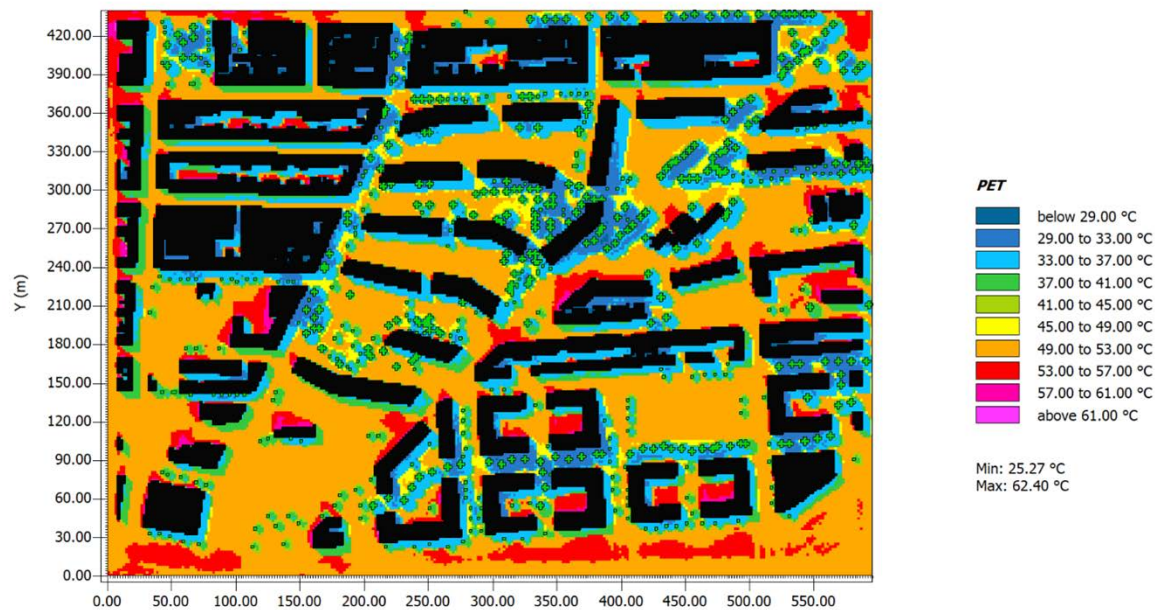


Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Die Detailsimulationen (Anhang A.3, Tafel_2_c_Madrid_Detail) zeigen die Ausgangssituation im Juli mit höherer Auflösung bei südlicher Windrichtung. Da die Bebauungsstruktur aufgrund der fehlenden Barrierewirkung der nördlichen Gebäudeblöcke bei südlichen Winden noch freier durchströmbar ist als bei nördlichen, werden die thermischen Unterschiede zwischen den Bereichen verwischt.

Die Lufttemperatur tagsüber ist hier bestimmt von der lokalen Anordnung von Bebauungs- und Vegetationselementen ohne charakteristische Besonderheiten.

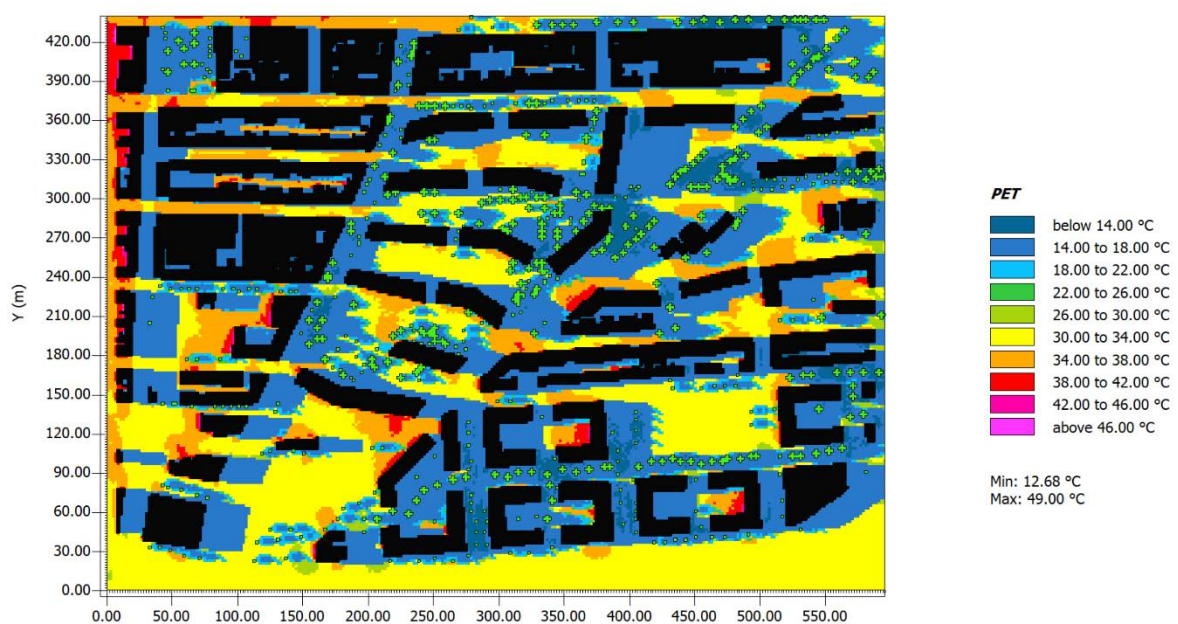
Diese thermische Struktur findet sich auch in der PET-Verteilung für Juli um 16:00 Uhr (Abbildung 36) wieder. Die Verteilung der PET zeigt gefühlte Temperaturen um 50 °C in den sonnenbeschienenen Bereichen, die der „sehr heißen“ Empfindungsstufe zuzuordnen sind. Im Windschatten der Gebäude können PET-Werte bis zu 60 °C beobachtet werden. In den beschatteten Bereichen liegen die PET-Werte um 33 °C, sind also der „warmen“ Klasse zuzuordnen.

Abbildung 36: Verteilung des PET-Wertes in Madrid am 07. Juli um 16:00 Uhr für den Status Quo

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Die PET-Verteilung für 16:00 Uhr im Januar (Abbildung 37) ist aufgrund des niedrigeren Sonnenstandes und den damit verbundenen längeren Schatten deutlich inhomogener als im Juli.

In den beschatteten Bereichen liegt das thermische Empfinden im komfortablen Bereich an der Grenze zum kühlen Bereich. In der Sonne hingegen sind die gut durchlüfteten Bereiche dem warmen Milieu zuzuordnen, können aber in den windarmen Bereichen auch im Januar über 37 °C steigen und somit als heiß empfunden werden.

Abbildung 37: Verteilung des PET-Wertes in Madrid am 21. Januar um 16:00 Uhr für den Status Quo

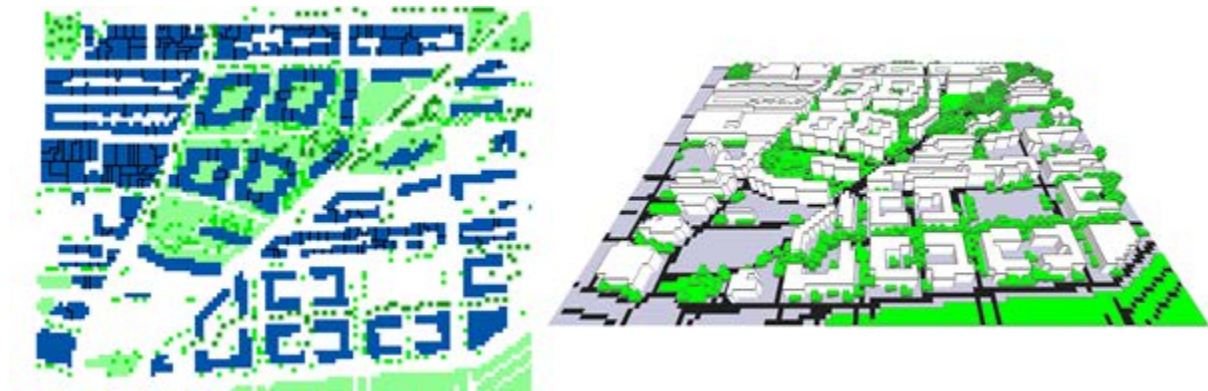
Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.4.3.3 Optimierte Variante

Zur Analyse der mikroklimatischen Bedingungen hinsichtlich des thermalen Komforts im Außenraum wurden nur leichte Veränderungen an dem Gebiet vorgenommen (siehe Abbildung 38).

Da die traditionelle Bauweise in historischen Städten Südeuropas vor allem durch enge Gassen und geschlossene Innenhöfe, die eine optimale Beschattung garantieren, gekennzeichnet ist, soll in dem Neubaugebiet die Auswirkung einer an die traditionelle Bauweise angelehnten Bebauung untersucht werden. Dazu werden einfache Veränderungen durchgeführt und die Innenhöfe durch das Hinzufügen von Gebäudetrakten an den offenen Seiten geschlossen. Hiermit wird die Beschattung innerhalb des Hofes erhöht, die Möglichkeit zur Ventilation jedoch ggf. verringert. Inwiefern dies Einfluss auf den thermalen Komfort in den Innenhöfen hat, ist in den folgenden Analysen festzustellen. Von einer Veränderung der Vegetationsdichte im Modellgebiet und anderen Maßnahmen wurde abgesehen.

Abbildung 38: Modell des optimierten Szenarios des Neubaugebiet Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles in Madrid als Aufsicht und 3D-Ansicht



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.4.3.4 Ergebnisse Mikroklimasimulationen optimierte Variante

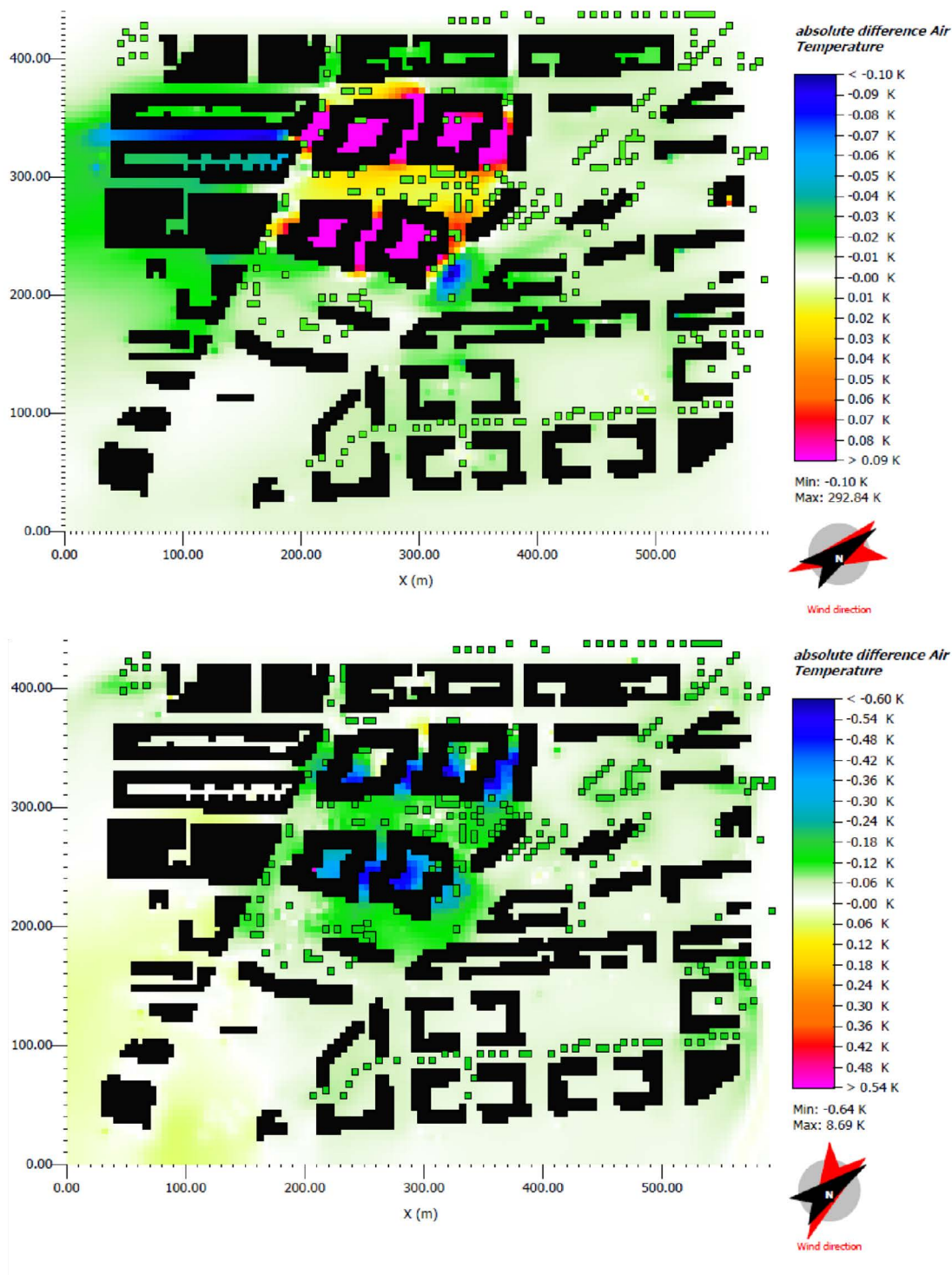
Tafel_2_b_Madrid_OPT im Anhang A.3 vergleicht die Lufttemperaturen über den Jahresverlauf zwischen dem Status Quo und der optimierten Variante.

Aufgrund der minimalen Anpassungen sind die wesentlichen Veränderungen im Bereich der neugeschaffenen Innenhöfe beziehungsweise im Schattenbereich der veränderten Gebäudeblöcke zu erwarten. Diese Annahme bestätigt sich bei der Betrachtung der Tafel_2_b_Madrid_OPT. Allerdings lassen sich auch weiterreichende Effekte beobachten, da durch Veränderung der Bausubstanz die Windströmung verändert wird. Dies wurde beispielhaft für Januar, März und Juli untersucht. Durch die Schließung der Blockränder kommt es zu einer Veränderung der Durchlüftung, die sich auch in etwas größerer Distanz zum Gebäudeblock noch bemerkbar macht.

Durch das seitliche Schließen der Gebäudecluster im Neubaugebiet entkoppeln sich die mikroklimatologischen Bedingungen innerhalb der Gebäudeblöcke etwas von den Umgebungsbedingungen. Dieses zeigt sich vor allem während der Tagesstunden deutlich: hier sind im März die Gebäudeblöcke leicht wärmer, während sie im Juli geringere Lufttemperaturen aufweisen (Vgl. Anhang A.3, Tafel_2_b_Madrid_OPT und Tafel_2_c_Madrid_Detail). Zwar sind die

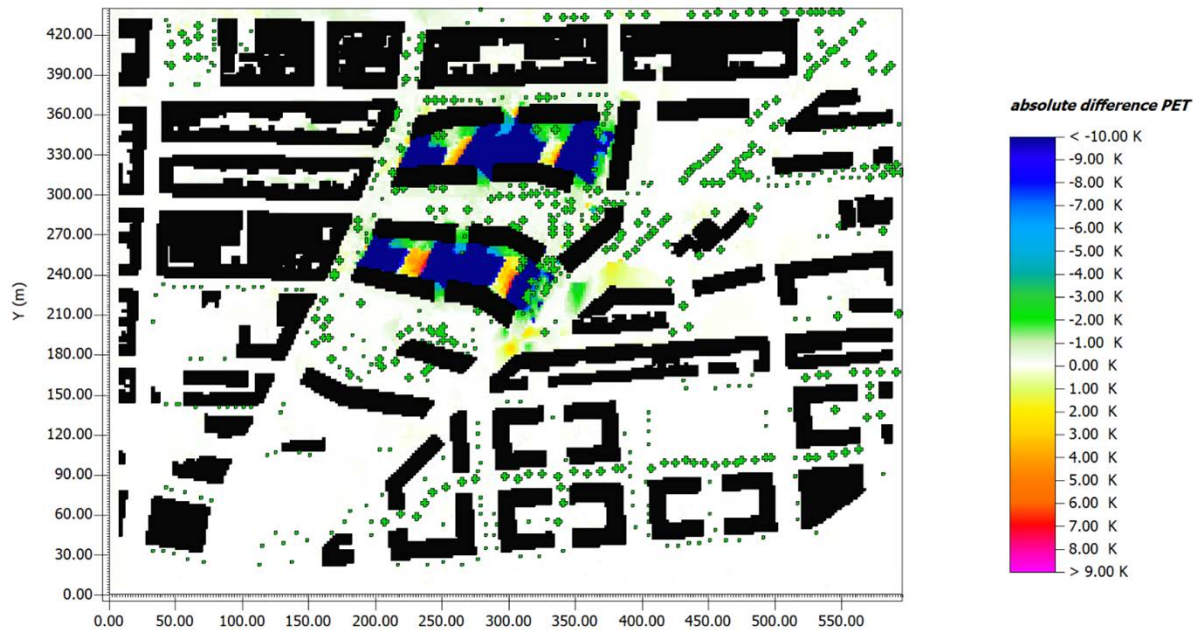
absoluten Unterschiede gering, es muss jedoch die hohe spezifische Wärme der Luft sowie der turbulente Austausch in der Atmosphäre mitberücksichtigt werden. Somit können auch geringe Unterschiede in der Lufttemperatur Hinweise auf signifikante Veränderungen bei den Energieflüssen liefern.

Abbildung 39: Thermisches Verhalten der Gebäudeblöcke in Madrid im März (oben) und Juli (unten) jeweils um 04:00 Uhr



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Abbildung 40: Veränderung des PET-Wertes in Madrid am 07. Juli um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen

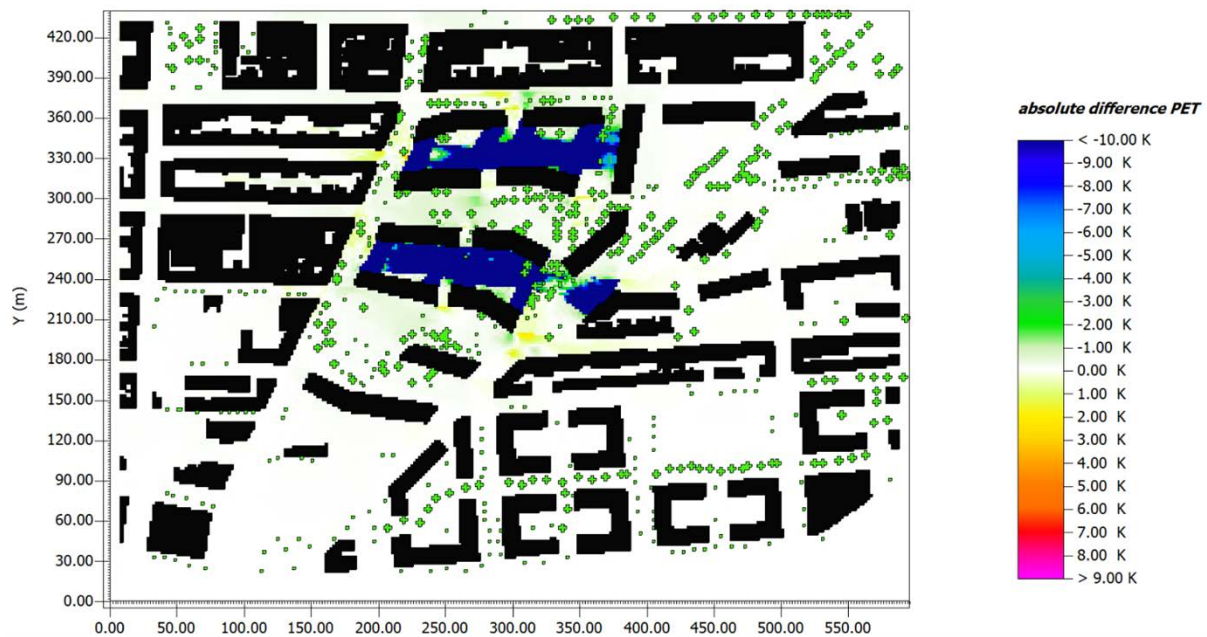


Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Abbildung 40 zeigt die Veränderung der PET-Werte im Juli im Vergleich zum Status Quo. Da beim thermischen Empfinden vor allen die Strahlungsflüsse dominieren, beschränken sich die Veränderungen auf den Bereich der umgestalteten Gebäudeblöcke. In den Innenhöfen lässt sich eine deutliche Einteilung erkennen: Auf der beschatteten Seite des Innenhofes ist die PET merklich niedriger als im Referenzfall, aber auf der Seite, auf die weiterhin direkte Sonnenstrahlung eintreffen kann, sind die Werte teilweise höher als in der Ausgangssituation. Dieser Effekt ist auf die reduzierte Windgeschwindigkeit in den nun geschlossenen Innenhöfen zurückzuführen, die in den besonnten Bereichen zu einer erhöhten Wärmebelastung führen.

Die Veränderung der PET-Verteilung im Januar (Abbildung 41) ähnelt den Ergebnissen vom Juli. Durch den niedrigeren Sonnenstand sind nun die Innenhöfe fast komplett verschattet und somit wie die anderen beschatteten Zonen auch dem komfortablen thermischen Bereich zuzuordnen.

Abbildung 41: Veränderung des PET-Wertes in Madrid am 21. Januar um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.4.3.5 Zusammenfassende Beurteilung

Der Vergleich der Lufttemperatur sowie der PET zeigt am Beispiel des Neubaugebiets Ecobarrio San Francisco Javier y Nuestra Sra. de los Ángeles in Madrid eine Verbesserung des thermalen Komforts bei Anpassung der Neubaugebiete an die in diesen Gegenden traditionelle Bauweise einer geschlossenen Blockbebauung.

Zu einem gewissen Grad führt dieser Eingriff zu einer Abkopplung vom Mikroklima der Umgebung, indem durch Beschattung, veränderte Belüftung und die Nutzung der Gebäudemasse als Speicher ein eigenes, lokales Mikroklima erzeugt werden kann. Dieser Effekt kann im Winter und in den Übergangsphasen des Jahres genutzt werden, um lokal ein leicht wärmeres Mikroklima im Außenbereich zu erzeugen, während es im Sommer für eine Reduzierung der Wärmebelastung genutzt werden kann, sofern windstille und gleichzeitig besonnte Zonen vermieden werden.

2.2.4.4 Gebäudesimulation

2.2.4.4.1 Das Simulationsmodell

Das Auswertungsgebiet besteht aus sieben- bis zehngeschossigen Gebäuden, die für die Modellierung hinsichtlich Bauphysik vereinfacht als gleich angenommen wurden. Die Auswertungen bezüglich des Verbrauchs und Komforts wurden auf Wohnungsebene durchgeführt. Je nach Lage und Orientierung der Wohnungen im Gebäude und Gebiet ergeben sich Unterschiede beim Energiebedarf und Innenraumkomfort.

Hinsichtlich der Geometrie der Wohnungen wurde ein repräsentativer Grundriss mit 100 m² Wohnfläche berücksichtigt, der für die Modellierung in zwei Zonen (Wohn- und Esszimmer sowie Schlaf- und Kinderzimmer) unterteilt wurde.

Die Wohn- und Esszimmer wurden dabei soweit möglich immer südlich orientiert. Die Lage der berücksichtigten 39 Referenzwohnungen im Ausgangszustand (Status Quo) ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.

Abbildung 42: Lage der Referenzwohnungen im Quartier im Ausgangszustand (Status Quo)



Für jede der 13 dargestellten Orte wurde jeweils eine Wohnung im Dach-, Mittel- und Erdgeschoss berücksichtigt.

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse und ENVI_MET

Im Rahmen der Quartiersoptimierung wurden die bestehenden Baukörper zu Blöcken mit Innenhöfen geschlossen (vgl. Kapitel Mikroklimasimulationen). Um auch die Verhältnisse in den Wohnungen der sich dadurch ergebenden zusätzlichen Baublöcke beurteilen zu können wurden für das optimierte Quartier sechs zusätzliche Wohnungen berücksichtigt (Siehe folgende Abbildung 43).

Abbildung 43: Lage der Referenzwohnungen im Quartier im optimierten Quartier



Für jede der 15 dargestellten Orte wurde jeweils eine Wohnung im Dach-, Mittel- und Erdgeschoss berücksichtigt.

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse und ENVI_MET

Insgesamt verfügt das Quartier im Ausgangszustand über 348 Wohnungen.

Die Qualitäten der Gebäudehülle wurden entsprechend des lokalen Mindeststandards angenommen. Demnach wurden die folgenden U-Werte berücksichtigt:

- Fassaden: $0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Flachdach: $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Fenster: $3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($g=0,7$)
- Boden zu unbeheiztem Keller: $U=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$

Abweichend zur Realisierung wurde für die Beheizung im Ausgangszustand keine klimaneutrale Fernwärme, sondern wohnungszentrale reversible Multisplit-Klimaanlagen mit fluorierten Kältemitteln berücksichtigt. Über diese Anlagen kann im Sommer auch gekühlt werden. Die Warmwasserbereitung erfolgt über wohnungszentrale Elektrodurchlauferhitzer, die Lüftung über Entlüftungsanlagen in den Bädern. Diese sowie weitere Kennwerte sind der folgenden Tabelle im Kapitel Varianten zu entnehmen.

2.2.4.4.2 Varianten

Die berücksichtigten Varianten sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Der Ausgangszustand wird durch die Variante Status Quo 1 (SQ1) abgebildet. Im Rahmen der Variante SQ2 wurde die Quartiersoptimierung (u. a. geschlossenen Bebauung) berücksichtigt, die Gebäudequalitäten blieben dabei unverändert. Bei den folgenden Varianten wurde aufbauend auf der Variante SQ2 zunächst die Hüllqualität und die Klimatisierung verbessert (Variante Opt1). Bei der Variante Opt2 wurde zusätzlich ein wirksamer Sonnenschutz angenommen. Bei der letzten Variante (Opt3) wurde schließlich eine maximale Belegung der freien Dächer mit PV (Annahme zur möglichen Belegungsdichte: 50 %) und zur Erhöhung des Stromeigennutzungsanteils entsprechende Batteriespeicher berücksichtigt.

Die Spezifika der berücksichtigten Varianten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 16: Übersicht der untersuchten Varianten für das Quartier in Madrid

	SQ1	SQ2	Opt1	Opt2	Opt3
Mikroklima	Ist-Zustand (offene Bebauungsstruktur)	Optimiert (geschlossene Bebauungsstruktur)	Siehe SQ2	Siehe SQ2	Siehe SQ2
Wärmeschutz	Neubau-standard: Fassaden: U= 0,46 W/m²K Flachdach: U=0,4 W/m²K Fenster: U=3,0 W/m²K, g= 0,7 Boden zu unbeheiztem Keller: U=0,7 W/m²K	Siehe SQ1	Verbessert: Fassaden: U: 0,23 W/m²K Flachdach: U=0,2 W/m²K Fenster: U=1,5 W/m²K, g= 0,64 Boden zu unbeheiztem Keller: U=0,35 W/m²K	Siehe Opt1	Siehe Opt1
Beheizung	Reversible Splitklimageräte mit durchschnittlicher Effizienz	Siehe SQ1	Reversible Splitklimageräte mit hoher Effizienz und natürlichem Kältemittel Propan	Siehe Op1	Siehe Opt1
Warmwasser-	Elektr. Durchlauferhit-zer	Siehe SQ1	Siehe SQ1	Siehe SQ1	Siehe SQ1
Kühlung	Siehe Beheizung	Siehe SQ1	Siehe Beheizung	Siehe Opt1	Siehe Opt1
Belüftung	Abluftanlage, Luftwechsel 0,4 1/h, zusätzliche Lüftung zur Kühlung im Sommer ³³	Siehe SQ1	Siehe SQ1	Siehe SQ1	Siehe SQ1
Sonnenschutz	Fixe Elemente (fc=0,5)	Siehe SQ1	Siehe SQ1	automatisch betriebener wirksamer Sonnenschutz ³⁴	Siehe Opt2

³³ Sommerliche (Stoß-)Lüftung bei Raumtemperaturen über 24 °C und kühlerer Außentemperatur sowie Anwesenheit der Bewohner: morgens von 7-8 Uhr bei einem Luftwechsel von 6 1/h; nachmittags/ abends von 16-22 Uhr mit einem Luftwechsel von 4 1/h; Nachtlüftung über gekipptes Fenster im Schlafzimmer von 22-6 Uhr einem Luftwechsel von 0,4 1/h

³⁴ Annahme mittlerer Fc-Wert von 0,2

	SQ1	SQ2	Opt1	Opt2	Opt3
Erneuerbare	-	-	-	-	Dächer zu 50 % belegt mit PV-Modulen (10 % Neigung): rechnerisch pro Wohnung 1 kWp ³⁵ + 2 kWh Batterie-speicher ³⁶

2.2.4.4.3 Ergebnisse

2.2.4.4.3.1 Status Quo

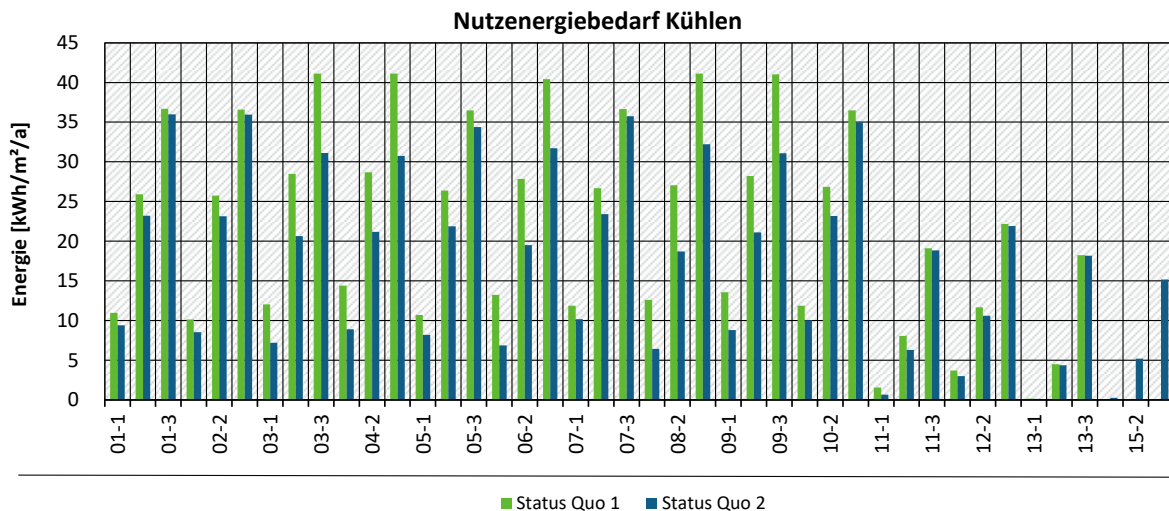
Wie auf den folgenden zwei Abbildungen zu erkennen ist, überwiegt der Nutzenergiebedarf für Kühlen denjenigen fürs Heizen bei den meisten Wohnungen deutlich. Die höchsten Kühlenergiebedarfe mit teilweise über 40 kWh/m²a werden bei den Dachgeschosswohnungen (Wohnungen mit der Endkennziffer -3) beobachtet. Die höchsten Heizenergiebedarfe mit bis zu 27 kWh/m²a treten hingegen bei den Erdgeschosswohnungen (Wohnungen mit der Endkennziffer -1) auf. Bei den Erdgeschosswohnungen ist aufgrund der höheren Beschattung und der Kühlung durch den Boden Kühl- und Heizenergiebedarf in etwa gleich hoch.

Die verbesserte Beschattung im optimierten Quartier führt insgesamt zu einer deutlichen Reduzierung des Kühlenergiebedarfs. In zahlreichen Wohnungen sinkt der Kühlenergiebedarf um fast 10 kWh/m²a. Der Effekt der Quartiersmaßnahmen auf den Heizenergiebedarf ist indifferent. Auch hier gibt es Gebäude (z. B. Gebäude 3 und 4) in denen der Heizenergiebedarf deutlich sinkt. Dies ist hierbei jedoch vor allem auf die wegfallende Außenwand aufgrund der Schließung der Bebauung zurückzuführen.

³⁵ Unter Berücksichtigung einer achtgeschossigen Bauweise ergibt sich pro Wohnung 15 m² (=120 m²/8) Dachfläche; Für das Untersuchungsgebiet mit 348 Wohnungen ergibt sich somit eine installierte Gesamtleistung von 348 kWp

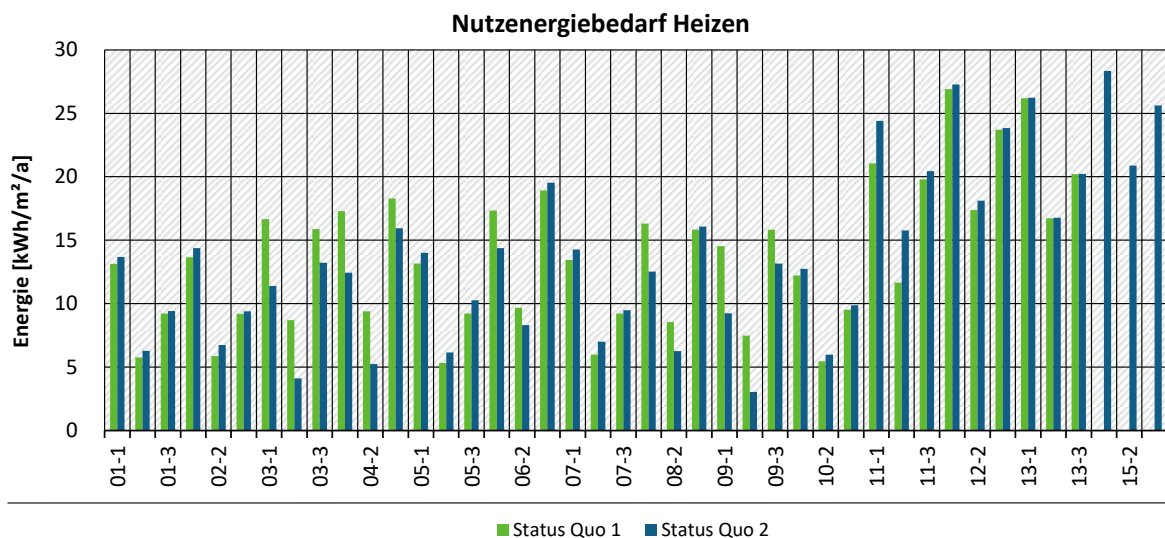
³⁶ Als gebäudezentrale Batteriespeicher. Anmerkung: Es wurde nicht geprüft, ob diese technisch sinnvolle Lösung auch unter den aktuellen lokalen Gegebenheiten praktikabel ist.

Abbildung 44: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Kühlung der Referenzwohnungen der Varianten SQ1 (Ausgangszustand) und SQ2 (optimiertes Quartier)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Abbildung 45: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Heizung der Referenzwohnungen der Varianten SQ1 (Ausgangszustand) und SQ2 (Optimiertes Quartier)

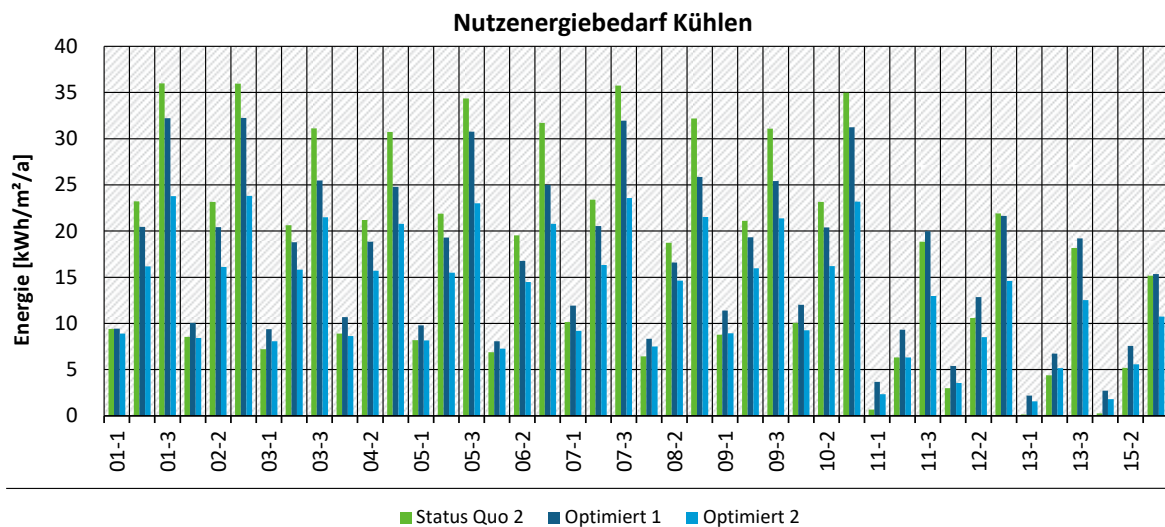


Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

2.2.4.4.3.2 Optimiertes Szenario

Durch die Verbesserungen der Gebäudehülle kann der Nutzenergiebedarf für Heizung bei den meisten Wohnungen auf ca. ein Drittel reduziert werden. Gemäß der folgenden Abbildung 46 ist der Effekt auf den Kühlenergiebedarf im Verhältnis zum Heizenergiebedarf geringer und in den Dachgeschosswohnungen am deutlichsten. Größer ist der Effekt der zusätzlichen Verbesserung des Sonnenschutzes auf den Kühlenergiebedarf. Insgesamt lässt sich durch die beiden betrachteten Maßnahmen der Kühlenergiebedarf in den Wohnungen im Dach- und den Mittelgeschossen um ca. ein Drittel reduzieren. Bei der berücksichtigten guten automatischen Regelung ist der Einfluss des Sonnenschutzes auf den Heizenergiebedarf vernachlässigbar.

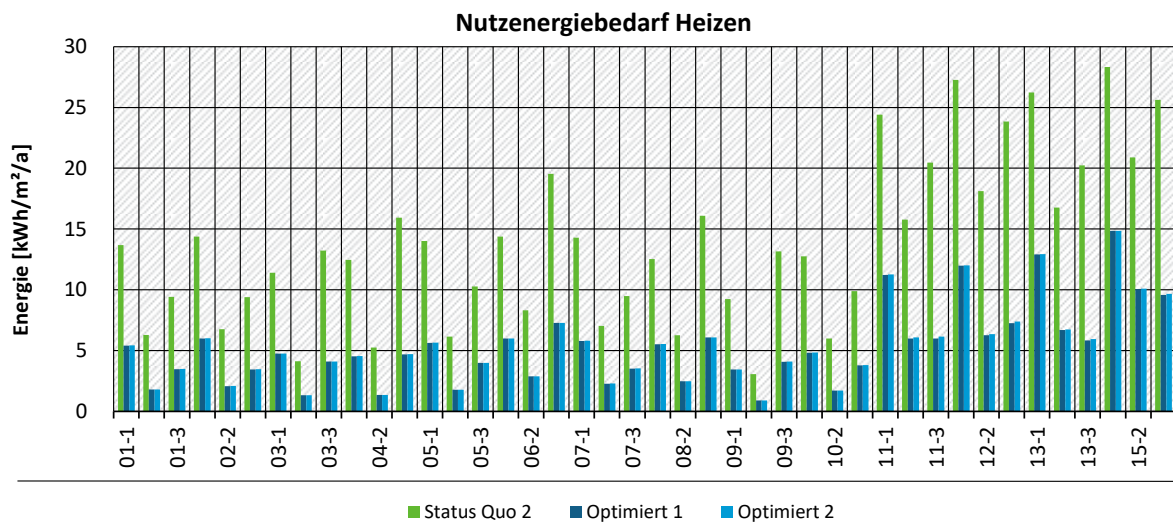
Abbildung 46: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Kühlung der Referenzwohnungen der Varianten Satus Quo 2, Optimiert 1 und Optimiert 2



Dabei handelt es sich bei Variante SQ2 um die geschlossene Gebäudestruktur mit ansonsten unveränderten Gebäudeeigenschaften. Bei Opt1 wurde zusätzlich die Hüllqualität, bei Opt2 der Sonnenschutz verbessert.

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Abbildung 47: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Heizung der Referenzwohnungen der Varianten Status Quo 2, Optimiert 1 und Optimiert 2

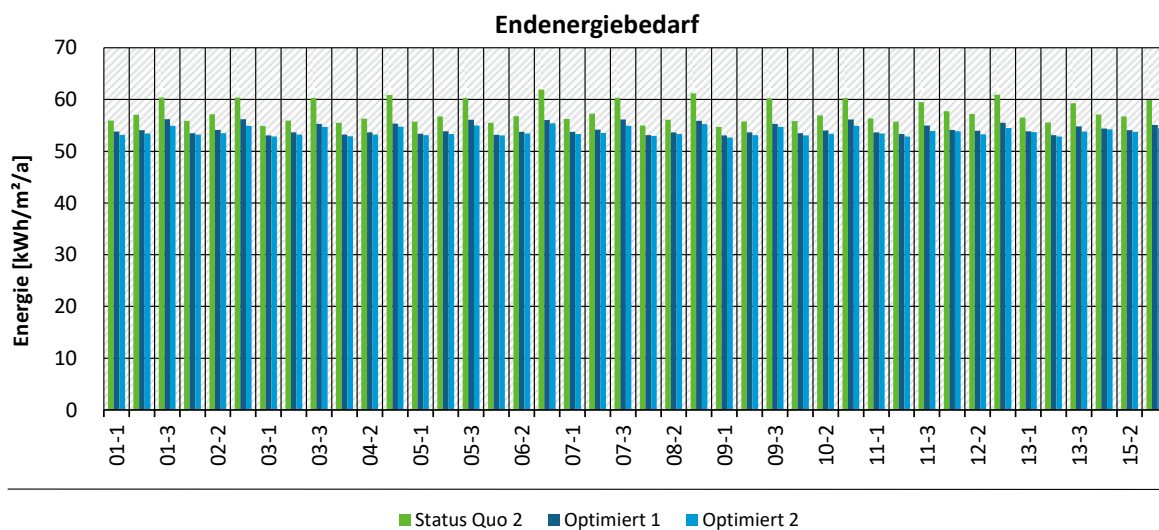


Variante SQ2: geschlossene Gebäudestruktur mit ansonsten unveränderten Gebäudeeigenschaften; Opt1: zusätzlich verbesserte Hüllqualität; Opt2: zusätzlich Sonnenschutz verbessert.

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Betrachtet man den Endenergiebedarf der untersuchten Varianten in der folgenden Abbildung erkennt man zunächst, dass die relativen Unterschiede gering erscheinen.

Abbildung 48: Vergleich des Endenergiebedarfs der Referenzwohnungen der Varianten Status Quo 2, Optimiert 1 und Optimiert 2

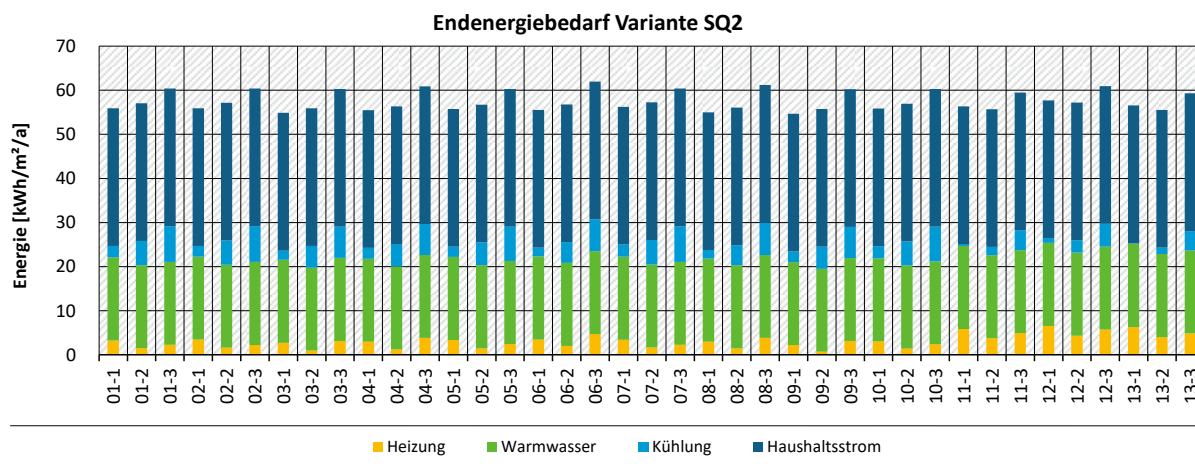


Variante SQ2: geschlossene Gebäudestruktur mit ansonsten unveränderten Gebäudeeigenschaften; Opt1: zusätzlich verbesserte Hüllqualität; Opt2: zusätzlich Sonnenschutz verbessert.

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Haushaltsstrombedarf³⁷ und der Strombedarf für die Warmwasserbereitung im Verhältnis hoch sind.

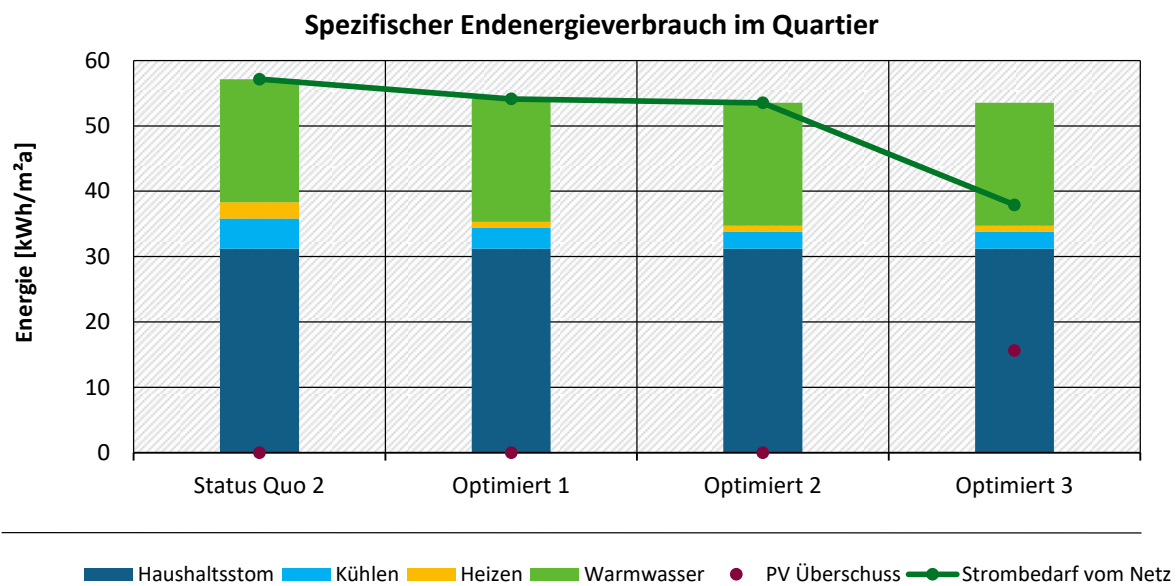
Abbildung 49: Aufteilung des Endenergiebedarfs am Beispiel der Variante Status Quo 2



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Dies spiegelt sich auch in der folgenden Darstellung des Endenergiebedarfs dieser Varianten wider. Lediglich durch die PV-Anlagen auf den Dächern kann der Strombedarf (Endenergie) des Quartiers erneut deutlich (um ca. 30 % in Vergleich zwischen den Varianten Optimiert 2 und Optimiert 3) gesenkt werden.

³⁷ Für den Haushaltsstrombedarf der Wohnungen wurde von 3100 kWh/a ($\Rightarrow 31 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) ausgegangen

Abbildung 50: Vergleich des Endenergiebedarfs³⁸ der Quartiersvarianten

Varianten Status Quo 2 (Optimiertes Quartier, Gebäude unverändert), Optimiert 1 (zus. verbesserte Hüllqualität), Optimiert 2 (zus. verbesserter Sonnenschutz) und Optimiert 3 (zus. PV und Batterie).

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Eine klimaneutrale Versorgung aus allein durch erneuerbare Energien am Standort wird nicht erreicht. Dies ist vor allem begründet in dem ungünstigen Verhältnis zwischen Dach und Wohnungsfläche, was durch die Gebäudehöhe (acht Geschosse) bedingt ist. Für eine klimaneutrale Versorgung ist zusätzlicher Strom aus erneuerbaren Quellen, z. B. aus regionalen PV-Kraftwerken, notwendig.

2.2.4.4.3.3 Zusammenfassende Beurteilung

Durch die verbesserte Beschattung der geschlossenen Bebauung im optimierten Quartier wird der Energiebedarf im Quartier signifikant reduziert. Dies ist vor allem auf die Reduktion des maßgeblichen Kühlenergiebedarfs zurückzuführen, der in vielen Wohnungen um über 20 % gesenkt werden kann. Durch die zusätzliche Verbesserung der Hüllqualitäten und des Sonnenschutzes (vgl. Varianten Optimiert 1 und Optimiert 2) kann der Kühlenergiebedarf in den Mittel- und Dachgeschosswohnungen darüber hinaus um ca. ein weiteres Drittel reduziert werden. Der Gesamtenergiebedarf wird jedoch vom Haushaltsstrombedarf und dem Bedarf für die Warmwasserbereitung dominiert. Durch die Vorsehung von PV Anlagen auf den Dächern und Batteriespeichern kann der Gesamtstrombedarf um ca. 30 % gesenkt werden. Aufgrund der achtgeschossigen Gebäude ist es jedoch nicht möglich eine ausgeglichene Jahresbilanz zwischen Strombedarf- und -Verbrauch zu erreichen.

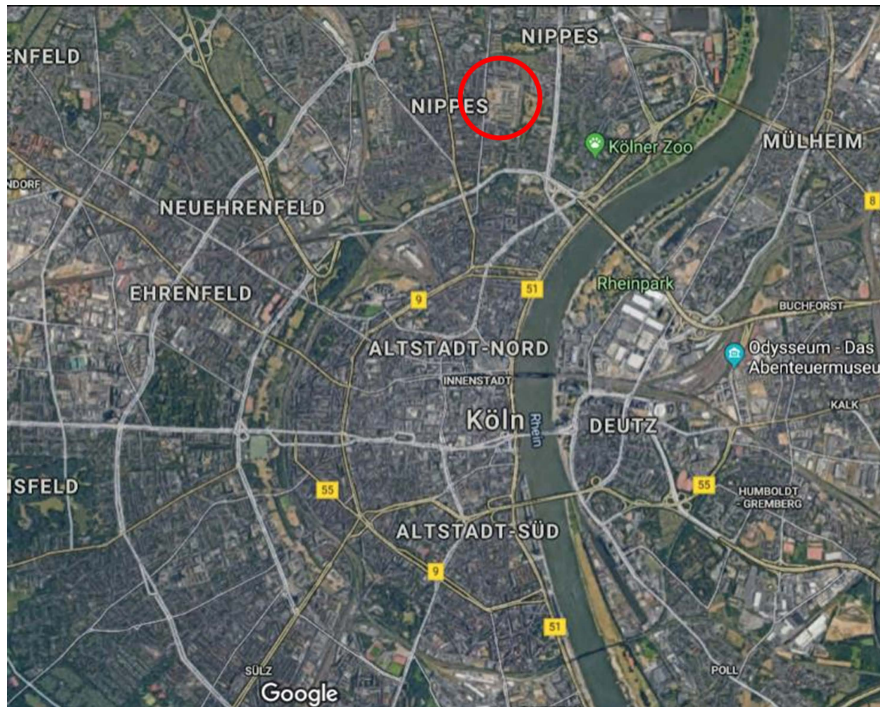
³⁸ Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit wurden nur die Wohnungen des Ausgangszustand (SQ1 und SQ2) herangezogen. Der Energiebedarf der zusätzlichen Wohnungen im optimierten Quartier wurde nicht berücksichtigt.

2.2.5 Neubauquartier Köln-Clouth

2.2.5.1 Lage und Beschreibung

Das Clouth-Quartier liegt am nördlichen Rand der Kölner Innenstadt.

Abbildung 51: Lage des Clouth-Quartiers in Köln (siehe roter Kreis)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse basierend auf Google (Hintergrund)

Die Projektentwicklungsgesellschaft der Stadt Köln – Moderne Stadt – entwickelte das neue Stadtquartier für 3.000 Einwohner.

Das Gelände umfasst 14,5 Hektar. Die Namensgebung beruht auf der ehemaligen Gummiwarenfabrik „Clouth Werke“. Nach den Abbruch- und Erschließungsarbeiten wurde Mitte 2014 mit den ersten Hochbauten (überwiegend viergeschossige Mehrfamilienhäuser) begonnen, aktuell (2020) ist der überwiegende Teil der Gebäude realisiert.

Die Gebäude im Clouth-Quartier werden mit klimaneutraler³⁹ Fernwärme beheizt.

³⁹ klimaneutral gem. Berechnungsmethode vor Einführung des GEG (Bundesgesetzblatt 2020). Im GEG ist eine Überprüfung und ggf. Anpassung der Berechnungsmethode vorgesehen. Bei einer Umstellung auf das sog. Carnot-Berechnungsverfahren wären die CO₂-Emissionen nicht mehr null.

Abbildung 52: Lageplan Clouth-Quartier



Modellgebiet (orange umrandet) und Auswertungsgebiet (blau umrandet); Grundlagen-Quelle: Moderne Stadt – Köln

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse basierend auf Google (Hintergrund)

Abbildung 53: Straßenansicht im Clouth-Quartier



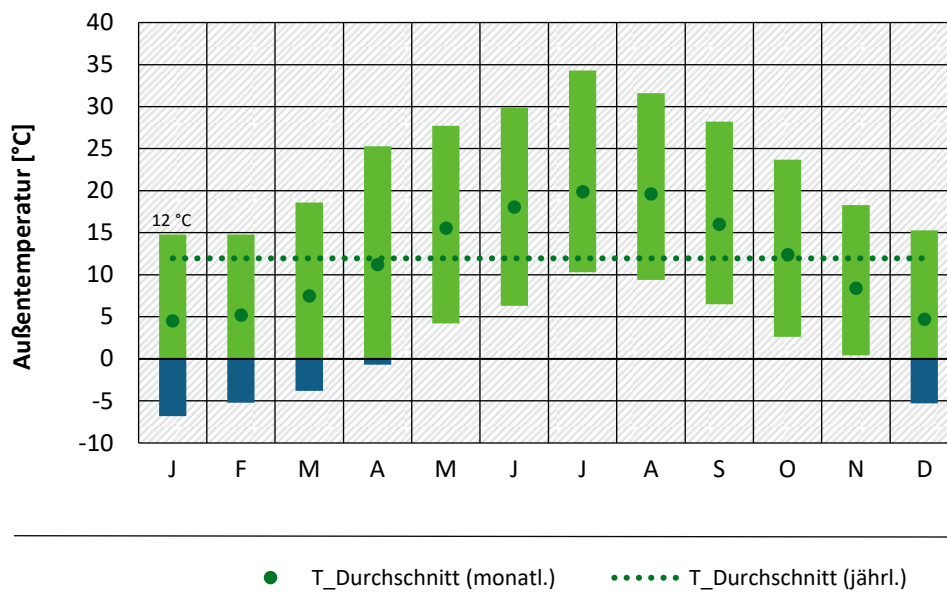
Quelle: Google

Für die Modellierung wurde das Quartier angepasst und das Szenario Status Quo einer geschlossene Blockrandbebauung angenommen. Die Grünflächen wurden nahezu vollständig eliminiert (siehe Kapitel 2.2.5.3.1 Mikroklima-Modell Status Quo).

2.2.5.2 Klima

Als Grundlage für die Berechnungen wurden die Referenzklimadaten für den Standort Köln⁴⁰ verwendet. Der Jahresmittelwert der Außentemperatur beträgt demnach 12 °C. Die Monatsmittelwerte der Außentemperatur liegen im Bereich von ca. 4 °C (Januar) bis 20 °C (Juli). Die sommerlichen Spitzenwerte erreichen knapp 35 °C.

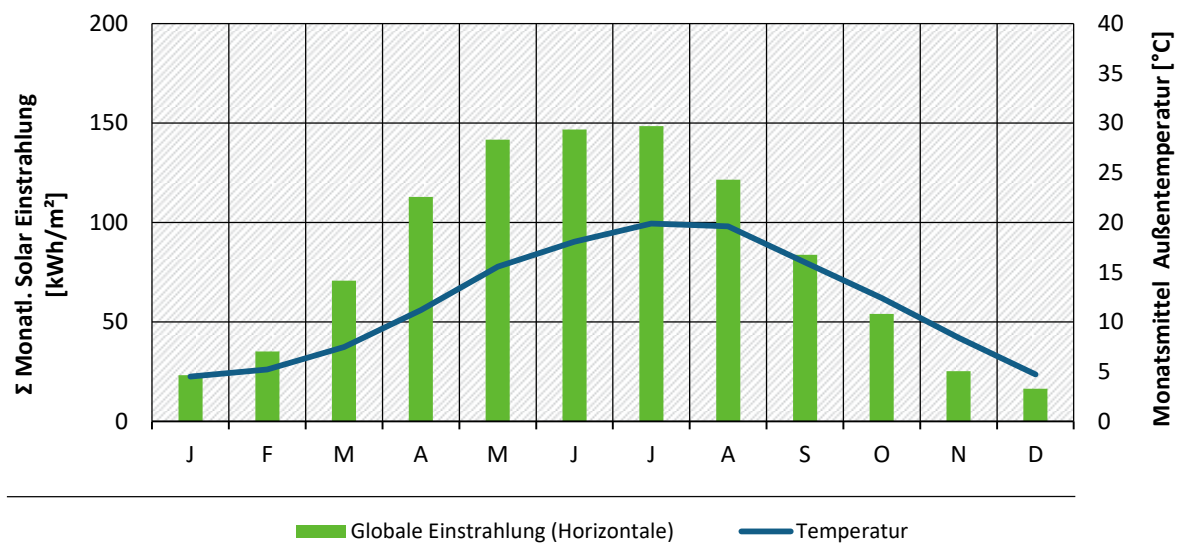
Abbildung 54: Monatswerte der Außentemperatur Köln



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Die jährliche Globalstrahlungssumme beträgt 980 kWh/m²a. Sie ist im Juli mit ca. 150 kWh/m² am höchsten und im Dezember mit ca. 20 kWh/m² am geringsten.

⁴⁰ Quelle: Meteonorm Software, Version 7, aktuellster Wetterdatensatz (Periode 2000-2009)

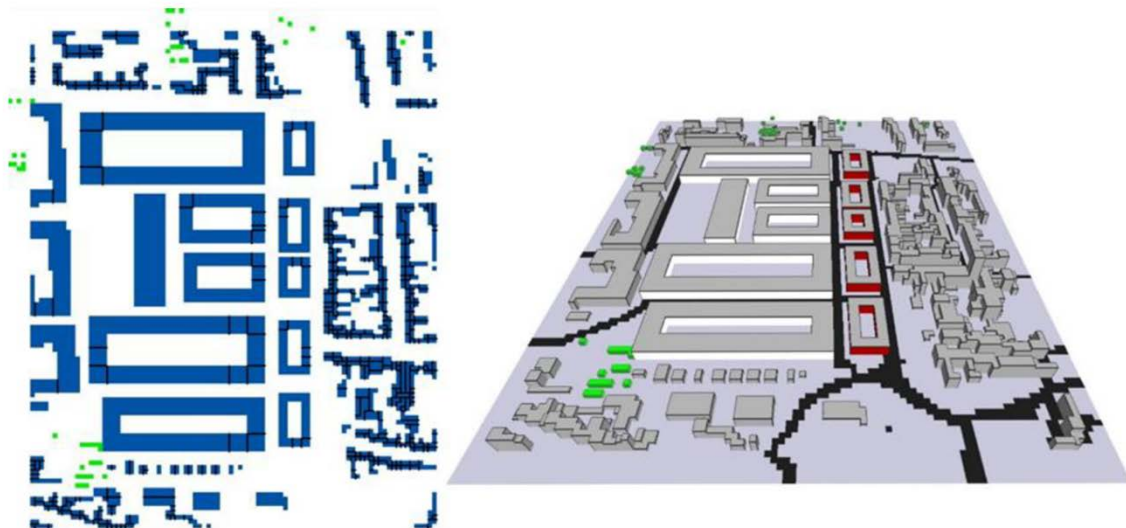
Abbildung 55: Monatswerte der Globalstrahlung und Außentemperatur Köln

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

2.2.5.3 Mikroklimasimulation

2.2.5.3.1 Variante Ist-Zustand

Das Clouth-Quartier in Köln wurde im Mikroklimamodell ENVI_MET mit geringfügigen Veränderungen der existierenden Bebauungsstruktur digitalisiert. So wurde der Park, der sich eigentlich im Osten des Gebietes befindet, durch eine für die Gegend typische Häusersiedlung ersetzt, um eine aktuelle Nachverdichtung zu berücksichtigen und das untersuchte Gebiet zudem universeller vergleichbar zu machen. Die einzelnen Gebäude wurden zu einem Gebäudeblock mit Innenhof verbunden.

Abbildung 56: Modellgebiet Köln (Status Quo) als Aufsicht und 3D-Ansicht

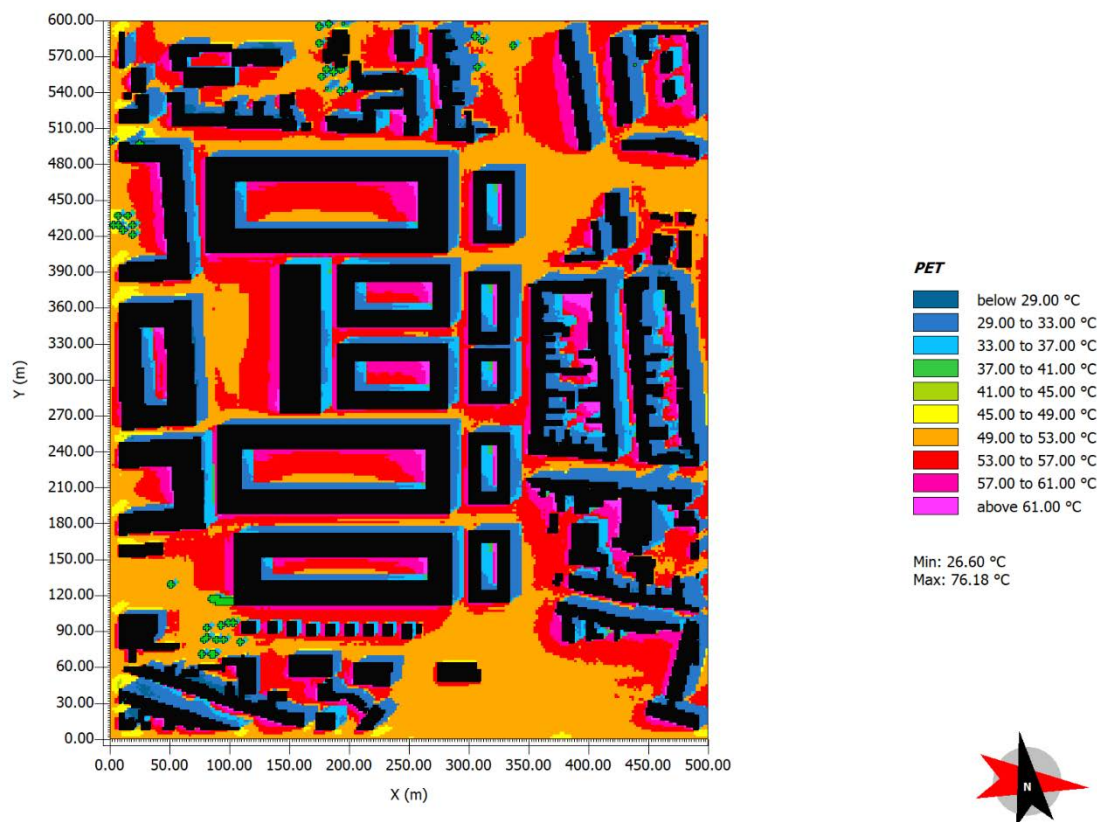
Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.5.3.2 Ergebnisse Mikroklimasimulationen Ist-Zustand

Wie bereits eingangs erwähnt, wird aufgrund der großen Veränderungen in der Bebauungsstruktur vom bisherigen Schema der Abbildungstafeln abgewichen. Für das Untersuchungsgebiet Köln werden im Anhang A.3 in Tafel_3_a_Koeln_04h die Simulationsergebnisse für 04:00 Uhr jeweils für den Status Quo und den optimierten Fall gegenübergestellt, während in Tafel_3_b_Koeln_16h die Ergebnisse für die 16:00-Uhr-Situationen dargestellt werden. Analog wird bei den Detailsimulationen (Tafel_3_c_Koeln_Detail) vorgegangen. Direkte Differenzenabbildungen haben im vorliegenden Fall aufgrund des Eingriffs in die Bebauungsstruktur keinen Sinn.

Die Verteilung der Lufttemperaturen im Status Quo-Fall zeigt eine verhältnismäßig gleichmäßige Struktur über das Gebiet mit Temperaturunterschieden von selten mehr als 1 K zwischen den wärmsten und den kältesten Bereichen. Die Gebäudeblöcke weisen in den Innenhöfen sowohl um 16:00 Uhr als auch um 04:00 Uhr nur eine schwache Differenzierung auf, was darauf zurückzuführen ist, dass sie zwar baulich geschlossen sind, aber mit 12 m nur eine geringe Gebäudehöhe aufweisen. Hierdurch kann der Wind gut in die Struktur eingreifen und lokale Temperaturunterschiede verwischen.

Abbildung 57: Verteilung des PET-Wertes in Köln am 25. Juli um 16:00 Uhr für den Status Quo



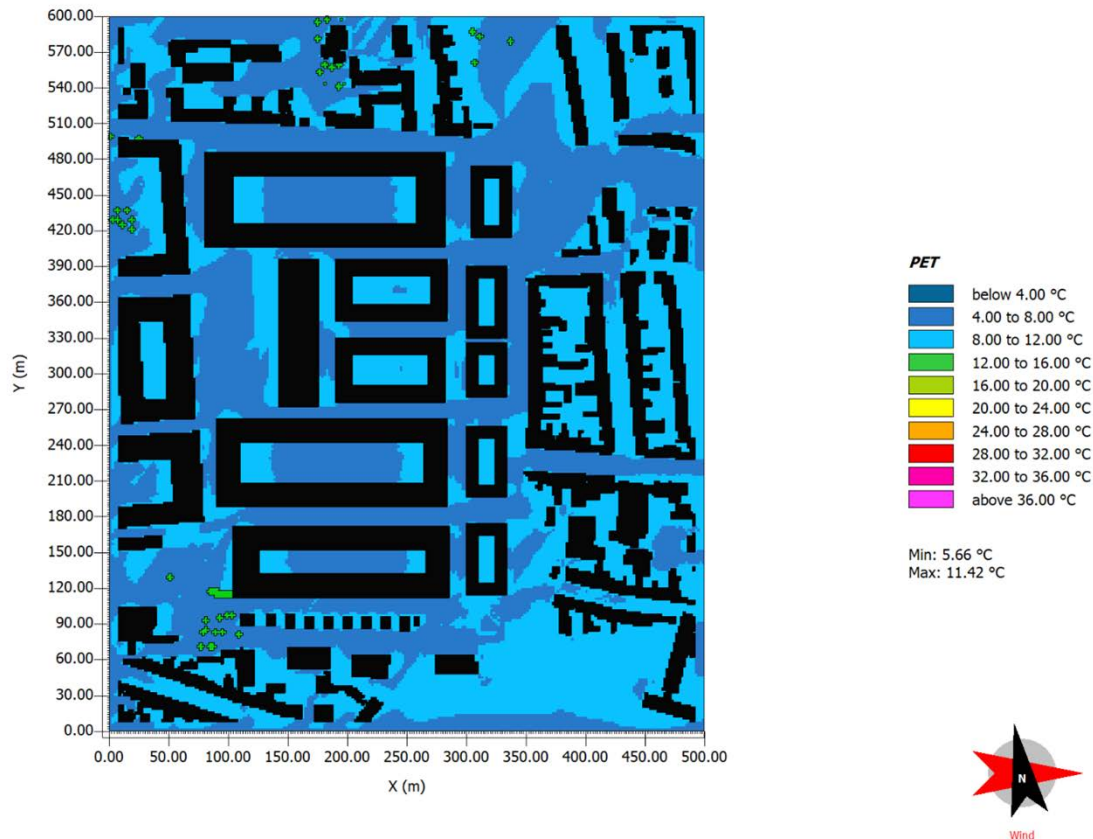
Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Die Verteilung des thermischen Komforts (Abbildung 57) reflektiert sowohl die hohe absolute Lufttemperatur als auch die starke Strukturierung des Untersuchungsgebietes.

Innerhalb der Gebäudeblöcke lassen sich die thermischen Bereiche in die beschattete und die besonnte Hofseite differenzieren, wobei beide mit ca. 35 °C im Schatten sowie über 57 °C in der Sonne dem heißen und sehr heißen Bereich zuzuordnen sind. Diese extremen Werte sind einem Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Faktoren geschuldet: zum einem sind die

Lufttemperaturen gemäß der Modellannahmen sehr hoch, zum andern sind die Windgeschwindigkeiten in diesen Hinterhofbereichen sehr gering, so dass kein physiologischer Kühleffekt auf der Haut eintreten kann. Als weiterer Faktor kommt vor allem in der Nähe der Fassaden und in den Eckbereichen der Innenhöfe die von den Fassaden reflektierte kurzwellige Strahlung als zusätzliche Belastung hinzu.

Abbildung 58: Verteilung des PET-Wertes in Köln am 18. Januar um 16:00 Uhr für den Status Quo



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Die thermische Situation am 18. Januar um 16:00 Uhr ist in Abbildung 58 dargestellt. Um diese Uhrzeit ist der Sonnenwinkel bereits zu gering, als dass er die PET-Verteilung beeinflussen würde. Die zu beobachtenden kleinen Differenzen in der PET-Verteilung sind auf Unterschiede in der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit zurückzuführen. Die windgeschützten Bereiche in den Innenhöfen sind hierbei leicht wärmer als die etwas windexponierteren, sie sind aber alle dem „kühlen“ oder „leicht kühlen“ Empfindungsbereich zuzuordnen.

2.2.5.3.3 Optimierte Variante

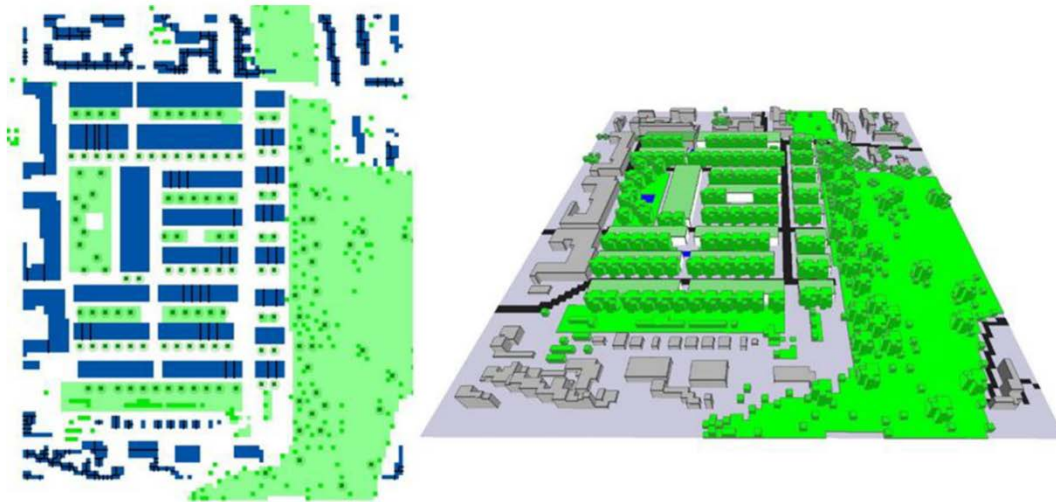
In den nördlichen Breiten ist, im Gegensatz zu südlicheren Gebieten wie der MENA-Region, kein ganzjähriges Problem der Hitzebelastung zu beobachten. Viel mehr gibt es ein Spannungsfeld zwischen Hitze- und Kältestress, welches die Auswahl passender Maßnahmen, die sowohl in den Winter- als auch in den Sommermonaten die mikroklimatischen Bedingungen im Außenraum verbessern, deutlich erschwert. Hier gilt es Maßnahmen zu finden, die sowohl den Hitzestress im Sommer als auch den Kältestress im Winter reduzieren, denen die Menschen im Außenraum ausgesetzt sind.

Um die Durchlüftung des Gebietes zu optimieren wurden die Gebäudeblöcke aufgebrochen und zu Reihenhäusern umgewandelt. Die Dächer und Ostwände der Gebäude wurden mit extensiver Dach- bzw. Fassadenbegrünung versehen. Zwischen den Gebäudereihen wurden Bäume

integriert, um die positiven Auswirkungen von Vegetation auf das lokale Mikroklima zu nutzen. Zudem wurden ebenfalls zwischen den Gebäuden passive Wasserelemente (Gewässer ohne Wasserbewegung oder Fontänen) integriert.

Die Vegetationsdichte im Modellgebiet wurde insgesamt deutlich erhöht. Durch diese Maßnahmen wurde der Flächenanteil von begrünten Flächen stark erhöht und damit der Versiegelungsgrad deutlich verringert.

Abbildung 59: Modellgebiet der optimierten Variante als Aufsicht und 3D-Ansicht



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.5.3.4 Ergebnisse Mikroklimasimulationen Optimierter Zustand

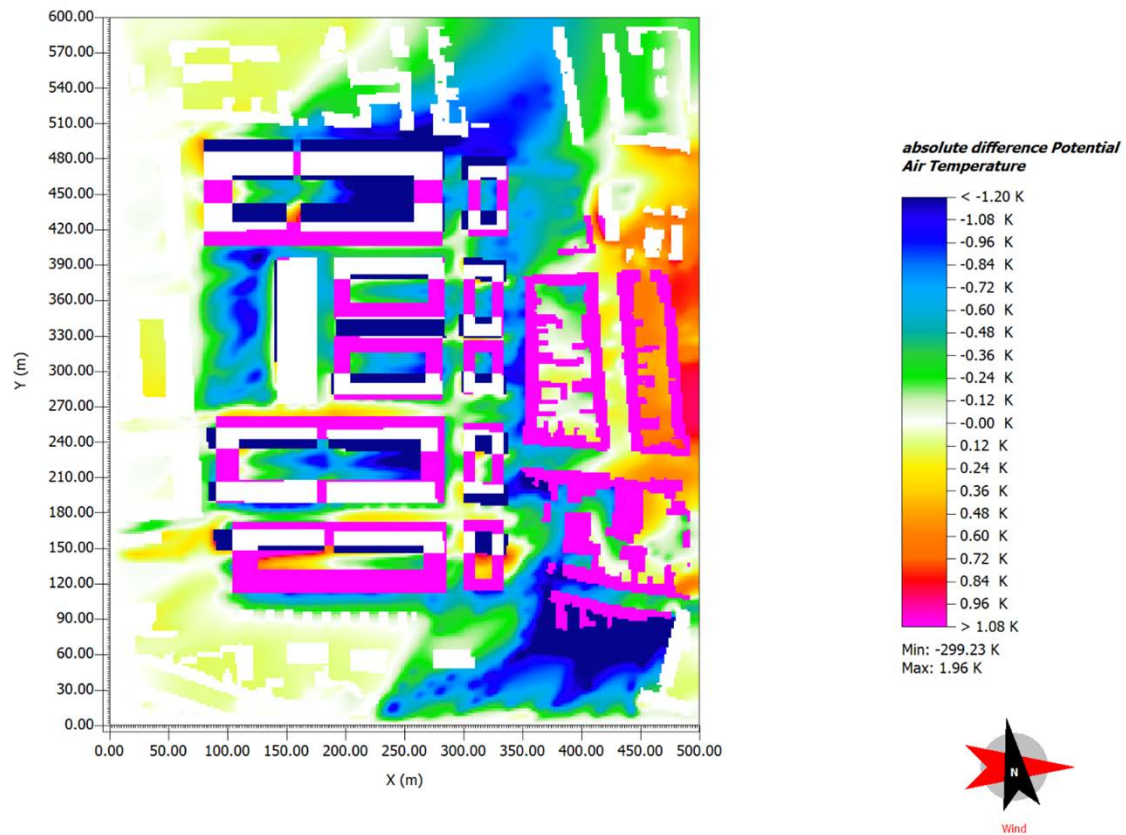
Die Darstellungen auf Tafel_3_a_Koeln_04h, Tafel_3_b_Koeln_16h und Tafel_3_c_Koeln_Detail im Anhang A.3 zeigen die Verteilung der Lufttemperatur zunächst als absolute Werte. Durch die großen Veränderungen sowohl in der Bebauungsstruktur als auch in der Begrünung lassen sich die Varianten nur begrenzt direkt miteinander vergleichen.

Durch das Aufbrechen der Gebäudeblocks wird das gesamte Gebiet wesentlich durchlässiger für den Wind, was sich auch an einer deutlich geringeren Differenzierung der Lufttemperatur als im Status Quo-Fall niederschlägt. Durch die Anlage der Grünfläche im Osten ändert sich hier die Lufttemperatur deutlich. Im Winter und Frühjahr ist die Lufttemperatur in diesem Bereich nun höher als im Status Quo-Fall, da die Sonne ungehindert den Boden erreichen kann. Im Sommer wirkt sich die kühlende Wirkung der Grasfläche und der Bäume aus, so dass es hier lokal zu niedrigeren Temperaturen kommt.

Abbildung 60 stellt die Veränderungen in der Lufttemperatur direkt dar. Das komplexe Gefüge zwischen sich abkühlenden und sich erwärmenden Bereichen wird gut deutlich, ebenso wie die dynamische Verteilung der Temperatur durch die bessere Durchströmbarkeit des Gebiets. Der erhöhte Grünanteil reduziert die Lufttemperaturen im westlichen Teilgebiet um bis zu 1.5 K, wobei die Stellen, an denen vormals Gebäude standen, nicht mit interpretiert werden können. Im Bereich der neuen Grünfläche im Osten lässt sich eine Erhöhung der Lufttemperatur von bis zu 0.8 K beobachten. Diese ist, wie bereits angemerkt, auf die Zunahme an solarer Einstrahlung zurückzuführen, da die Beschattung durch die entfernten Gebäude entfällt. In den Nachstunden

jedoch (vgl. Anhang A.3, Tafel_3_c_Koeln_Detail) lässt sich deutlich der kühlende Effekt der neu geschaffenen Freifläche erkennen.

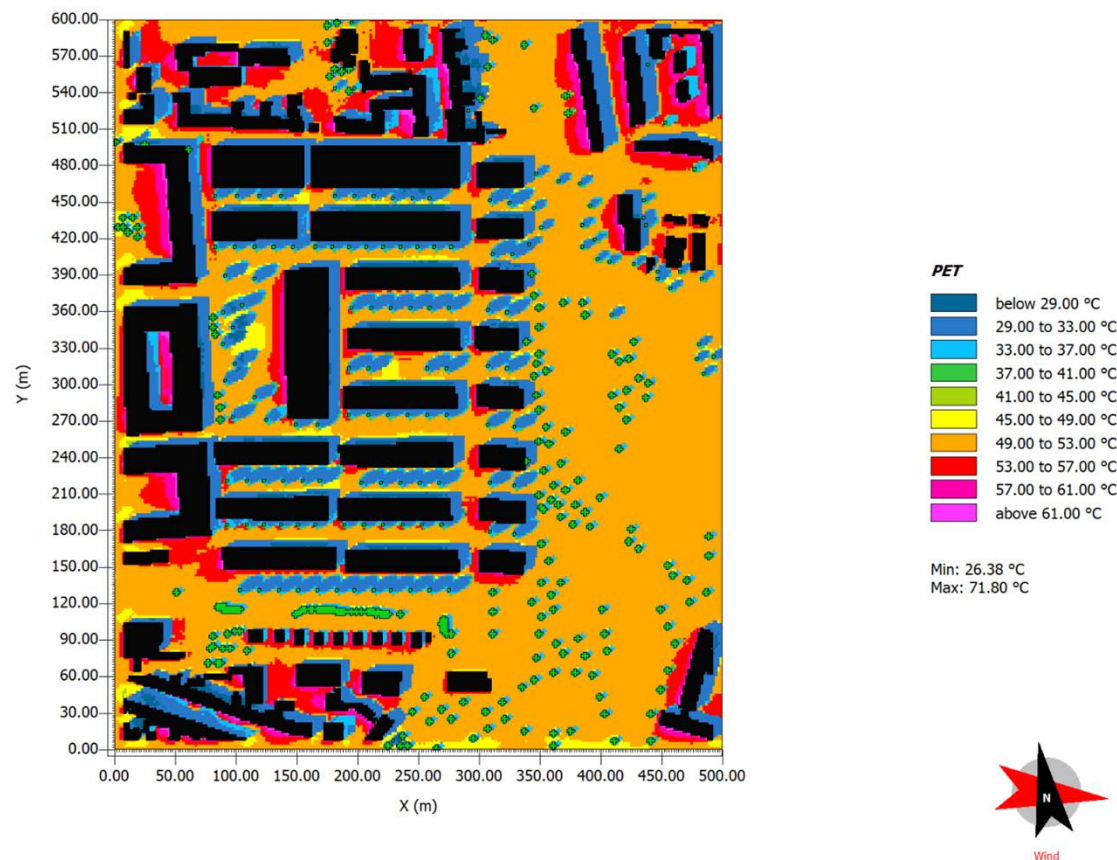
Abbildung 60: Differenz der Lufttemperatur zwischen Status Quo und optimierter Variante im Juli



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

In Abbildung 61 ist die Verteilung des absoluten PET-Wertes für das optimierte Szenario dargestellt. Man erkennt deutlich, dass aufgrund der hohen Lufttemperatur zwar sehr große Bereiche immer noch der „sehr heißen“ Empfindungsstufe zuzuordnen sind, aber die im Status Quo noch zu beobachtenden Extrembereiche mit einer PET von 60 °C und mehr nur noch direkt vor den sonnenbeschienenen Fassaden zu finden sind. In den Schattenbereichen dominieren nun PET-Temperaturen um die 30 °C, die dem komfortablen bis leicht warmen Bereich zuzuordnen sind. Diese war in den Schattenbereichen des Status Quo-Szenarios nur sehr selten zu beobachten. Hier macht sich sowohl die reduzierte Lufttemperatur als auch die bessere Durchlüftung der Bereiche positiv bemerkbar.

Abbildung 61: Verteilung des PET-Wertes in Köln am 25. Juli (16:00 Uhr) für das optimierte Szenario

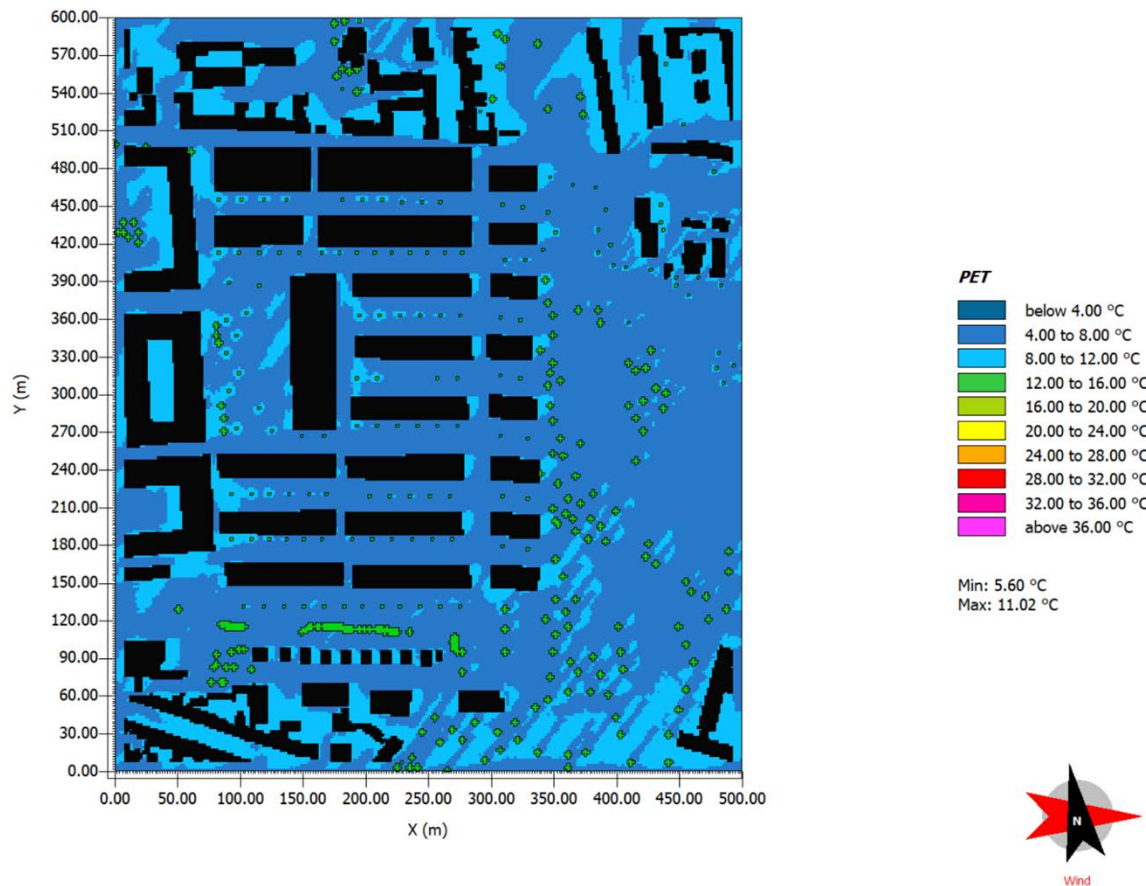


Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Wie bereits bei der Beschreibung der Optimierungsmaßnahmen angedeutet, gibt es ein gewisses Spannungsfeld zwischen der Optimierung des Außenraums für die Sommernutzung und den daraus resultierenden Konsequenzen für die Winternutzung. Diese soll im Folgenden einmalig für das Beispiel Köln dargestellt werden. Die Interpretation muss jedoch vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass die Außenraumnutzung im Winter und zu einem gewissen Grad auch in den Übergangsmonaten weniger klimasensibel ist als im Sommer. Zum einem ist die Nutzung des Außenraums zum Verweilen in dieser Jahreszeit zumindest in den nördlicheren Ländern eher von untergeordneter Bedeutung, da die Witterung im Allgemeinen zu kalt und instabil ist. Zum anderen kann man sich durch passende (wärmere) Kleidung an kühlere Bedingungen einfach adaptieren, was bei Hitzebelastung im Sommer nur bedingt möglich ist.

Abbildung 62 zeigt die PET-Verteilung für das optimierte Szenario im Januar. Schon durch die Farbverteilung wird schnell sichtbar, dass nun die Größe der dunkelblauen Bereiche zugenommen hat.

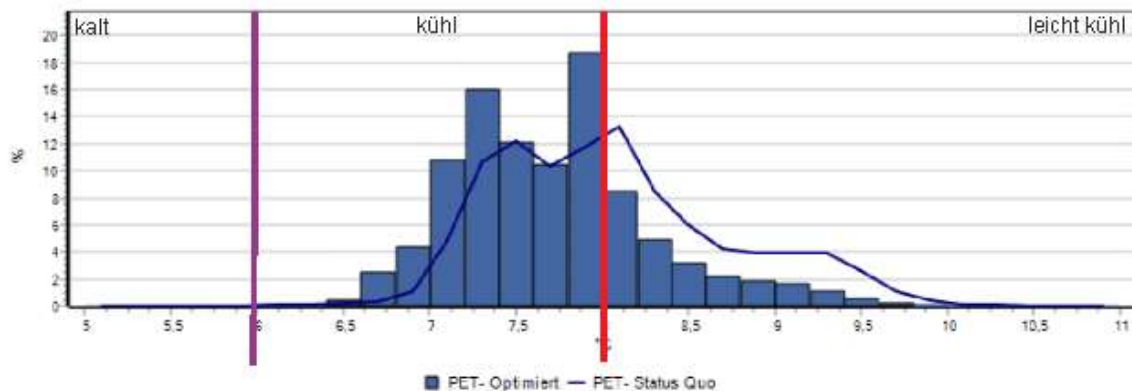
Abbildung 62: Verteilung des PET-Wertes in Köln am 18. Januar (16:00 Uhr) für das optimierte Szenario



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Diese ist eine unvermeidliche Konsequenz der verbesserten Durchlüftung des Untersuchungsgebietes, die zu höheren lokalen Windgeschwindigkeiten führt als im dichter bebauten Status Quo. Abbildung 63 zeigt die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen PET-Werte für den Status Quo und das optimierte Szenario. Zusätzlich sind die Bereiche der Empfindungsklassen „kalt“, „kühl“ und „leicht kühl“ mit den Grenzwerten 6 °C und 8 °C markiert. Man kann deutlich erkennen, dass im optimierten Szenario die Anzahl der leicht kühlen Bereiche abnimmt und die Anzahl der als kühl empfunden Bereiche leicht zunimmt.

Abbildung 63: Vergleich der PET-Verteilung zwischen dem Status Quo (Linie) und dem optimierten Szenario (Balken) im Winter



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET (Screenshot aus Software: ENVI met)

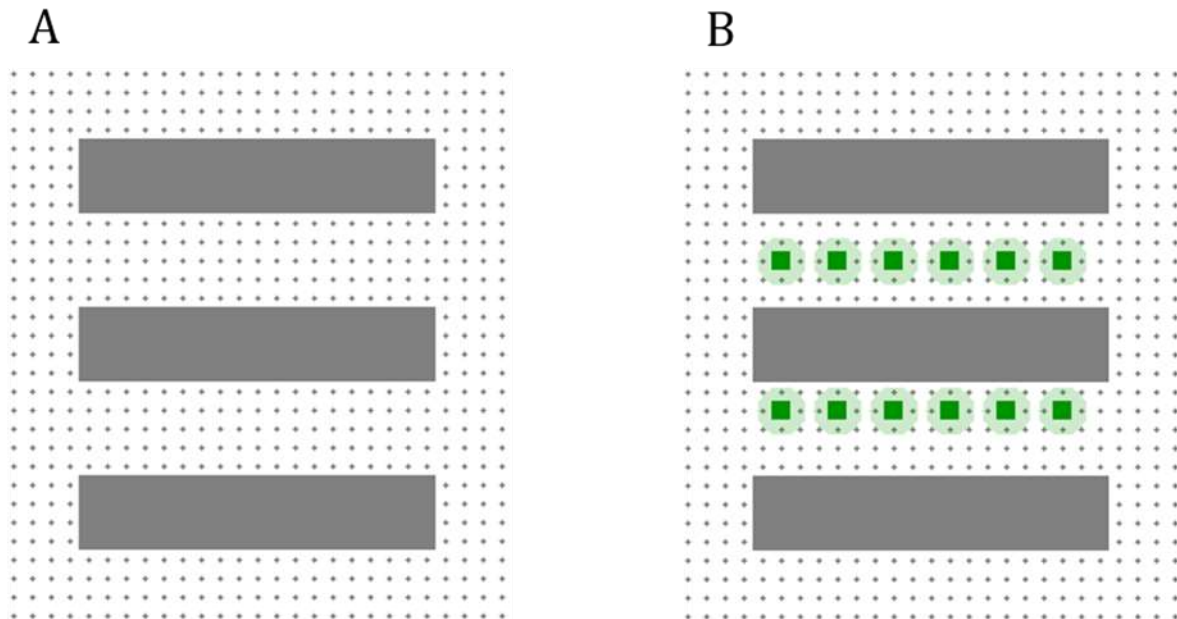
2.2.5.3.5 Zusammenfassende Beurteilung

Für das Untersuchungsgebiet Köln wurde gezeigt, wie durch massive Umstrukturierungsmaßnahmen das Mikroklima und der thermische Komfort vor allem im Sommer positiv beeinflusst werden kann. Die Aufgabe von geschlossenen Strukturen wie Gebäudeblöcken führt dabei zu einer verbesserten Durchlüftung des Gebiets, die zusammen mit unterschiedlichen Begrünungsmaßnahmen den thermischen Komfort deutlich verbessern kann. Hierbei konnte gezeigt werden, dass der PET-Wert zwar vor allem von der Sonnenstrahlung abhängt, aber feine Differenzierungen durch die Effekte von Wind und Lufttemperatur zu beobachten sind.

2.2.5.3.5.1 Exkurs Lufttemperaturen vor den Fassaden

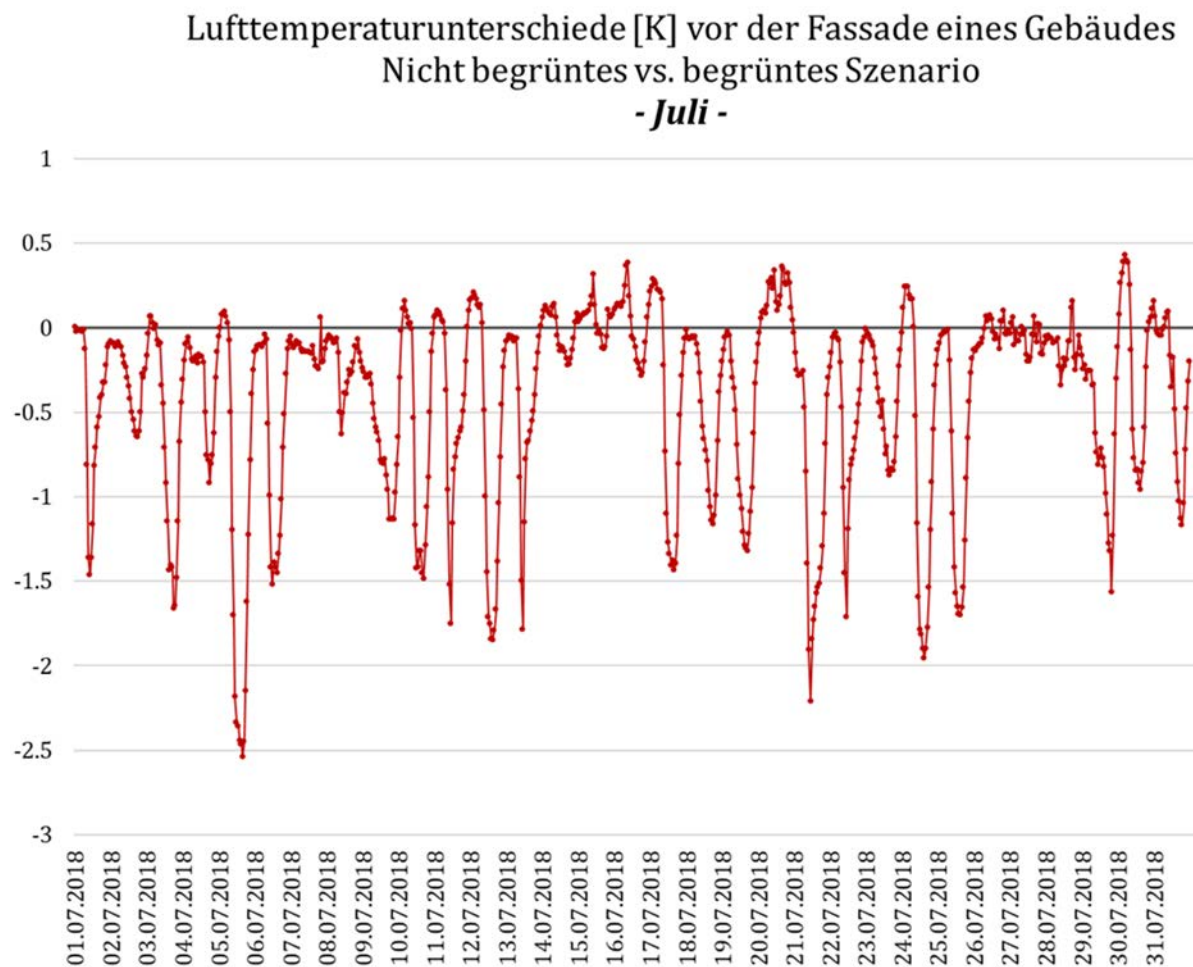
Bei der Auswertung der Simulationsdaten zur Übergabe an die Gebäudephysiksimulation fiel auf, dass die Lufttemperatur des optimierten Szenarios im Sommer teilweise höhere Lufttemperaturen an den beobachteten Fassadenelementen zeigte als im Ist-Zustand. Dieser ist allerdings nicht den vor den Gebäuden digitalisierten Bäumen zuzuschreiben, sondern vielmehr den allgemeinen Unterschieden in der Bebauungsstruktur zwischen den Modellgebieten. Um die Effekte von großkronigen Bäumen vor Fassaden isoliert zu untersuchen, wurden Ein-Monats-Simulationen durchgeführt, die eine Reduktion der Lufttemperatur zeigten. Die Anordnung der Gebäude und im begrünten Szenario der Bäume in den Ein-Monats-Simulationen können aus Abbildung 64 entnommen werden. Ähnlich wie in den Ganzjahressimulationen sind die Gebäude in Ost-West-Richtung ausgerichtet, alle anderen Parameter wie beispielsweise Auflösung, Materialien und klimatische Eingabedaten wurden entsprechend der Quartierssimulationen gewählt.

Abbildung 64: Ausschnitt des Modellgebietes zur Teilsimulation ohne Vegetation (A) und mit Vegetation (B)



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Vergleicht man die Lufttemperaturen vor den Gebäuden (Abbildung 65), so zeigt sich insgesamt ein lufttemperaturreduzierender Effekt durch die hinzugefügte Vegetation von im Mittel ca. - 0,4 K. Dabei gibt es starke tageszeitliche Schwankungen, die sich durch die Photosynthese und den damit einhergehenden Transpirationseinfluss erklären lassen: da die Photosynthese nur tagsüber stattfindet und damit ein Transpirationsfluss entsteht, wird ein latenter Wärmestrom erzeugt, der zu einer massiven Reduktion der Lufttemperatur führt. In der Nacht, wenn die Photosynthese aufgrund der nicht vorhandenen kurzwelligen Strahlung ausbleibt, sind entweder keine oder sehr kleine Lufttemperaturerhöhungen durch die eingebrachte Vegetation festzustellen. Dies ist wiederum mit der Reduktion des *Sky View Factor* zu begründen: der langwellige Strahlungstransport wird durch die großkronigen Bäume leicht behindert, was die nächtliche Abkühlungsrate leicht reduzieren kann.

Abbildung 65: Lufttemperaturunterschiede [K] vor der Fassade eines Gebäudes

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.5.4 Gebäudesimulation

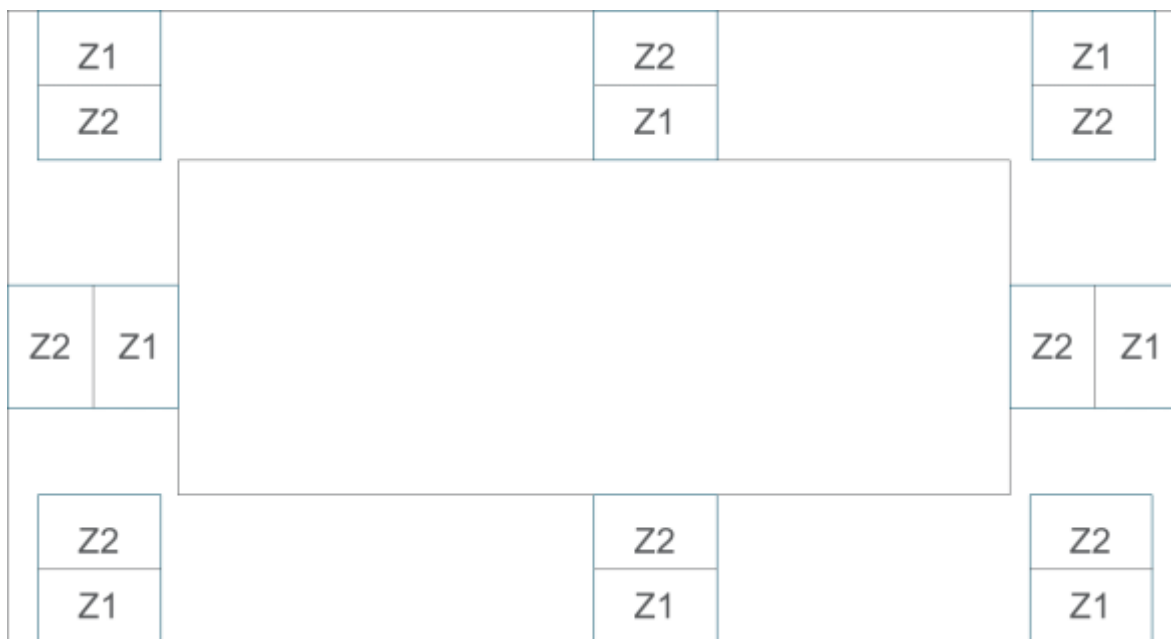
2.2.5.4.1 Das Simulationsmodell

Das Auswertungsgebiet besteht überwiegend aus Geschosswohnungsbauten mit einem moderaten Fensterflächenanteil von 25 %, die hinsichtlich Geometrie und Bauphysik als ähnlich angenommen werden können. Die Auswertungen bezüglich des Verbrauchs und Komforts wurden auf Wohnungsebene durchgeführt. Je nach Lage und Orientierung der Wohnungen im Gebäude und Gebiet ergeben sich Unterschiede beim Energiebedarf und Innenraumkomfort.

Hinsichtlich der Geometrie wurde zunächst eine repräsentative Wohnung mit 112 m² Wohnfläche gewählt, die für die Modellierung in zwei Zonen (Z1: Wohn- und Esszimmer, Z2: Schlaf- und Kinderzimmer) unterteilt wurde.

Die Wohn- und Esszimmer wurden dabei soweit möglich immer südlich orientiert.

Abbildung 66: Qualitative Darstellung zur Positionierung und Ausrichtung der Wohnungen und Zonen in den Gebäudeblocks im Szenario Status Quo



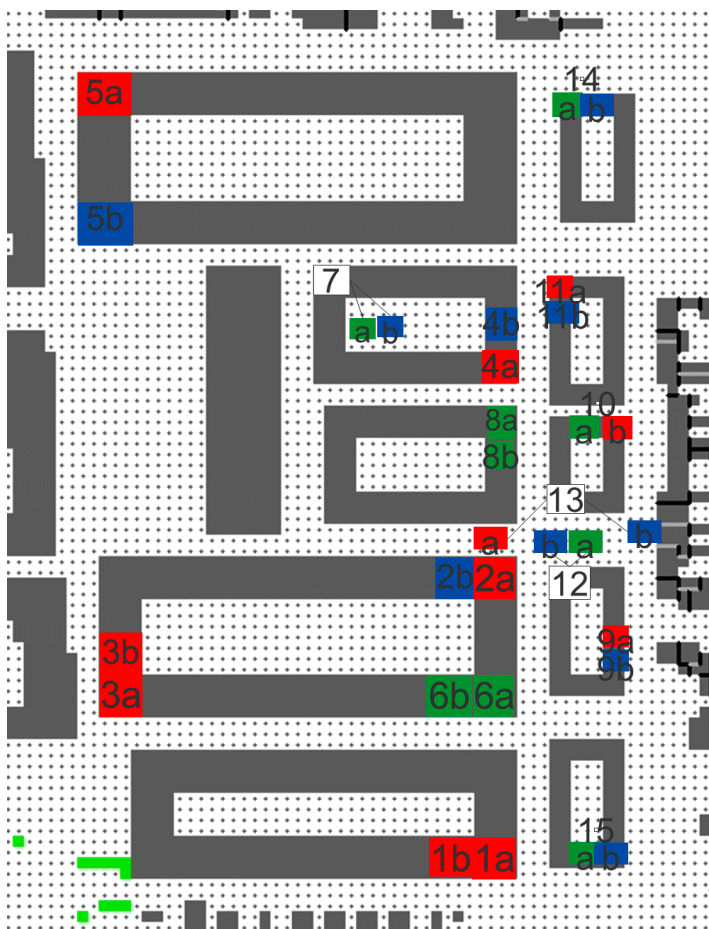
Oben: Norden; Z1: Wohn- und Esszimmer; Z2: Schlaf- und Kinderzimmer.

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Bei der Verteilung der repräsentativen Referenzwohnungen wurde darauf geachtet, dass sowohl alle Orientierungen als auch alle Lagen im Gebäude und im Quartier geeignet berücksichtigt wurden.

In den folgenden Abbildungen sind die Lagen der Referenzwohnungen im Quartier dargestellt.

Abbildung 67: Lage der Referenzwohnungen im Quartier im Ausgangszustand (Status Quo)
 rot: Dachgeschoss, blau: Mittelgeschoss, grün: Erdgeschoss

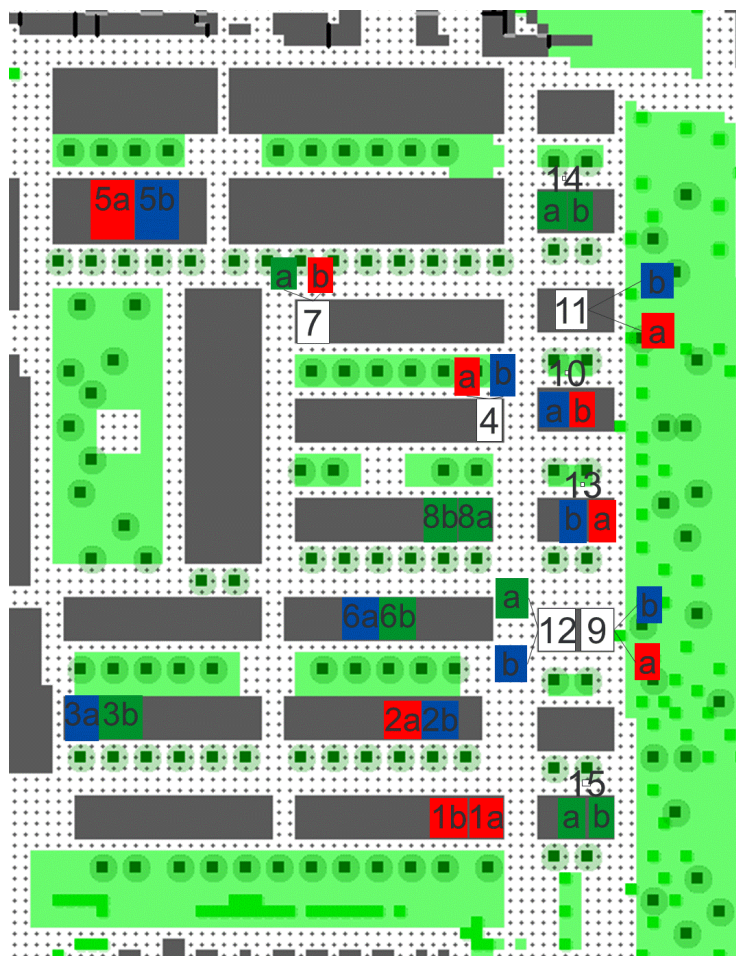


Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse und ENVI_MET

Im Ausgangszustand (Status Quo) repräsentieren die 30 Referenzwohnungen insgesamt 903 Wohnungen mit einer Gesamtwohnfläche im Quartier von ca. 100.000 m². Am relevantesten sind dabei die Mittelgeschosswohnungen auf den Längsseiten der Wohnblöcke (1b, 2b und 6b), die jeweils 15 % der Gesamtwohnfläche repräsentieren.

Da bei der Quartiers-Optimierung auch die Gebäudegeometrien geändert wurden, ergeben sich für das optimierte Szenario andere Lagen der Wohnungen.

Durch die Optimierung reduziert sich die Anzahl der Wohnungen auf 555, die Wohnfläche auf 62.000 m², d. h. fast 40 % weniger als im Ausgangszustand.

Abbildung 68: Lage der Referenzwohnungen im optimierten Quartier

Rot: Dachgeschoss, blau: Mittelgeschoss, grün: Erdgeschoss

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse und ENVI_MET

2.2.5.4.2 Varianten

In der folgenden Tabelle sind die in der Gebäudesimulation berücksichtigten Varianten zusammengefasst.

In den Basisvarianten wurde dabei anstelle der Fernwärme eine Wärmeversorgung über gebäudezentrale Gaskessel angenommen. Eine klimaneutrale Fernwärme wurde in der Variante Optimiert 3 vorgesehen. Eine natürliche Lüftungskühlung über Fenster wurde in allen Varianten berücksichtigt.⁴¹ Als Verschattungseinrichtung wurde in allen Varianten außerdem ein wirksamer außenliegender Sonnenschutz (Raffstores in sog. Cut-Off-Stellung⁴²; $fc=0,2$) angenommen, der während der Sommerzeit tagsüber (von 7-17 Uhr) geschlossen ist.

Die Varianten Optimiert 1 und Optimiert 2 dienen dem Vergleich mit den entsprechenden Status Quo-Varianten (SQ1 und SQ2). Variante Optimiert 1 dient dabei der Prüfung, ob und inwieweit allein durch die Maßnahmen der Quartiersoptimierung auf eine Kühlung verzichtet werden

⁴¹ Stoßlüften im Wohn-/ Essbereich im Sommer, wenn Raumtemperatur > 24°C und Außentemperatur < Raumtemperatur mit 6 l/h (6-7 Uhr) 4 l/h (16-22 Uhr). Im Schlafzimmer wurde im Sommer eine Nachtlüftung über gekippte Fenster angenommen, wenn die Außentemperatur > 15°C und Außentemperatur < Raumtemperatur ist.

⁴² Die Cut-Off-Stellung von Raffstores gewährleistet maximale Durchsicht bei vollständiger Abschattung der direkten Sonneneinstrahlung.

kann. Die Varianten Optimiert 3 und Optimiert 4 stellen Zielkonzepte hinsichtlich des Erreichens der Klimaneutralität dar.

Mit der Variante Optimiert 3 soll geprüft werden, ob sich die Situation durch die Verbesserung des Wärmeschutzes erreichen lässt⁴³. Schließlich stellt die Variante Optimiert 4 eine Lösung dar, bei der ein nachhaltig hoher Komfort auch in den kritischen Wohnungen sichergestellt werden kann.

Tabelle 17: Übersicht der untersuchten Varianten für das Kölner Quartier

	SQ1 (ohne Kühlung)	SQ2 (mit Kühlung)	Optimiert 1 (ohne Kühlung)	Optimiert 2 (mit Kühlung)	Optimiert 3 (ohne Kühlung)	Optimiert 4 (mit Kühlung)
Hüllqualität	Effizienzhaus 55	Effizienzhaus 55	Effizienzhaus 55	Effizienzhaus 55	Effizienzhaus 40	Effizienzhaus 40
Heizen	Gasbrennwertkessel, Fußbodenheizung	Gasbrennwertkessel, Fußbodenheizung	Gasbrennwertkessel, Fußbodenheizung	Gasbrennwertkessel, Fußbodenheizung	Klimaneutrale Fernwärme, Fußbodenheizung	Erdwärmepumpe mit natürlichem Kältemittel, Fußbodenheizung
Kühlen	-	Splitklimagerät (26°C)	-	Splitklimagerät (26°C)	-	Fußbodenkühlung über Erdkälte (26 °C)
Lüftung	Abluftanlage 0,4 1/h	Abluftanlage 0,4 1/h	Abluftanlage 0,4 1/h	Abluftanlage 0,4 1/h	Zu-/Abluft-Anlage mit Wärmerückgewinnung (80 %) 0,4 1/h	Zu-/Abluft-Anlage mit Wärmerückgewinnung (80 %) 0,4 1/h
PV-Anlage und Batteriespeicher⁴⁴					Pro Wohnung: PV: 3,5 kWp Batterie: 3 kWh	Pro Wohnung: PV: 3,5 kWp Batterie: 3 kWh

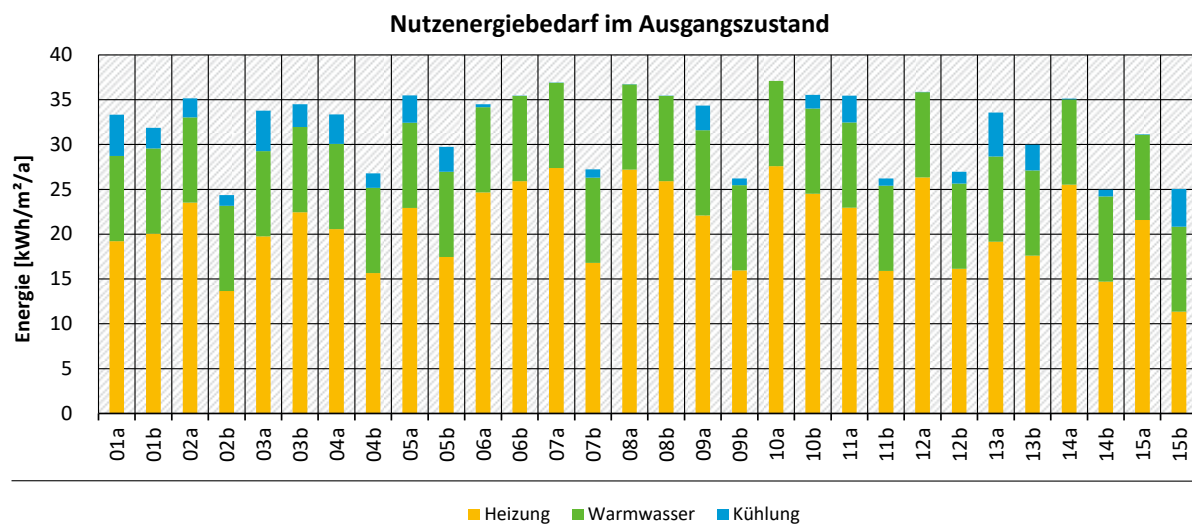
2.2.5.4.3 Ergebnisse

2.2.5.4.3.1 Status Quo

In der folgenden Abbildung ist der Nutzenergiebedarf der Referenzwohnungen im Ausgangszustand (SQ2) dargestellt. Der Heizenergiebedarf stellt dabei mit Werten zwischen 12 kWh/m² und 27 kWh/m²a den größten Anteil, gefolgt vom Warmwasserbedarf mit knapp 10 kWh/m²a. Der Kühlenergiebedarf ist insbesondere in Dachgeschosswohnungen mit bis zu knapp 5 kWh/m²a relevant. Die Erdgeschosswohnungen haben teilweise keinen Kühlenergiebedarf.

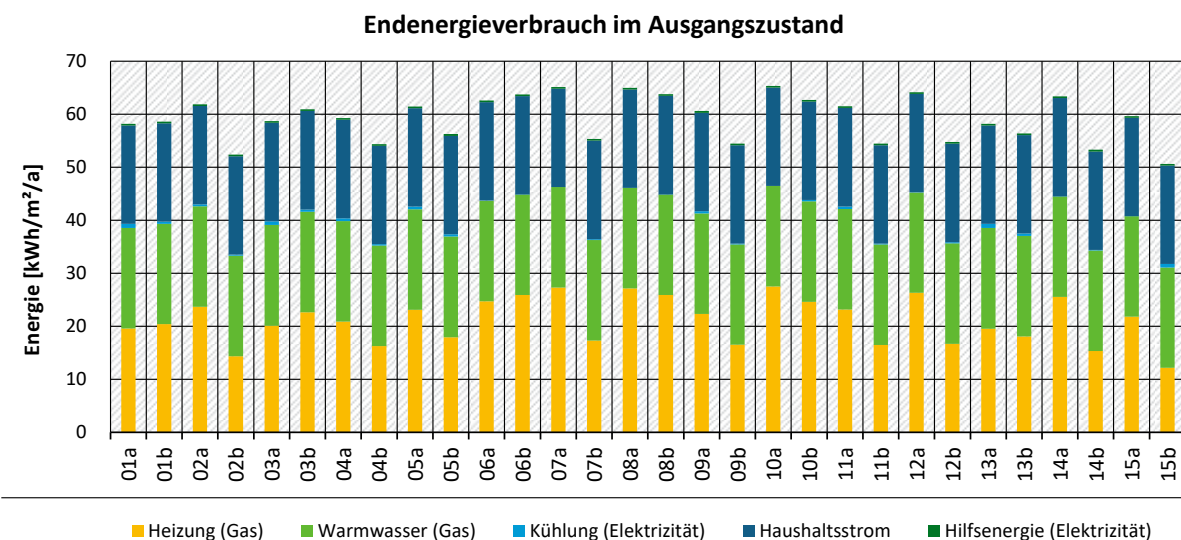
⁴³ Der sommerliche Wärmeschutz ist durch die beschriebenen Maßnahmen schon optimal und nicht mehr wesentlich zu verbessern.

⁴⁴ Die in der Tabelle angegebenen Größe der PV-Anlagen stellen das Maximum bzgl. der Belegung der Dachflächen dar.

Abbildung 69: Nutzenergiebedarf der Referenzwohnungen im Ausgangszustand (Variante SQ2)

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Bei einer Betrachtung des Endenergieverbrauchs unter Berücksichtigung eines reduzierten Haushaltsstrombedarfs von knapp 19 kWh/m²a⁴⁵ und der Systemverluste⁴⁶ ergibt sich das in der folgenden Abbildung dargestellte Bild einer sehr ausgewogenen Aufteilung auf die Bereiche Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom mit jeweils etwa einem Drittel des Gesamtverbrauchs. Der Endenergiebedarf für Hilfsenergie und Kühlung spielt nur eine untergeordnete Rolle.

Abbildung 70: Endenergieverbrauch der Referenzwohnungen im Ausgangszustand (Variante SQ2)

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

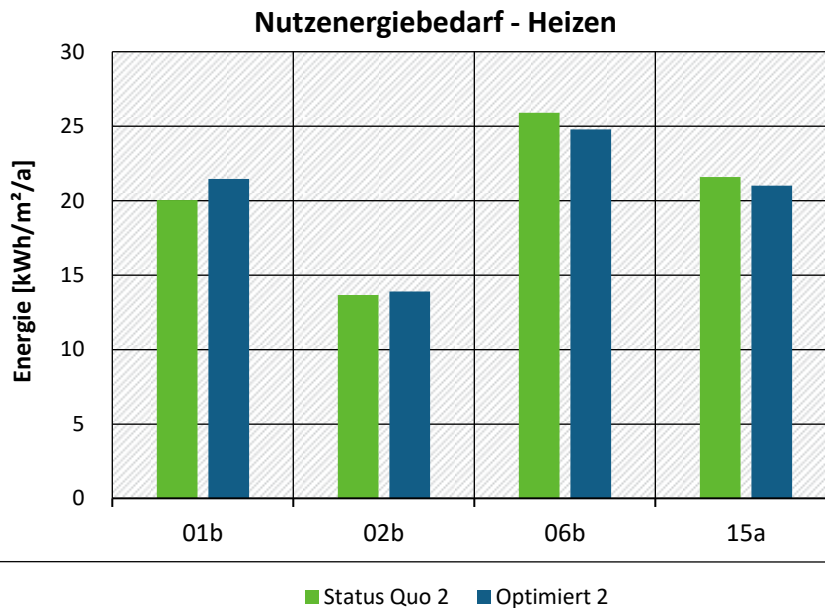
⁴⁵ Pro Wohnung wurde von 2100 kWh/a ausgegangen. Um dies zu erreichen ist eine geringe Wohndichte und eine sehr effiziente Geräteausstattung erforderlich, die am wahrscheinlichsten in hochwertigen Neubauten vorzufinden ist.

⁴⁶ Insbesondere beim Warmwasser erheblich durch die erforderlichen Zirkulationsanlagen.

2.2.5.4.3.2 Optimierte Szenario

Ein Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Heizen der, bzgl. der Lage und Geometrie, am ehesten vergleichbaren Wohnungen (01b, 02b, 06b und 15a, Abbildung 71) für die Varianten SQ2 und Optimiert 2 zeigt keine einheitlichen Vorteile für das optimierte Szenario. Demzufolge haben die Optimierungsmaßnahmen im Quartier bei gleicher Wohnungslage und -geometrie keine wesentlichen Auswirkungen auf den Heizenergiebedarf.

Abbildung 71: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Heizen zwischen Ausgangszustand (SQ 2) und optimiertem Quartier (Optimiert 2)

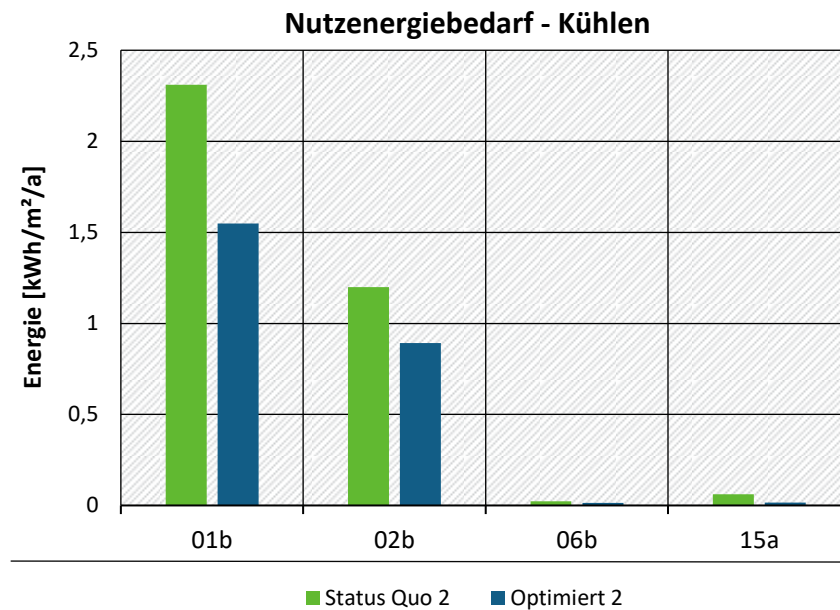


Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Durch die weniger kompakte Bauweise im optimierten Quartier haben die Eckwohnungen eine Außenwand mehr als diejenigen im hochverdichteten Status Quo-Quartier. Der Heizenergiebedarf in diesen Wohnungen ist daher sogar höher.

Einen deutlichen Unterschied erkennt man jedoch beim Nutzenergiebedarf für Kühlung. Der bereits recht geringe Bedarf kann durch die Quartieroptimierungsmaßnahmen weiter reduziert werden, was vor allem auf die Beschattung der Bäume zurückzuführen ist.

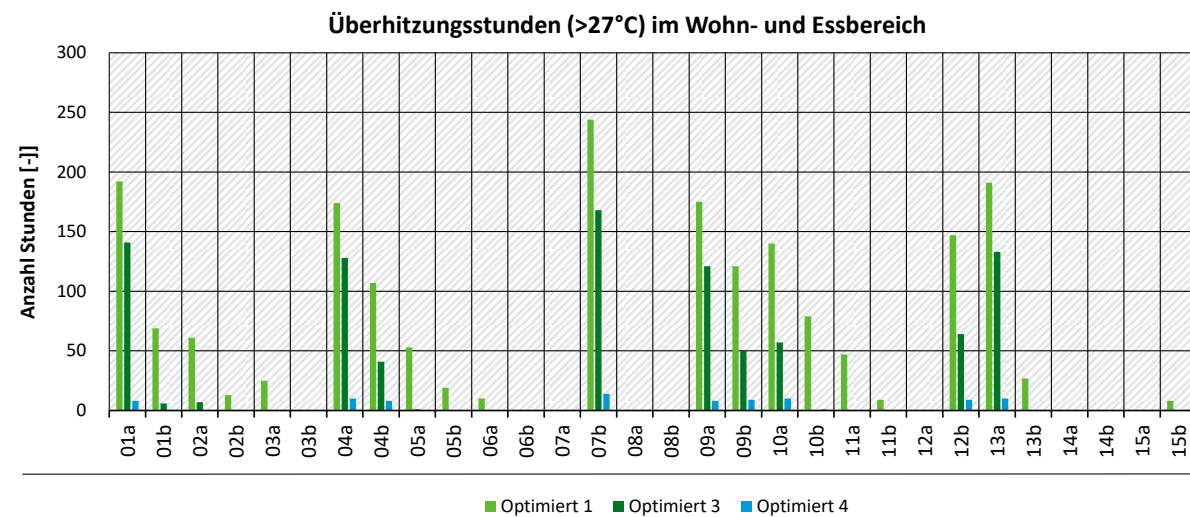
Abbildung 72: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Kühlen zwischen Ausgangszustand (SQ 2) und Optimiertem Quartier (Optimiert 2)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

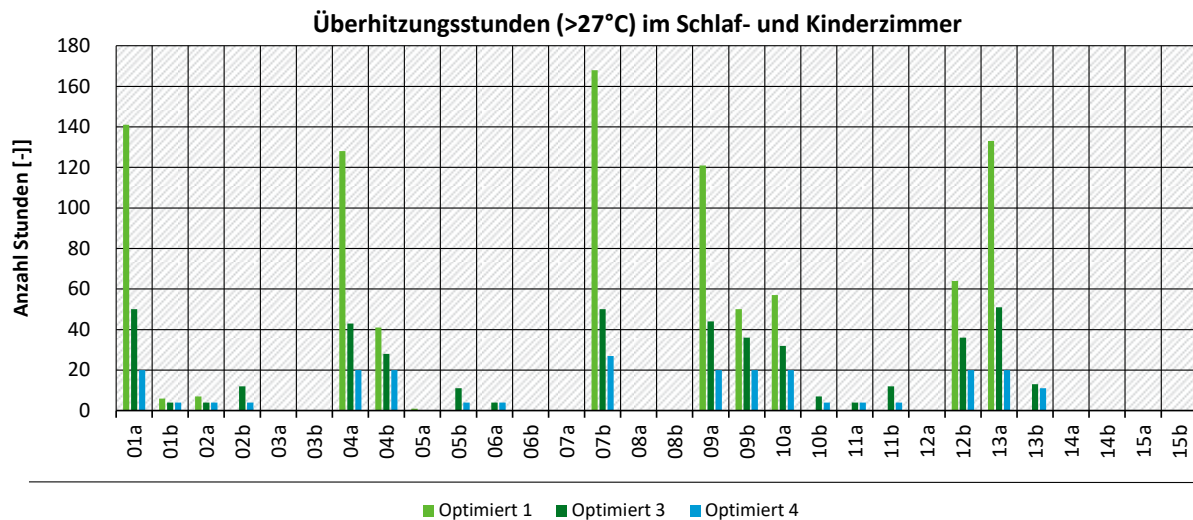
Im Folgenden werden die Überhitzungsstunden (>27 °C) in den Zonen der Referenzwohnungen der optimierten Varianten während der Nutzung in der Sommerzeit dargestellt.

Abbildung 73: Vergleich der Überhitzungsstunden im Wohn-/Essbereich einzelner Wohnungen



Quartier Optimiert 1: Effizienzhaus 55; Optimiert 3: Effizienzhaus 40; Optimiert 4: Effizienzhaus 40 + passive Fußbodenkühlung.

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Abbildung 74: Vergleich der Überhitzungsstunden in Schlaf- und Kinderzimmer

Quartier Optimiert 1: Effizienzhaus 55; Optimiert 3: Effizienzhaus 40; Optimiert 4: Effizienzhaus 40 + Passive Fußbodenkühlung.

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Die jährlichen Überhitzungsstunden in der Variante Optimiert 1 liegen bei etwa der Hälfte der Wohnungen teilweise erheblich über 100 h/a⁴⁷. Eine zusätzliche Auswertung der t_{imax} -Überschreitungsstunden der maximalen Innenraumtemperatur der geringsten Komfort-Kategorie 3 gem. EN 15251 zeigt beispielsweise für die Wohnung 01a eine Überschreitungszeit von 156 Stunden und die Wohnung 04a von 152 Stunden. Mit über 10 % der Nutzungszeit im Sommer liegen diese Überschreitungsdauern somit jenseits des akzeptablen Bereiches, der mit 3 bis 5 % angegeben wird. Durch die Verbesserung des Wärmeschutzes können die Überhitzungsstunden deutlich reduziert werden, liegen jedoch insbesondere in der Zone „Wohn-/ Essbereich“ bei 1/3 der untersuchten Wohnungen (ausschließlich Dachgeschosswohnungen) immer noch in einem kritischen Bereich. Erst durch eine Kühlung, hier in Form einer passiven Fußbodenkühlung unter Ausnutzung der (im Winter ins Erdreich eingespeicherten) Kälte der Erdsonden (Variante Optimiert 4) werden die Überschreitungsstunden weitestgehend eliminiert. Lediglich in wenigen Wohnungen sind noch vereinzelte Überschreitungsstunden zu beobachten, die auf die begrenzte Leistung der Fußbodenkühlung zurückzuführen sind.

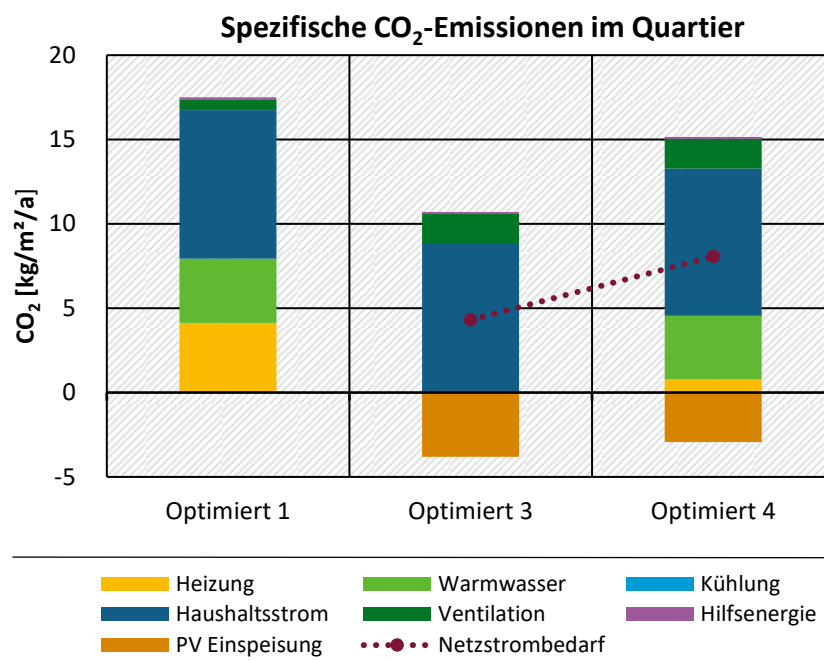
Hinsichtlich der angestrebten Klimaneutralität ist die verfügbare Dachfläche der begrenzende Faktor. Wie aus der folgenden Abbildung zu entnehmen ist, ist ohne eine zusätzliche externe Versorgung eine vollständige Klimaneutralität der Gebäude derzeit nicht möglich. In der Variante Optimiert 3 wird die externe Versorgung durch eine klimaneutrale Fernwärme gewährleistet. Hierdurch wird es möglich, zumindest jahresbilanziell (unter Berücksichtigung des in das Netz eingespeisten Stromes), die angestrebte Klimaneutralität zu erreichen.⁴⁸ Eine Vergrößerung der Batteriespeicher würde zu keiner signifikanten Erhöhung des Anteils des selbst genutzten PV-Stroms führen.

⁴⁷ Im Sommer beträgt die Gesamtnutzungszeit für die Zone Wohn-/ Essbereich 1.071 h/a und für die Zone Schlaf- und Kinderzimmer 1.220 h/a

⁴⁸ Bei der untersuchten Variante überwiegt der Netzstrombezug noch leicht den eingespeisten Anteil.

Unter Berücksichtigung der entsprechenden CO₂-Emissionsfaktoren⁴⁹ ergeben sich für die Variante Optimiert 1 (Hülle gemäß Effizienzhaus 55-Standard und Gasbrennwertkessel) inklusive Haushaltsstrom mittlere spezifische CO₂-Emissionen der Wohnungen von ca. 17 kg/m²a. In der Variante Optimiert 4 verbleiben jahresbilanziell (=> Differenz Netzstrombedarf – PV-Einspeisung) noch ca. 5 kg/m²a. Dies ist gegenüber der Variante Optimiert 1 zwar eine Verminderung um über 70 %, bedarf jedoch zur Erreichung der Klimaneutralität einer externen Bereitstellung klimaneutralen Stromes. Dies wird mittelfristig durch den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien im Strombereich geschehen.

Abbildung 75: Vergleich der CO₂-Emissionen der Varianten für das optimierte Quartier



Optimiert 1: Ohne Kühlung, Effizienzhaus 55; Optimiert 3: Ohne Kühlung, Effizienzhaus 40; optimiert 4: Passive Fußbodenkühlung, Effizienzhaus 40.

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Unter Berücksichtigung von differenzierten Strom-Emissionsfaktoren, die sowohl für den erzeugten PV-Strom als auch für den Strom für Wärmeerzeugung⁵⁰ einen höheren CO₂-Emissionsfaktor⁵¹ berücksichtigen, wäre für die Variante Optimiert 4 bereits heute die rechnerische Klimaneutralität erreicht. Für die Variante Optimiert 3 ergäbe sich dabei sogar eine rechnerische CO₂-Emissionssenke.

⁴⁹ 0,474 g/kWh für Strommix, Quelle: Umweltbundesamt 2021 (Wert für 2018; Annahme: Gleiche Werte für Netzbezug und Einspeisung); 0,201 g/kWh für Erdgas, Quelle: Jährlich 2016; 0 g/kWh für (klimaneutrale) Fernwärme.

⁵⁰ Die Annahme eines gegenüber dem Strommix erhöhten Emissionsfaktors für die Wärmeerzeugung aus Strom (hier Wärmepumpen und Lüftungswärmerückgewinnung) ist wie folgt begründbar: Da anstelle der Wärmepumpen auch Wärmeerzeuger, die anderer Energiequellen nutzen, eingesetzt werden könnten (z.B. Biomassekessel), stellt deren Strombedarf eine vermeidbare, zusätzliche Belastung für das Stromnetz dar. Dieser zusätzliche Strombedarf muss, zu den Zeiten an denen keine 100 %-Versorgung aus erneuerbaren Energien vorliegt, mittels nicht erneuerbarer Stromerzeugung erbracht werden. Auf der gleichen Argumentationsgrundlage kann auch für den erneuerbaren PV-Strom ein erhöhter CO₂-Emissionsfaktor angenommen werden.

⁵¹ Annahme: 860 g/kWh (Verdrängungsstrommix (GEG 2020))

Obwohl nicht im Fokus dieses Forschungsvorhabens, sollte an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass insbesondere im Neubaubereich auch die Baukonstruktion eine entscheidende Rolle für das Ziel der Klimaneutralität spielt. Daher sollten die o. g. Konzepte unbedingt unter Berücksichtigung von nachhaltigen Baukonstruktionen (z. B. Holzbauweise aus nachhaltiger Bewirtschaftung) umgesetzt werden.

2.2.5.4.3.3 Zusammenfassende Beurteilung

Durch die Optimierungsmaßnahmen im Quartier kann der rechnerisch ermittelte Kühlergiebedarf reduziert werden. Da dieser jedoch vergleichsweise niedrig ist, sind die Effekte der Quartiersmaßnahmen auf Gebäudeebene gering. Erheblich größere Effekte werden durch die Verbesserung der energetischen Hüllqualitäten erreicht. Insbesondere in den Dachgeschosswohnungen reichen jedoch auch diese Maßnahmen im optimierten Quartier nicht aus, um während des betrachteten durchschnittlichen Sommers einen guten thermischen Komfort zu gewährleisten. Dieser kann nur durch Kühlmaßnahmen erreicht werden. Durch die untersuchte passive Fußbodenkühlung kann in allen Wohnungen ein ausreichender Komfort sichergestellt werden. Da die Komfortprobleme vor allem in den Dachgeschosswohnungen auftreten, der Gesamtkühlergiebedarf jedoch gering ist, wären hier alternativ auch effiziente Split-Klimageräte mit klimaschonenden natürlichen Kältemitteln eine Option, vorausgesetzt, dass diese am Markt verfügbar sind. In Kombination mit einer klimaneutralen Fernwärme (siehe Variante Optimierte 3) und großflächigen Photovoltaikanlagen⁵² auf den Dächern könnte eine jahresbilanzielle Klimaneutralität (inkl. Haushaltsstrom) erreicht werden. Eine bilanzielle Klimaneutralität der Gebäude wird je nach Rechenansatz auch für die Variante Optimierte 4 erreicht. Die untersuchten Lösungen mit hohem Wärmeschutzstandard und effizienter bzw. klimaneutraler Wärmeversorgung führen jedoch in jedem Fall zu einer erheblichen Reduzierung des verbleibenden Energiebedarfs und leisten somit einen wichtigen Beitrag zum Ziel der Klimaneutralität.

⁵² Pro Wohnung: 3,5 kWp

2.2.6 Bestandsquartier Hamburg Eimsbüttel - Generalsviertel (Gründerzeit-Blockrandbebauung)

2.2.6.1 Lage und Beschreibung

Das Untersuchungsgebiet liegt im Nordwesten der Stadt Hamburg.

Abbildung 76: Lage des Generalsviertels in Hamburg Eimsbüttel



Quelle: Google

Abbildung 77: Lage des Generalsviertels in Hamburg Eimsbüttel im Hamburger Norden (roter Kreis)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse basierend auf Google (Hintergrund)

Die vorherrschende Bauweise sind Etagenhäuser in Schlitzbauweise auf der Hofseite. Die Mehrfamilienhäuser bestehend aus vier bis fünf Geschossen mit weitgehend hellen und verzierten Putzfassaden und reichen Fassadenornamenten bestimmen den Charakter des Quartiers. Im nordwestlichen Teil befinden sich Stadtvillen.

Abbildung 78: Lage des Auswertungsgebietes



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse basierend auf Google (Hintergrund)

Abbildung 79: Luftaufnahme der Gebäude im Modellgebiet



Quelle: Google

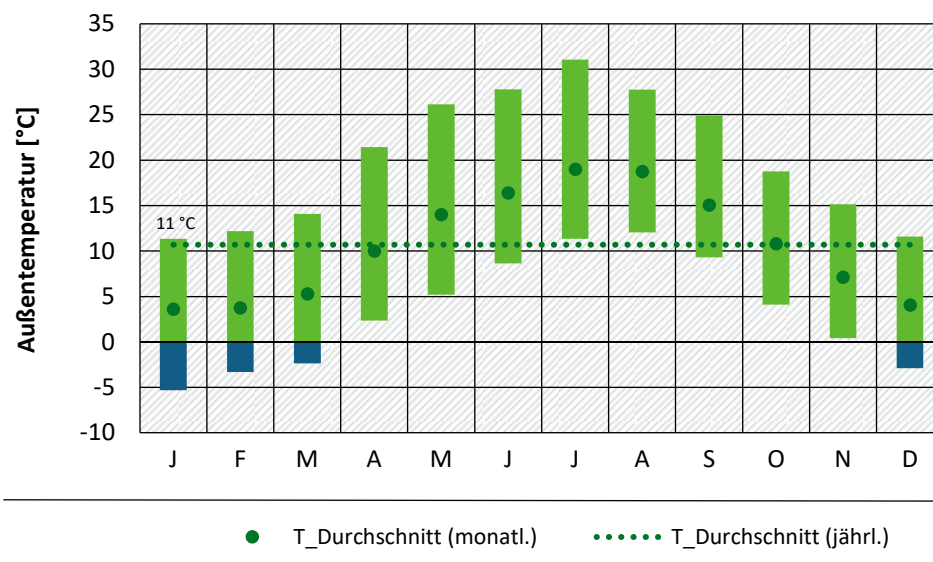
Abbildung 80: Gebäudeansichten

Typischer Hinterhof (links); typische Straßenfassade (rechts).

Quelle: Google

2.2.6.2 Klima

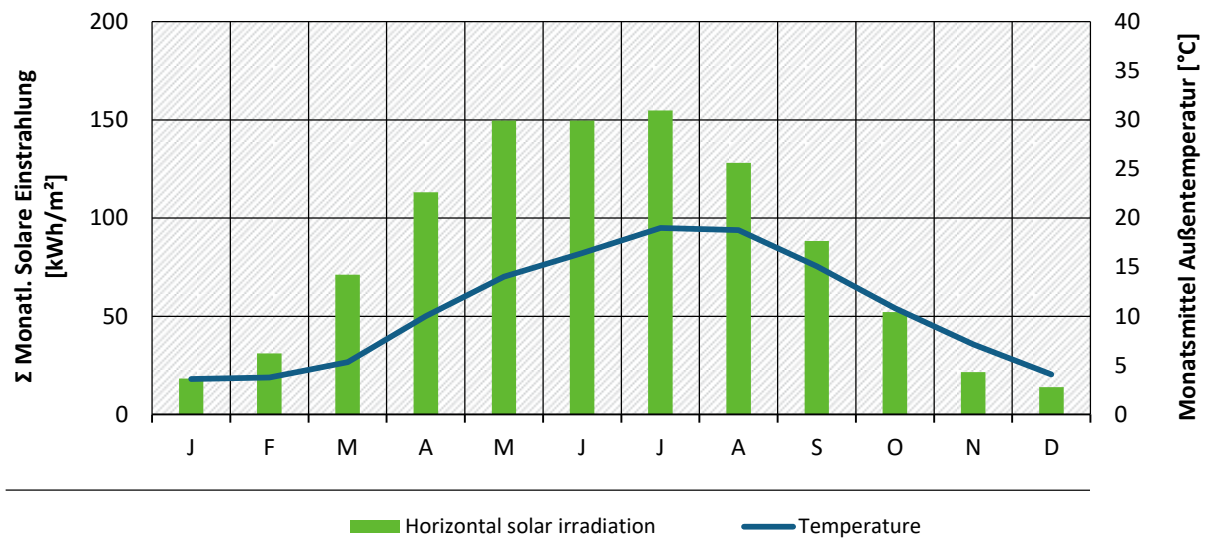
Als Grundlage für die Berechnungen wurden die Referenzklimadaten für den Standort Hamburg⁵³ verwendet. Der Jahresmittelwert der Außentemperatur beträgt demnach 11 °C. Die Monatsmittelwerte der Außentemperatur liegen im Bereich von ca. 4 °C (Januar) bis 19 °C (Juli). Die sommerlichen Spitzenwerte erreichen knapp über 30 °C.

Abbildung 81: Monatswerte der Außentemperatur Hamburg

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Die jährliche Globalstrahlung beträgt 967 kWh/m²a. Sie ist im Juli mit ca. 150 kWh/m² am höchsten und im Dezember mit ca. 14 kWh/m² am geringsten.

⁵³ Quelle: Meteonorm Software, Version 7, aktuellster Wetterdatensatz (Periode 2000-2009)

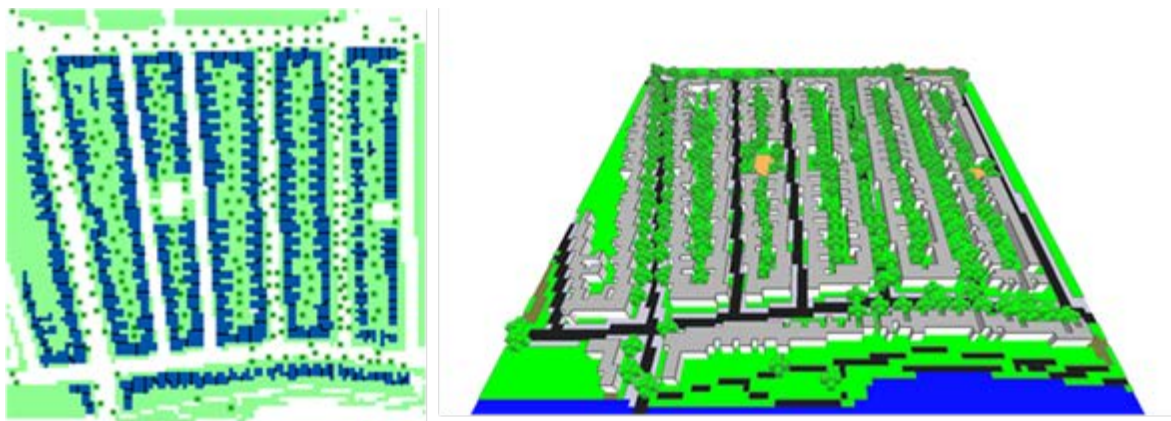
Abbildung 82: Monatswerte der Globalstrahlung und Außentemperatur Hamburg

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

2.2.6.3 Mikroklimasimulation

2.2.6.3.1 Variante Ist-Zustand

Das Untersuchungsgebiet Eimsbüttel – Generalsviertel liegt im Nordwesten der Stadt Hamburg. Es handelt sich dabei um ein Bestandsquartier mit Mehrfamilienhäusern. Das Gebiet wurde entsprechend der aktuellen Bebauung mit umfangreichem altem Baumbestand zwischen den Gebäuden digitalisiert. Die Materialien der Gebäude entsprechen der in Kapitel 2.2.6.4 beschriebenen Bauweise.

Abbildung 83: Modellgebiet des Generalsviertels (Status Quo) in Hamburg als Aufsicht und 3D-Ansicht.

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.6.3.2 Ergebnisse Mikroklimasimulationen Ist-Zustand

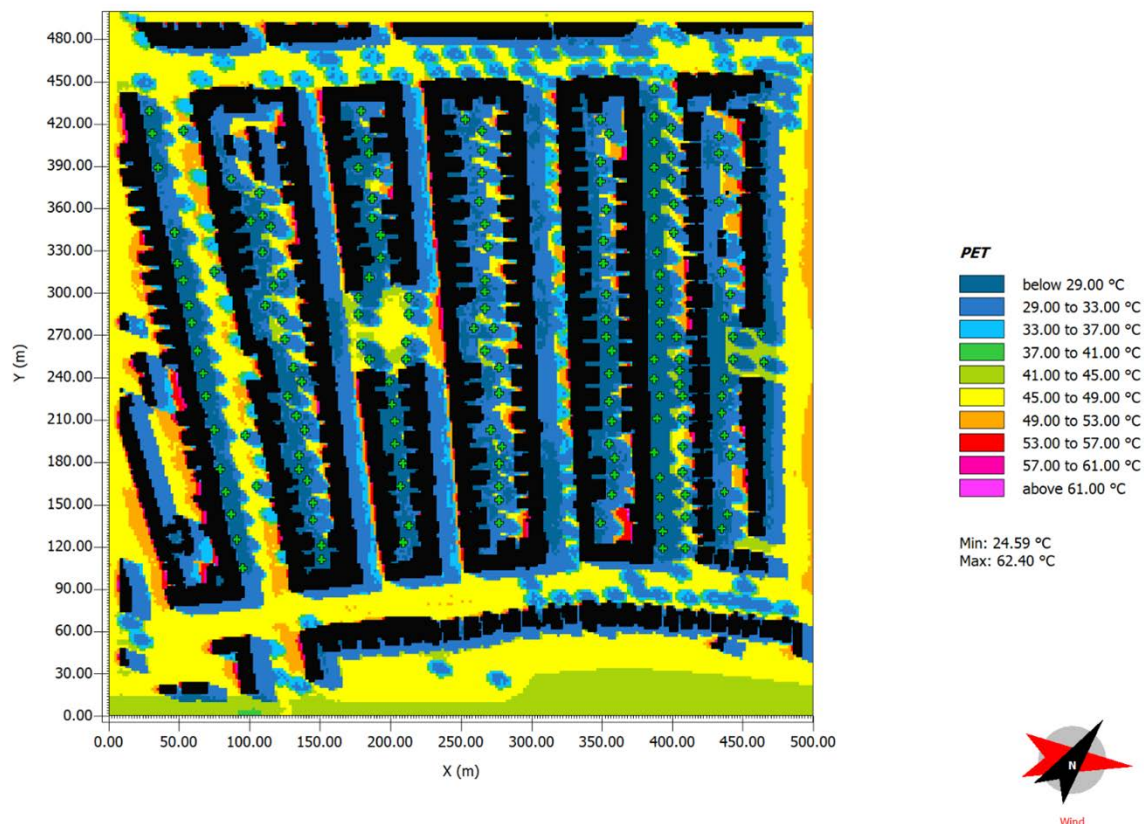
Die Tafel_4_a_Hamburg_SQ und Tafel_4_c_Hamburg_Detail im Anhang A.3 geben eine Übersicht über die Verteilung der Lufttemperaturen im Jahresverlauf. Das Untersuchungsgebiet wird durch die großen Blockrandbebauungen mit nur vereinzelt Öffnungen und Unterbrechungen dominiert. Entsprechend differenziert stellt sich hierdurch das Mikroklima innerhalb der Innenhöfe im Vergleich zum Straßenraum dar.

Sowohl am Nachmittag als auch in der Nacht sind die umgebenden Straßenbereiche deutlich wärmer als die Innenhöfe. Dieser Effekt wird nochmals verstärkt, wenn man die hochauflösenden Simulationen betrachtet (Anhang A.3, Tafel_4_c_Hamburg_Detail). In diese wurde im Nordwesten noch eine zusätzliche Gebäudereihe mit in das Modellgebiet aufgenommen, wodurch auch hier eine beidseitig geschlossene Bebauung entsteht. Vor allem im Sommer zeigt sich ein deutlicher Kontrast zwischen der Aufheizung der beiden Hauptstraßenachsen mit Südwest-Nordost Ausrichtung einerseits und den Südost-Nordwest ausgerichteten Straßen zwischen den Gebäudeblöcken andererseits.

Die Durchlüftung der Innenhöfe ist aufgrund der geschlossenen Bebauungsstruktur bei jeder Windrichtung schlecht. Die Windgeschwindigkeiten sind hier nahe Null (vgl. Anhang A.3Tafel_4_c_Hamburg_Detail oben). Nicht zu vernachlässigen ist jedoch auch der Umstand, dass eine geschlossene Blockrandbebauung einen guten Lärmschutz darstellt und die Innenhöfe dadurch akustisch einen angenehmen Aufenthaltsbereich bieten (Preuß et al. 2020).

Im Sommer liegen die Lufttemperaturen um 16:00 Uhr in den Innenhöfen in etwa 2-3 K unter den Lufttemperaturen in den angrenzenden Straßen, was im Wesentlichen auf den Schattenwurf der Gebäude sowie des Baumbestands in den Höfen zurückzuführen ist. In den Nachtstunden im Sommer kann man noch immer eine Temperaturreduktion um knapp 1 K feststellen, was eine deutliche Reduzierung der Wärmebelastung der schlafenden Anwohner bedeuten kann. Allerdings kann durch die fehlende Windzirkulation das Eindringen der kühleren Luft in die Gebäude stark beeinträchtigt werden.

Abbildung 84: Verteilung des PET-Wertes in Hamburg am 09. Juli um 16:00 Uhr für den Status Quo



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

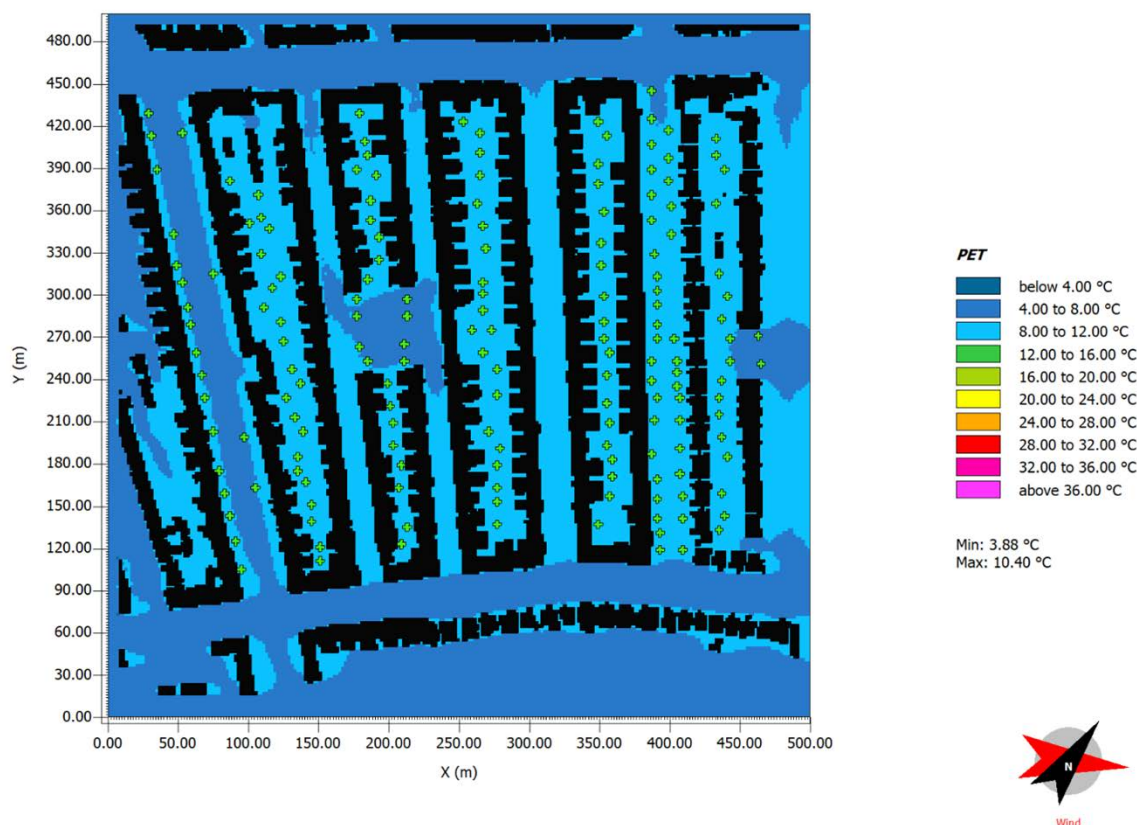
In Abbildung 84 ist die Verteilung des PET-Wertes im Untersuchungsgebiet dargestellt. Wie deutlich zu sehen ist, unterteilt sich das Gebiet in besonnte Bereiche mit einer PET um 45 °C

(„heiß“ bis „sehr heiß“) und beschattete Bereiche mit einer PET um 29 °C („komfortabel“ bis „leicht warm“). Durch die großen Unterschiede zwischen besonnten und verschatteten Bereichen lässt sich der Einfluss der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit auf den PET-Wert lediglich erahnen.

Aufgrund der großzügigen Beschattung der Innenhofbereiche sowohl durch die Blockrandbebauung als auch den Baumbestand kann man den thermischen Komfort im dortigen Außenbereich als gegeben ansehen. Weitere Maßnahmen zur Beschattung oder Veränderungen in den Materialeigenschaften würden zu wenigen bis keinen Veränderungen im thermischen Empfinden im Außenbereich führen.

In Abbildung 85 ist die Verteilung des PET-Wertes im Untersuchungsgebiet im Januar um 16:00 Uhr dargestellt. Das thermische Empfinden reicht von „kalt“ bis „kühl“ in den Straßenzügen bis „leicht kühl“ in den windgeschützten Innenhöfen.

Abbildung 85: Verteilung des PET-Wertes in Hamburg am 22. Januar um 16:00 Uhr für den Status Quo



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.6.3.3 Optimierte Variante

Als Optimierungsmaßnahme wurden 60 % der Dachflächen mit Dachbegrünung versehen. Darüber hinaus sind für die Gebäudesimulationen PV-Module (Neigung 10 %) vorgesehen, diese sind jedoch für das Mikroklima nicht relevant und wurden somit in der Simulation nicht berücksichtigt.

Aus Abbildung 84 und den dazugehörigen Ausführungen wurde deutlich, dass eine Optimierung des Mikroklimas in den Innenhöfen durch weitere Beschattung keine nennenswerten Effekte

liefern würde. Da zudem nicht geplant ist, im Baubestand massive Strukturveränderungen durchzuführen, ist die Auswahl an verbleibenden Anpassungsmöglichkeiten limitiert.

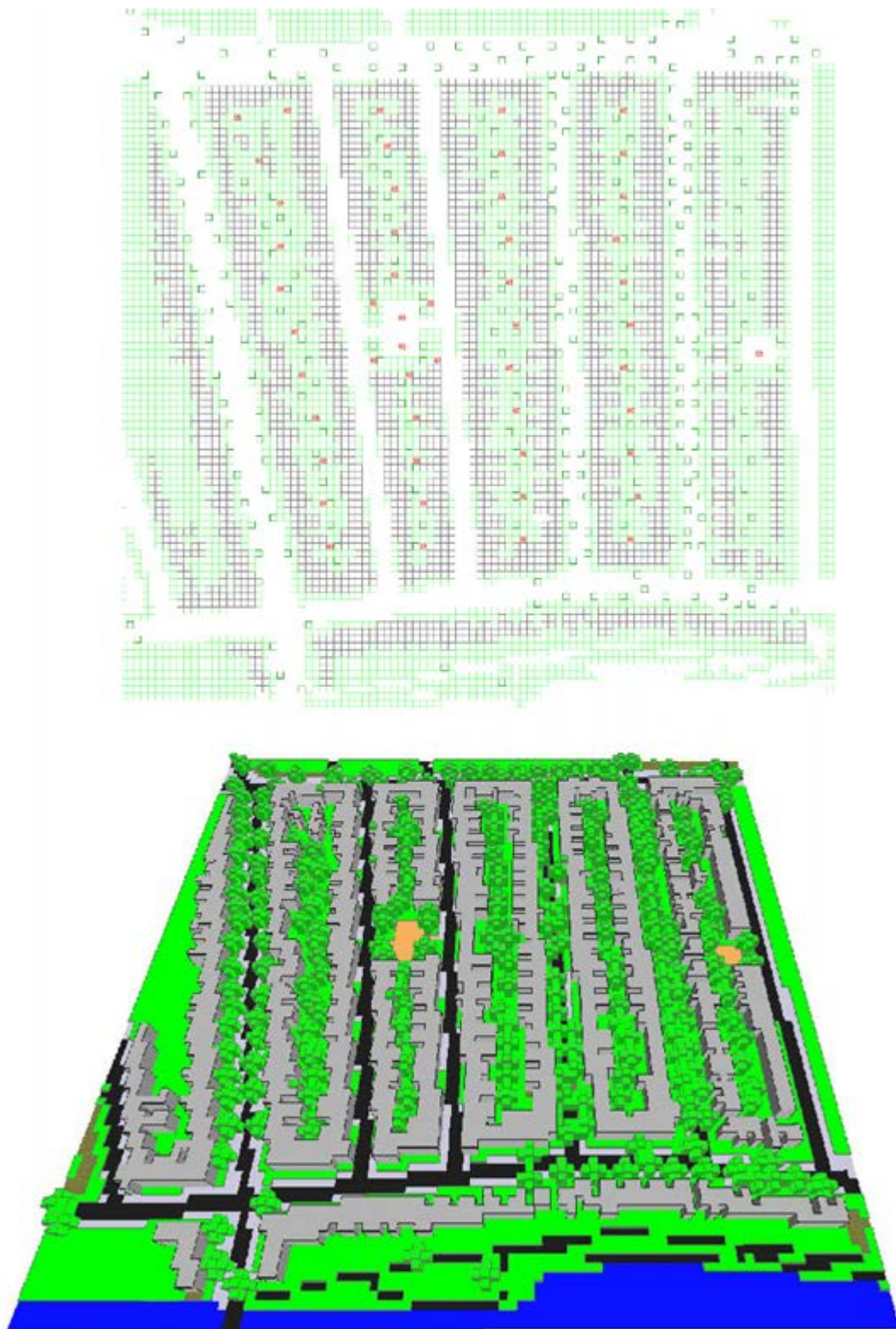
Im Hinblick auf die durch den Klimawandel zu erwartenden Änderungen im Stadtklima ist die generelle Anhebung der Durchschnittstemperaturen der Luft eine kritische Komponente in der Stadtplanung.

Neben der Beschattung ist die Nutzung der Evaporationskühlung (siehe auch Sieker et al. 2019) eine weitere Möglichkeit, Wärmeenergie zu binden und so das Temperaturniveau zu senken. Neben der Maßnahme, Oberflächen zu benetzen und somit zu kühlen, ist das Versprühen von feinen Wassernebeln eine sehr effektive Methode zur Reduzierung der lokalen Lufttemperatur, da die für die Verdunstung der Wassertropfen benötigte Energie direkt der Luft entzogen wird.

Das Modell ENVI_MET erlaubt die hochauflösende Simulation der komplexen Vorgänge einer solchen „Wasserspray“-Verdunstungskühlung in Interaktion mit allen anderen urbanen Elementen und dem Mikroklima (vgl. Di Giuseppe 2021).

Da Hamburg von den untersuchten Städten diejenige Stadt mit der wahrscheinlich geringsten Wasserknappheit ist, wurde die Installation von Wasserverneblungsanlagen in die Optimierungsmaßnahmen mit einbezogen. Die Wasserdüsen stoßen 121 g Wasser pro Sekunde aus, dabei handelt es sich um den maximalen Wert eines Wasserspray-Herstellers. Um den Wasserverbrauch zu optimieren und den Effekt zu maximieren, werden die Wassersprays nur aktiviert, wenn an der Position der Spraydüsen eine Lufttemperatur von 30 °C oder höher vorliegt und die relative Luftfeuchte geringer als 80 % ist. Dies führt dazu, dass bei hohen Temperaturen nicht das gesamte Gebiet heruntergekühlt wird, sondern nur die Teile des Gebietes, in denen dies auch notwendig ist. Abbildung 86 zeigt in der 3D-Ansicht die Positionierung der Wasserspraydüsen im Modellgebiet.

Abbildung 86: Modellgebiet der optimierten Variante als Aufsicht und 3D-Ansicht



Die Position der Wasserspraydüsen ist im oberen Bild mit roten Punkten markiert.

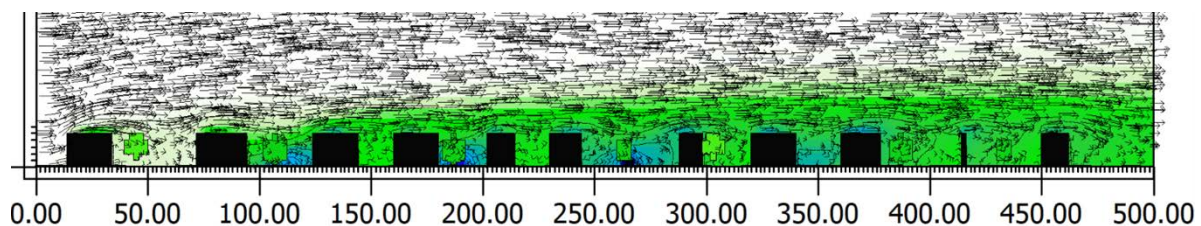
Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.6.3.4 Ergebnisse Mikroklimasimulationen Optimierte Variante

Tafel_4_b_Hamburg_OPT und Tafel_4_c_Hamburg_Detail im Anhang A.3 zeigen die Veränderungen im Mikroklima zwischen der Status Quo-Gestaltung und dem Optimierungsszenario.

Betrachtet man die Monate Januar, März und September so ist davon auszugehen, dass die Wasservernebelungen zu keinem Zeitpunkt aktiv waren (Lufttemperatur $< 30\text{ °C}$). Die beobachteten Effekte sind also auf die Dachbegrünungen zurückzuführen. Obwohl die Umgestaltungsmaßnahmen oberhalb des hier betrachteten Niveaus von 2,1 m liegen, zeigt sich dennoch ein Effekt auch in den tieferliegenden Luftschichten. Durch die Vertikalstruktur des Windfelds mit den Wirbelbildungen hinter den Häusern erfolgt auch eine Einmischung der durch die Dachbegrünungen beeinflussten Luft in die unteren Bereiche. Abbildung 87 zeigt diesen Effekt exemplarisch als X-Z-Schnitt bei $y=369\text{ m}$.

Abbildung 87: Einmischung der an den Dachflächen abgekühlten Luft in die unteren Luftschichten



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

In den Monaten März und September kann tagsüber eine leichte Erhöhung der bodennahen Lufttemperaturen durch die Dachbegrünungen beobachtet werden. Dieser Effekt lässt sich einerseits durch die geringere Auskühlung der begrünten Dachflächen erklären. Andererseits wird durch die Dachbegrünung auch die Rauigkeit der Gebäude leicht erhöht, wodurch die Windgeschwindigkeit leicht herabgesetzt wird. Die weiteren kleinen Veränderungen in der Lufttemperatur, sowohl in der Nacht als auch am Tage, sind auf kleine Veränderungen des Windfeldes, hervorgerufen durch die Dachbegrünung, zu erklären und sollten nicht überinterpretiert werden.

Für den Monat Juli wurde das Datum für die Detailsimulation so gewählt, dass die unterschiedlichen Wasserspray-Elemente aktiv wurden.

Die Abkühlungseffekte in der Lufttemperatur im Juli um 16:00 Uhr (siehe Anhang A.3 Tafel_4_b_Hamburg_OPT und Tafel_4_c_Hamburg_Detail) sind sehr deutlich und liegen bei Reduktionen bis zu -2.5 K deutlich über dem, was üblicherweise durch Umgestaltungsmaßnahmen erreicht werden kann.

Durch die starke Abschirmung der Innenhöfe bleibt dieser Effekt jedoch auf den Bereich der Innenhöfe beschränkt. Die umgebenden Gebiete oder Straßen profitieren von dieser Veränderung nicht.

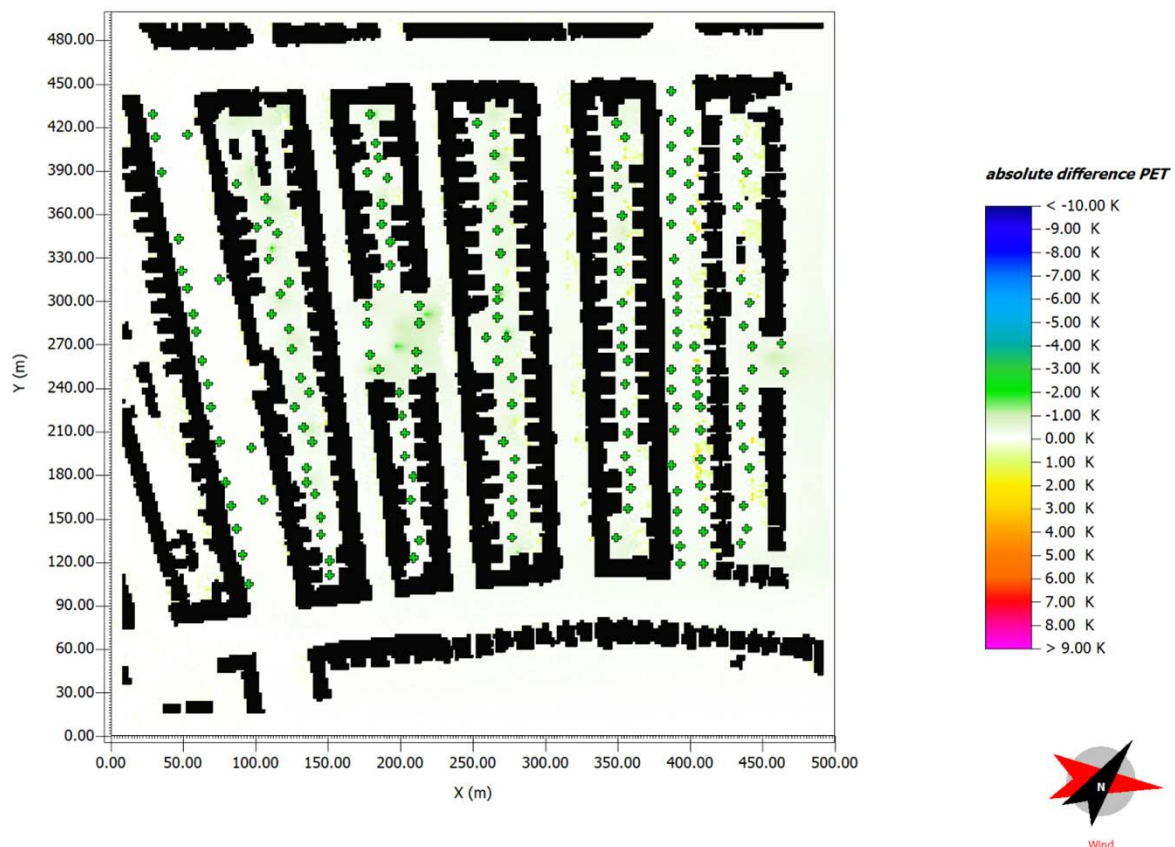
Abbildung 88 zeigt die Differenz des PET-Wertes zwischen dem Status-Quo und der Optimierung. Während die Wasserspray-Elemente eine deutliche Veränderung in der Lufttemperatur erzeugt haben, ist bei der PET-Verteilung kaum ein Effekt zu verzeichnen.

Dies war jedoch zu erwarten: Da bereits in der Ausgangssituation eine hohe Beschattung und damit ein komfortabler PET-Wert im Bereich der Innenhöfe zu verzeichnen war, blieb hier wenig Optimierungspotenzial. Die Lufttemperatur ist bei der Bestimmung des PET-Wertes nach den Strahlungsflüssen und der Windgeschwindigkeit erst ein an dritter von vier Stellen stehender Einflussfaktor. Vor allem in den Tagesstunden, unter der Anwesenheit von direkter

Sonneneinstrahlung, dominiert das Muster aus Sonne und Schatten die PET-Verteilung. Die Veränderungen im PET-Wert entsprechen mehr oder minder den Veränderungen in der Lufttemperatur in Kelvin und sind somit im Planungskontext eher gering.

Bei der Beurteilung der Wirksamkeit von Maßnahmen müssen allerdings auch jene Situationen berücksichtigt werden, in denen bereits die effektivsten Maßnahmen wie Beschattung angewandt wurden. Hier können Instrumente, wie die hier betrachtete direkte Luftkühlung durch Verdunstung, nochmals eine Reduktion der Lufttemperatur erzielen, die so in der PET-Betrachtung erstmal als nachgeordnet erscheinen.

Abbildung 88: Veränderung des PET-Wertes in Hamburg am 09.Juli um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Da bereits im Juli keine signifikante Veränderung der PET beobachtet werden konnte, wird die Differenzendarstellung für den Januar nicht gesondert diskutiert.

2.2.6.3.5 Zusammenfassende Beurteilung

Das Untersuchungsgebiet in Hamburg ist durch eine sehr gut durchgrünte Blockrandbebauung gekennzeichnet, wodurch sich innerhalb der Innenhöfe der Blöcke ein eigenes Mikroklima ausdifferenzieren kann. Dieses ist durch die geringe Windzirkulation sowie die Beschattung durch die Gebäude und Bäume durchweg kühler als die Vergleichssituation in den umgebenden Straßenschluchten. Als Optimierungsmaßnahmen wurde einerseits die Begrünung von Dächern untersucht, andererseits die Installation von Wassersprayelementen.

Letztere werden aktiviert, wenn die lokalen Temperaturen 30 °C übersteigen und führen dann zu einer sehr effektiven Reduzierung der Lufttemperatur um bis zu 2.5 K.

Die Dachbegrünungen verursachen auch auf Fußgängerniveau leichte Veränderungen in der Lufttemperatur. Diese Effekte lassen sich auf eine Veränderung der Dachoberflächentemperaturen einerseits und auf eine leichte Veränderung des Windfeldes durch die veränderte Rauigkeit zurückführen. Sie sind aber gering und für die Interpretation der Optimierungsmaßnahme zu vernachlässigen.

Im Winter ist im Untersuchungsgebiet der Schutz vor Wind eine Option, die thermische Situation im Außenbereich leicht zu verbessern. Allerdings ist aufgrund der Möglichkeit, sich entsprechend zu kleiden, der thermische Komfort im Winter generell einfacher zu erzielen als im Sommer. Ein Verweilen im Außenbereich ist im Januar in Hamburg ohnehin als unwahrscheinlich einzustufen.

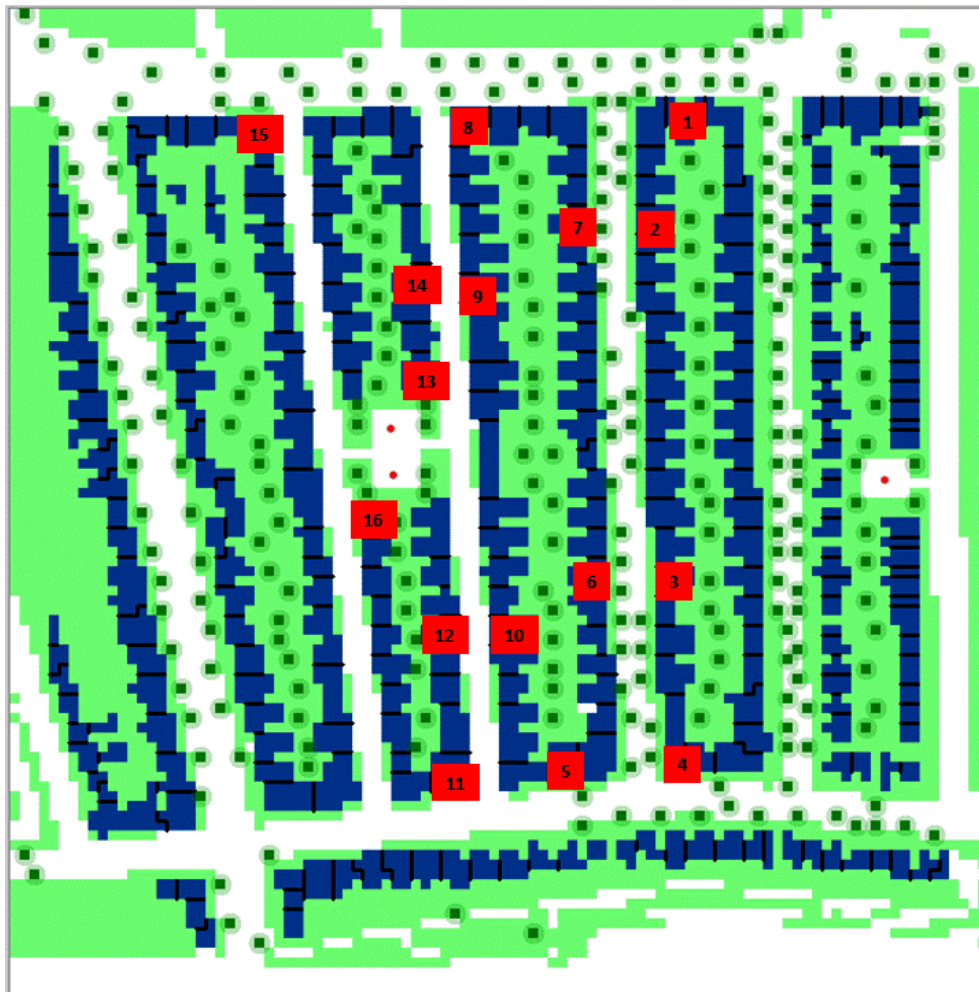
2.2.6.4 Gebäudesimulation

2.2.6.4.1 Das Simulationsmodell

Das Auswertungsgebiet besteht überwiegend aus einer geschlossenen Blockrandbebauung, die hinsichtlich Geometrie und Bauphysik als ähnlich angenommen werden kann. Die Auswertungen bezüglich des Verbrauchs und Komforts wurden auf Wohnungsebene durchgeführt.

Als Referenzgeometrie wurde eine Wohnung mit 84 m² Wohnfläche gewählt, die für die Modellierung in zwei Zonen („Wohn- und Esszimmer“ und „Schlaf- und Kinderzimmer“) unterteilt wurde. Die Wohn- und Esszimmer wurden dabei, soweit möglich, immer südlich orientiert.

Die Lage der nach den qualitativen Kriterien „Repräsentativität“ und „Diversität“ zur optimalen Abbildung des Quartiers ausgewählten 48 Wohnungen (16 Orte mit jeweils Dach-, Mittel-, und Erdgeschosswohnung) sind der folgenden Abbildung zu entnehmen.

Abbildung 89: Lage der Referenzwohnungen im Quartier

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse und ENVI_MET

Die Hüllqualitäten der Gebäude im Untersuchungsgebiet wurde entsprechend des ZUB-Katalogs regionaltypischer Materialien (Klauß et al. 2009) gewählt.

Demnach bestehen die Fassaden aus verputzten Vollziegeln und weisen bei einer Gesamtdicke von 38 cm einen U-Wert von $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf.

Für die Dächer (überwiegend Flachdächer) wurde eine leichte Holzbauweise mit 10 cm Dämmung angenommen (Sanierung gegenüber dem Ausgangszustand). Der U-Wert der Dächer beträgt damit $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Auch für die Fenster wurden nicht die Originalfenster, sondern eine Wärmeschutzdoppelverglasung der 1. bzw. 2. Generation mit einem U-Wert von $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem g-Wert von 0,6 angenommen. Für den Boden zum unbeheizten Keller wurde eine massive Konstruktion mit einem U-Wert von $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ angenommen. Weitere Parameter z. B. bzgl. des Heizsystems, der Lüftung und des Sonnenschutzes können der folgenden Tabelle 18 entnommen werden.

2.2.6.4.2 Varianten

Die in den Gebäudesimulationen berücksichtigten Varianten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Die Grundlage bildet dabei die Variante Status Quo 1 (SQ1) die, die aktuelle Situation beschreibt. In der Variante SQ2 werden die Quartiersmaßnahmen zur Verbesserung des Mikroklimas berücksichtigt, wobei die Gebäude selbst als unverändert angenommen werden. Aufbauend auf dieser Variante wurde die Variante Optimiert 1 (Opt1) entwickelt, bei der zur Verbesserung des Innenraumklimas eine sehr gute Dämmung⁵⁴ und ein wirksamer Sonnenschutz (siehe nachfolgende Tabelle) angenommen wurde. Durch die umfangreichen Dämmmaßnahmen können außerdem die Heizsystemtemperaturen erheblich gesenkt werden, so dass zur effektiven Wärmebereitstellung auf gebäudezentrale Monoblock-Luftwärmepumpen mit natürlichem Kältemittel Propan umgestellt werden kann. Zur Vermeidung der Legionellen-Problematik wird das ebenfalls über die zentralen Wärmepumpen erzeugte Warmwasser mittels Wärmeübergabestationen für die einzelnen Wohneinheiten bereitgestellt. Um dabei ein möglichst niedriges Temperaturniveau halten zu können, müssen für die Zapfstellen in den Küchen elektrische Nacherhitzer berücksichtigt werden. In Variante Optimiert 2 können durch die Vorsehung von Unterputzheiz- und -kühlflächen (alternativ sind auch aktive Konvektorheizkörper mit Ventilatoren möglich) die Vorlauftemperaturen weiter abgesenkt werden, was die Systemeffizienz weiter verbessert und eine Kühlung ermöglicht. Darüber hinaus werden bei dieser Variante auch die Dächer so weit wie möglich mit PV-Anlagen belegt (Annahme Belegungsichte: 60 %) und zur Erhöhung des PV-Eigennutzungsanteils entsprechende Batteriespeicher berücksichtigt.

⁵⁴ U-Werte nach Sanierung: U-Dach=0,1 W/m²K; U-Fenster U=0,95 (g=0,5); U-Gartenfassade =0,2 W/m²K; Straßenfassade unverändert, da unter Denkmalschutz

Tabelle 18: Übersicht der untersuchten Varianten für das Hamburger Quartier

	SQ1	SQ2	Opt1	Opt2	Opt3
Mikroklima	Ist-Zustand	optimiert	Optimiert	Optimiert	Optimiert
Wärmeschutz	Teilsaniert	Siehe SQ1	Energetisch saniert	Siehe Opt1	Siehe Opt1
Heizsystem	Gasbrennwertkessel, Heizkörper mit Auslegungstemperatur 70/ 50°C	Siehe SQ1	Zentralheizungen mit Monoblock-Luftwärmepumpe mit natürlichem Kältemittel Heizkörper mit Auslegungstemperatur 50/ 40°C	Siehe Opt1	Siehe Opt1
Warmwassersystem	Zentral, Zirkulationssystem ⁵⁵	Siehe SQ1	Zentral, Zirkulationssystem mit Wohnungsweiser Wärmeübergabestation	Siehe Opt1	Siehe Opt1
Kühlung	-	-	-	-	-
Belüftung	Fensterlüftung Permanenter Luftwechsel 0,4 1/h zusätzliche Lüftung zur Kühlung im Sommer ⁵⁶	Siehe SQ1	Fensterlüftung: Luftwechsel: 0,25 1/h ⁵⁷ zusätzliche Lüftung zur Kühlung im Sommer, siehe SQ1	Siehe Opt1	Siehe Opt1

⁵⁵ Beim Bestand wurde davon ausgegangen, dass alle zugänglichen Leitungen, wie beim Neubau, gem. aktuellem Anforderungsniveau gedämmt sind.

⁵⁶ Sommerliche (Stoß-) Lüftung bei Raumtemperaturen über 24°C und kühlerer Außentemperatur sowie Anwesenheit der Bewohner: Morgens von 7-8 Uhr einem Luftwechsel von 6 1/h; Zeitraum; Nachmittags/Abends von 16-22 Uhr mit einem Luftwechsel von 4 1/h; Nachtlüftung über gekipptes Fenster im Schlafzimmer von 22-6 Uhr mit einem Luftwechsel von 0,4 1/h

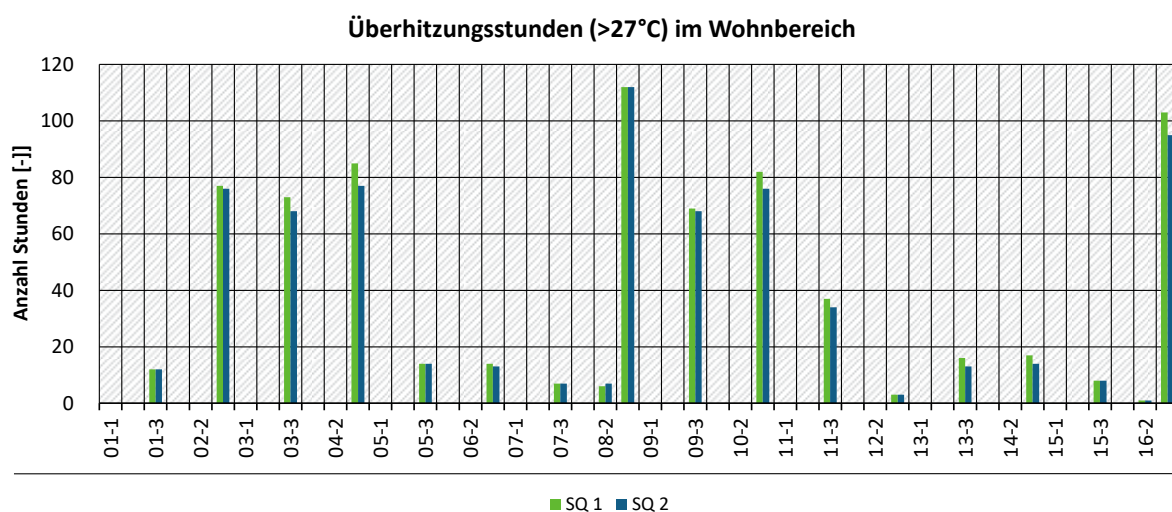
⁵⁷ Reduzierter Luftwechsel durch verbesserte Luftdichtigkeit in Folge der Sanierung

	SQ1	SQ2	Opt1	Opt2	Opt3
Sonnenschutz	Manuell betrieben Straßenseite: Innenliegend (mittlerer fc-Wert: 0,75); Gartenseite Außenliegend (mittlerer fc-Wert: 0,5)	Siehe SQ1	Siehe SQ1	Verbessert und automatisch betrieben Straßenseite: Sonnenschutz im Scheibenzwischenraum (mittlerer fc-Wert: 0,3), Gartenseite: Außenliegend (mittlerer fc-Wert: 0,2)	Siehe Opt2
Erneuerbare Energien vor Ort	-	-	-	-	Dächer zu 60 % belegt mit PV-Modulen (10% Neigung), Batteriespeicher (pro Wohnung: 2,4 kWp Module + 2 KWh Batteriespeicher)

2.2.6.4.3 Ergebnisse

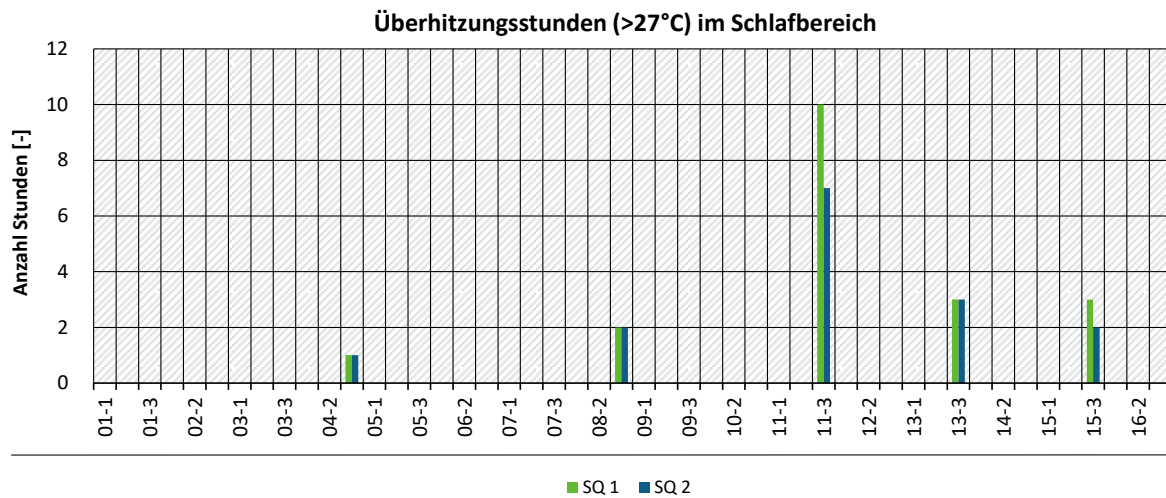
Die Überhitzung der untersuchten Gebäude im Hamburger Quartier ist bereits im Ausgangszustand deutlich geringer als im Kölner oder Frankfurter Quartier und tritt fast ausschließlich in den Dachgeschosswohnungen im Wohnbereich auf (Wohnungen mit den Kennziffern -3 in der folgenden Abbildung). Durch die Maßnahmen zur Optimierung des Mikroklimas im Quartier kann bei einigen Wohnungen eine messbare aber, lediglich kleine Verringerung der Überhitzungsstunden erreicht werden.

Abbildung 90: Vergleich der Überhitzungsstunden der Zone Wohnbereich für die Varianten SQ1 (Ausgangszustand) und SQ2 (Optimiertes Quartier)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

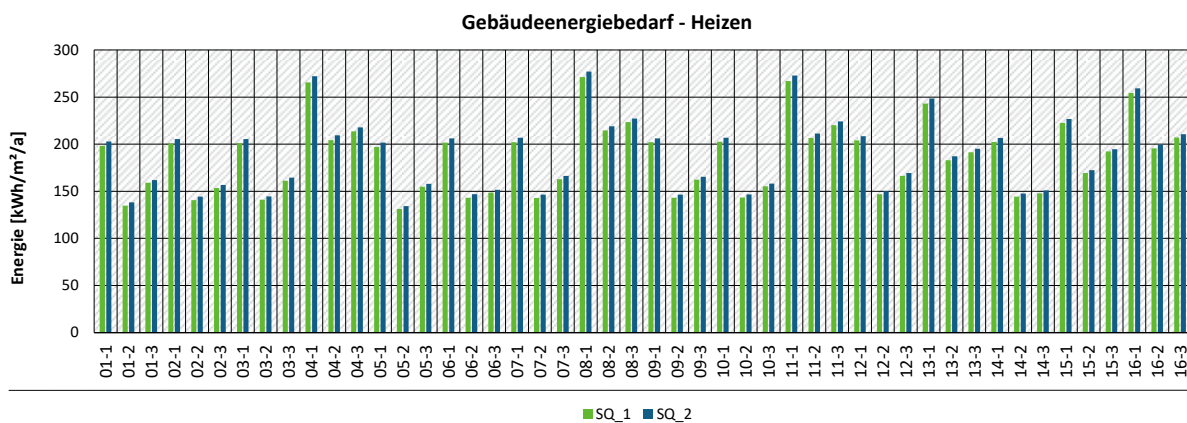
Abbildung 91: Vergleich der Überhitzungsstunden der Zone Schlafbereich für die Varianten SQ1 (Ausgangszustand) und SQ2 (Optimiertes Quartier)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Der dichtere Baumbestand des optimierten Quartiers geht jedoch auch mit einer leichten Erhöhung des Nutzenergiebedarfs für Heizung einher, wie auf der folgenden Abbildung zu erkennen ist.

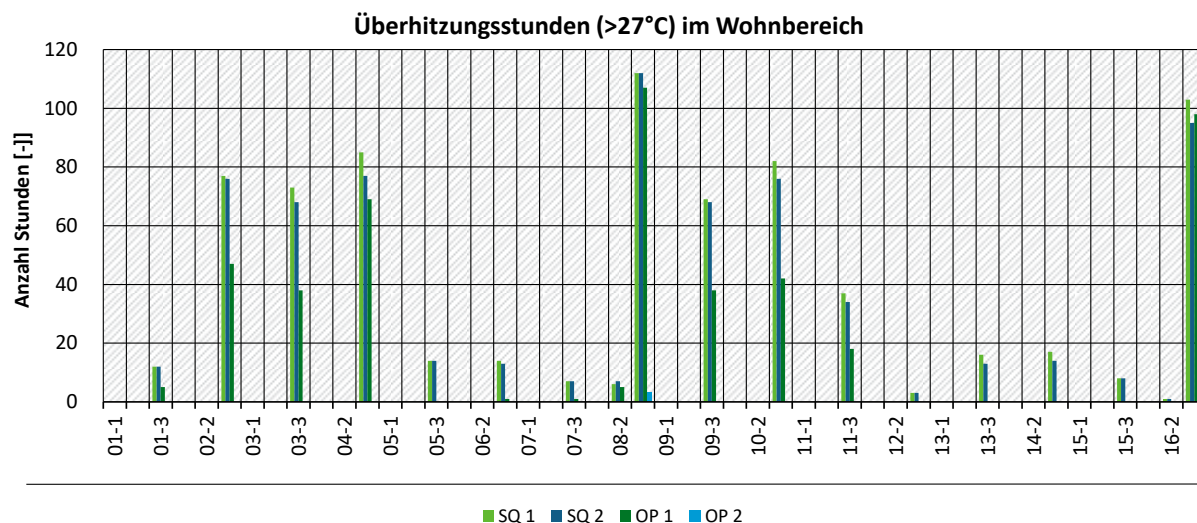
Abbildung 92: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Heizung der Referenzwohnungen der Varianten SQ1 (Ausgangszustand) und SQ2 (Optimiertes Quartier)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Allein durch die Dämmmaßnahmen (siehe Variante Opt1 der folgenden Abbildung) können bereits in vielen Wohnungen die Überhitzungsstunden im Wohnbereich erheblich reduziert bzw. vollständig eliminiert werden. Durch die Verbesserung des Sonnenschutzes (Variante Opt2) ist es schließlich möglich in fast allen Wohnungen ganzjährig die operativen Temperaturen unter 27 °C zu halten.

Abbildung 93: Vergleich der Überhitzungsstunden der Zone Wohnbereich für die Varianten SQ1, SQ2, Opt1 und Opt2

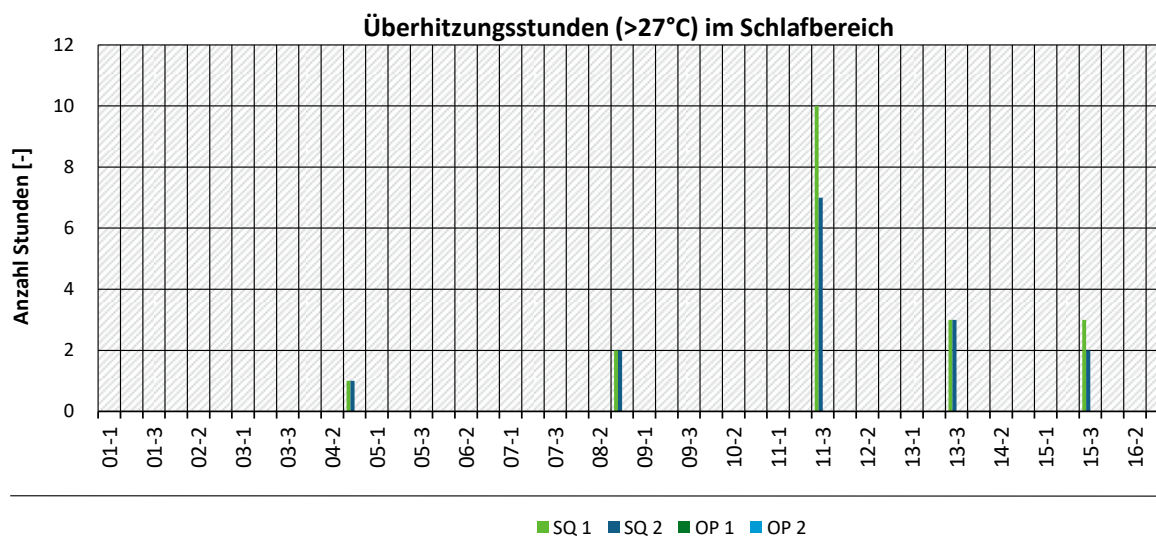


SQ1: Ausgangszustand, SQ2: optimiertes Quartier, Opt1: verbesserte Dämmung und Opt2 zusätzlich verbesserter Sonnenschutz.

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

In den nordorientierten Schlafbereichen kann bereits allein durch die Dämmung eine Überhitzung vermieden werden, wie aus der folgenden Abbildung zu erkennen ist.

Abbildung 94: Vergleich der Überhitzungsstunden der Zone Schlafbereich für die Varianten SQ1, SQ2, Opt1 und Opt2



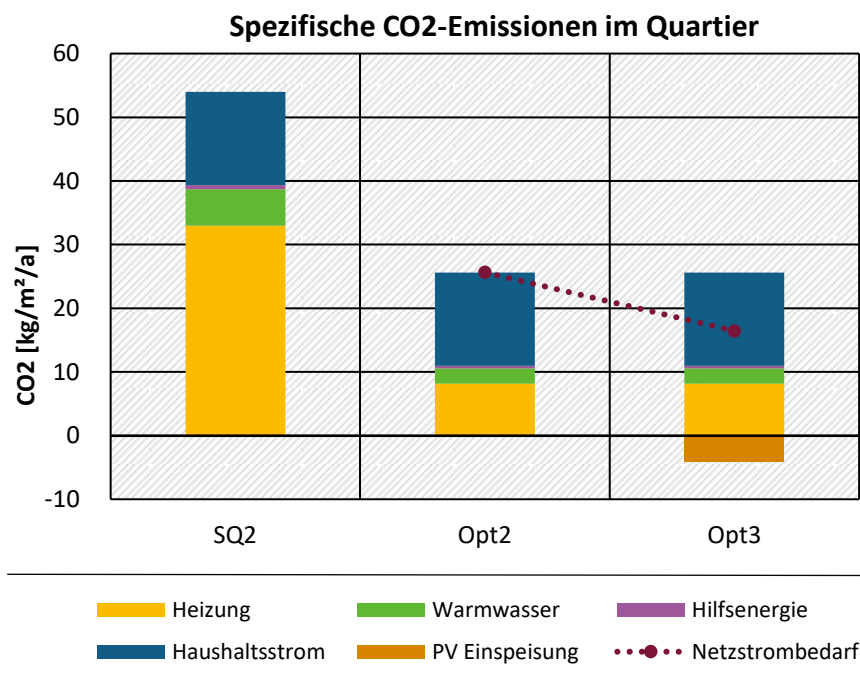
SQ1: Ausgangszustand, SQ2: optimiertes Quartier, Opt1: verbesserte Dämmung, Opt2: zusätzlich verbesserte Dämmung

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Abbildung 95 zeigt einen Vergleich der resultierenden wohnflächenspezifischen CO₂-Emissionen der unterschiedlichen Varianten. Während diese bei der unsanierten Variante SQ2 ohne

Haushaltsstrom knapp $40 \text{ kg/m}^2\text{a}$ betragen, können die CO_2 -Emissionen⁵⁸ durch die beschriebenen energetischen Sanierungsmaßnahmen und die Luftwärmepumpe um fast $\frac{3}{4}$ auf ca. $11 \text{ kg/m}^2\text{a}$ reduziert werden. Durch die Direktnutzung des Stroms aus den PV-Anlagen und Batteriespeichern gemäß Variante Opt3 können die wohnflächenspezifischen CO_2 -Emissionen (inkl. Haushaltsstrom⁵⁹) ausgehend von 26 kg/m^2 um weitere 36 % auf lediglich noch 16 kg/m^2 gesenkt werden. Auch unter Berücksichtigung der rechnerischen Gutschrift durch Einspeisung des überschüssigen PV-Strom von 4 kg/m^2 ist somit jedoch allein aus vor Ort gewonnen erneuerbaren Energien keine vollständige klimaneutrale Versorgung möglich. Der küstennahe windreiche Standort bietet jedoch die Möglichkeit durch die Nutzung von Strom aus nahegelegener Windkraftanlagen die betriebsbedingten CO_2 -Emissionen weiter zu senken.

Abbildung 95: Vergleich der CO_2 -Emissionen einzelner Quartiersvarianten



SQ2: keine Gebäudemaßnahmen; Opt2: verbesserter Wärme- und Sonnenschutz; Opt3: zusätzlich PV und Batteriespeicher

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Unter Berücksichtigung von differenzierten Strom-Emissionsfaktoren, die sowohl für den erzeugten PV-Strom als auch für den Strom für Wärmeerzeugung einen höheren CO_2 -Emissionsfaktor⁶⁰ berücksichtigen, wäre für die Variante Opt 3 ab einem CO_2 -Emissionsfaktor für den Strommix von 444 g/kWh die rechnerisch jahresbilanzielle Klimaneutralität erreicht.

⁵⁸ Berücksichtigter CO_2 -Faktor Strom: $0,474 \text{ g/kWh}$ für Strom; Quelle: Umweltbundesamt 2021 (Wert für 2018; Annahme: Gleiche Werte für Netzbezug und Einspeisung)

⁵⁹ Es wurde ein spezifischer Haushaltsstrombedarf von $31 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ berücksichtigt

⁶⁰ Annahme: 860 g/kWh (Verdrängungsstrommix (GEG 2020)); weitere Hintergründe zum Rechenansatz: Siehe Kapitel 2.2.5.4.3.2

2.2.6.4.3.1 Zusammenfassende Beurteilung

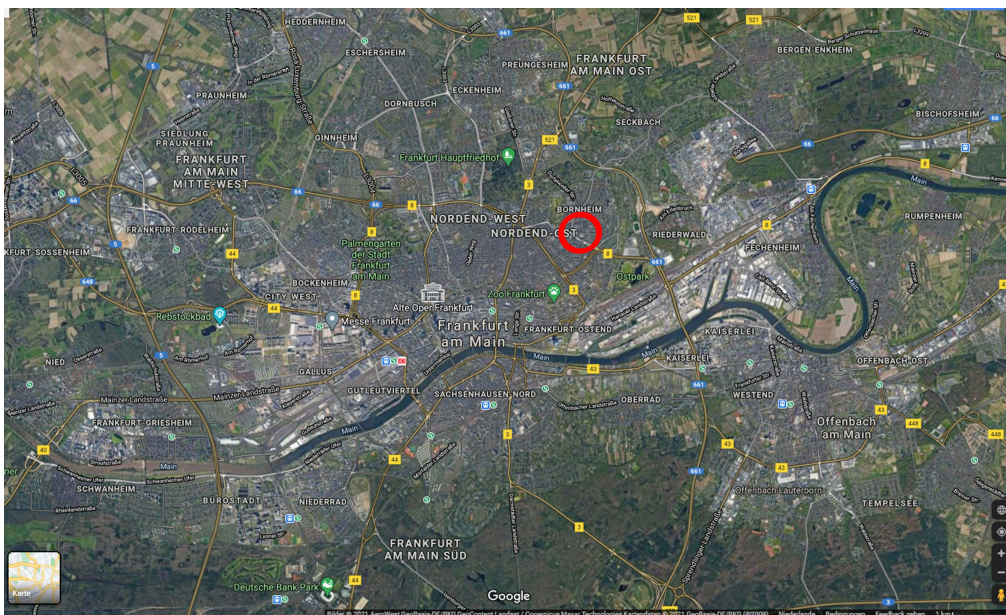
Durch die Optimierungsmaßnahmen im Quartier können die, vor allem in den Dachgeschosswohnungen beobachteten, Überhitzungsstunden ($>27^{\circ}\text{C}$) leicht reduziert werden. Gleichzeitig erhöht sich jedoch auch leicht der Heizwärmebedarf der Wohnungen. Durch eine Verbesserung der energetischen Hüllqualitäten, vor allem aber durch die Vorsehung eines wirksamen Sonnenschutzes, kann in allen Wohnungen ein ausreichender Behaglichkeitskomfort erreicht werden. Durch die gebäudezentrale Wärmeversorgung mit Monoblock-Luftwärmepumpen mit natürlichem Kältemittel und einer 60 %igen Belegung der Dächer mit PV-Anlagen kann unter Berücksichtigung von differenzierten Stromemissionsfaktoren rechnerisch eine jahresbilanziell negative CO_2 -Bilanz erreicht werden, wenn der CO_2 -Emissionsfaktor für den Strommix 444 g/kWh unterschreitet.

2.2.7 Nachverdichtungsquartier Campo Bornheim in Frankfurt am Main

2.2.7.1 Lage und Beschreibung

Das Nachverdichtungsquartier Campo Bornheim befindet sich ca. 2 km nordöstlich des Frankfurter Zentrums.

Abbildung 96: Lage des Quartiers „Campo Bornheim“ in Frankfurt (roter Kreis)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse basierend auf Google (Hintergrund)

Bei dem 2009 umgesetzten Bauvorhaben handelt es sich um die Schließung einer Blockrandbebauung auf einer innerstädtischen Konversionsfläche. Rund um ein altes Straßenbahndepot entstand ein Ensemble aus fünf- bis sechsgeschossigen Baukörpern mit insgesamt 140 Eigentums- und Mietwohnungen, die im Passivhausstandard errichtet wurden. Sowohl die städtebauliche Anordnung der Gebäude als auch ihre Gestaltung und Höhe orientieren sich an der gründerzeitlichen Blockrandbebauung der benachbarten Blöcke.

Darüber hinaus beinhaltete das Projekt sowohl die Wiederherstellung und Rekonstruktion einer denkmalgeschützten Wagenhalle und ihre Umnutzung zu einem Supermarkt als auch die Wiederherstellung eines denkmalgeschützten Wohngebäudes.

2013 wurde das Projekt mit dem "Green Building Award" der Stadt Frankfurt am Main ausgezeichnet.

Abbildung 97: Lage des Untersuchungsgebietes (rotes Rechteck)



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse basierend auf Google (Hintergrund)

Die folgenden Abbildungen zeigen die westliche Blockrandbebauung mit fünfgeschossigen Bestandsgebäuden und die nördliche mit überwiegend sechsgeschossigen Neubauten.

Abbildung 98: Ansicht Blockrandbebauung Bestandsgebäude



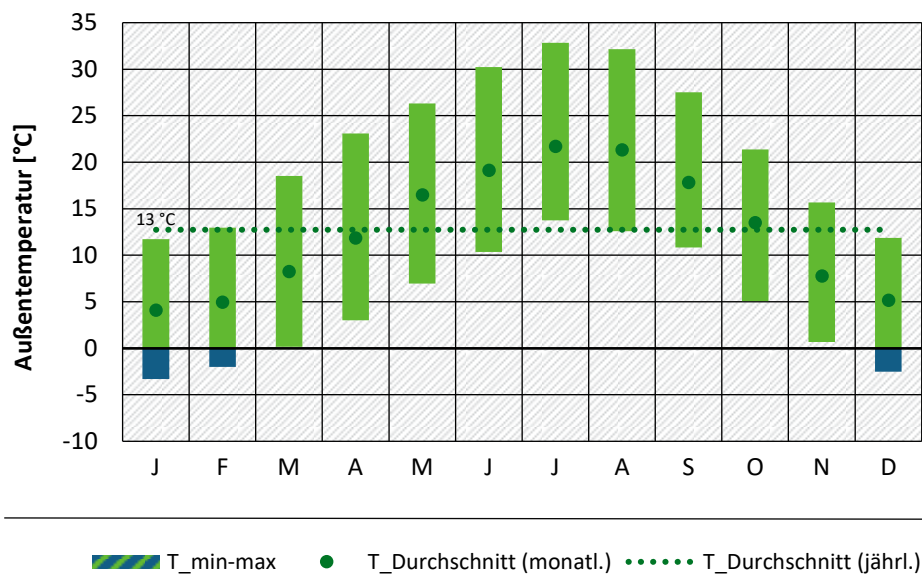
Quelle: Google

Abbildung 99: Ansicht Neubauten

Quelle: Google

2.2.7.2 Klima

Abweichend zu den Untersuchungen der anderen Quartiere wurde für diesen im deutschlandweiten Vergleich bereits sehr heißen Standort nicht das aktuelle Klima (meteonorm 7, 2020)⁶¹, sondern das für den Standort Frankfurt erwartete Klima im Jahr 2050⁶² verwendet. Es finden bei den Mikroklima- und Gebäudesimulationen an diesem Standort daher auch die Auswirkungen des Klimawandels Berücksichtigung. Der Jahresmittelwert der Außentemperaturen beträgt demnach 13 °C. Die Monatsmittelwerte der Außentemperatur liegen im Bereich von ca. 4 °C (Januar) bis 22 °C (Juli). Die sommerlichen Spitzenwerte erreichen knapp 33 °C.

Abbildung 100: Monatswerte der Außentemperatur Frankfurt (Prognosewerte für 2050)

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

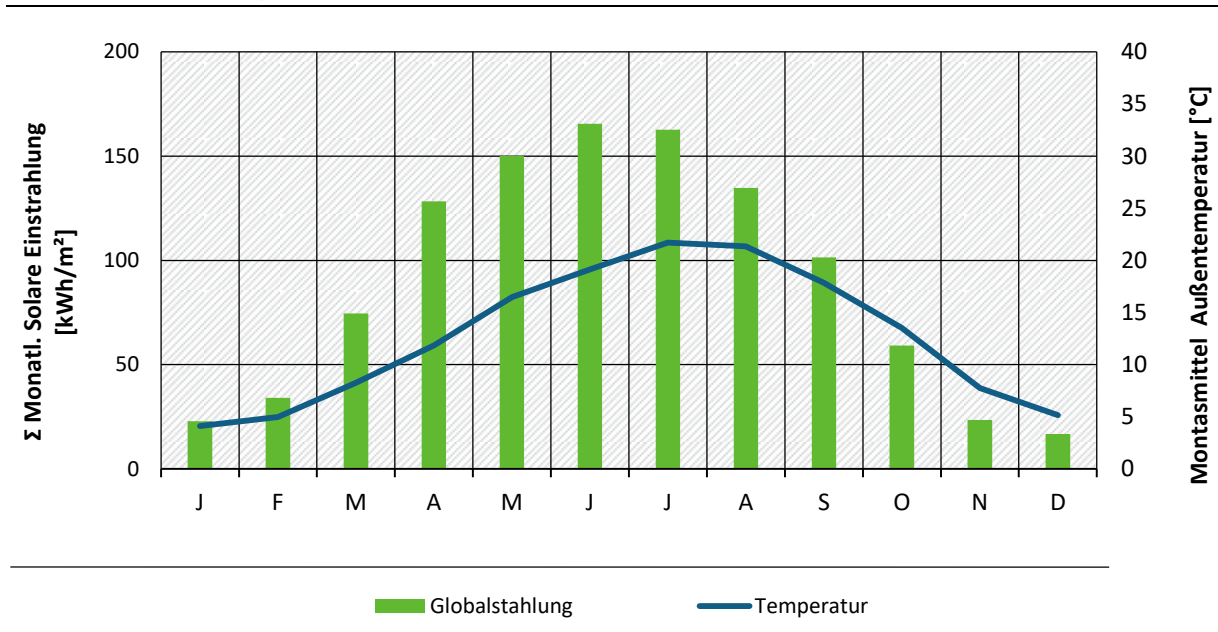
Die jährliche Globalstrahlung beträgt 1074 kWh/m²a. Die Monatssummen der Globalstrahlung erreichen ihren Spitzenwert von 166 kWh/m²a im Juni. In den Wintermonaten November bis

⁶¹ Quelle: Meteonorm Software, Version 7, aktuellster Wetterdatensatz (Periode 2000-2009)

⁶² IPCC-Szenario B1 (+2,8 °C gegenüber vorindustriellem Niveau)

Januar werden nicht einmal 25 kWh/m²a (d. h. weniger als 15 % des sommerlichen Spitzenwertes) erreicht.

Abbildung 101: Monatswerte der Außentemperatur und Strahlung Frankfurt (Prognosewerte für 2050)



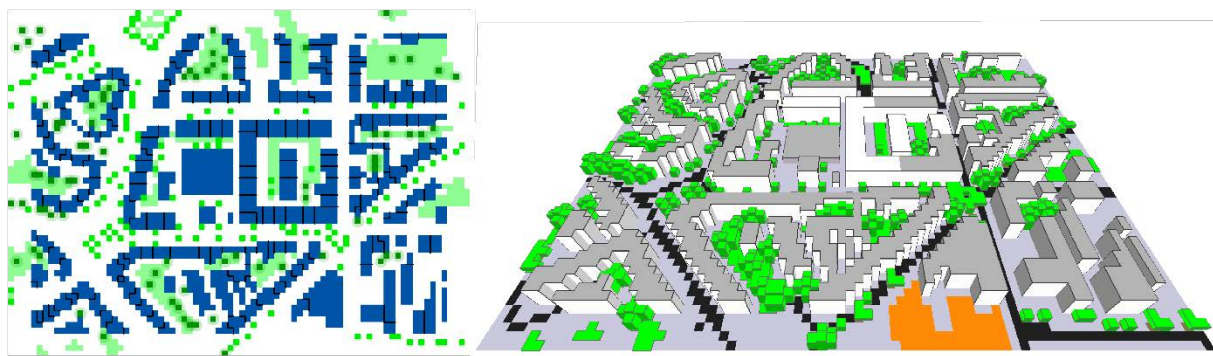
Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

2.2.7.3 Mikroklimasimulation

2.2.7.3.1 Variante Ist-Zustand

Das untersuchte Quartier nordöstlich der Altstadt von Frankfurt am Main ist ein typischer stark verdichteter Innenstadtbereich, welcher als kritisches Überwärmungsgebiet einzustufen ist. Es besteht aus Eigentums- und Mietwohnungen sowie einer denkmalgeschützten Wagenhalle, die zu einem Supermarkt umfunktioniert wurde.

Abbildung 102: Modellgebiet in Frankfurt (Status Quo) als Aufsicht und 3D-Ansicht



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

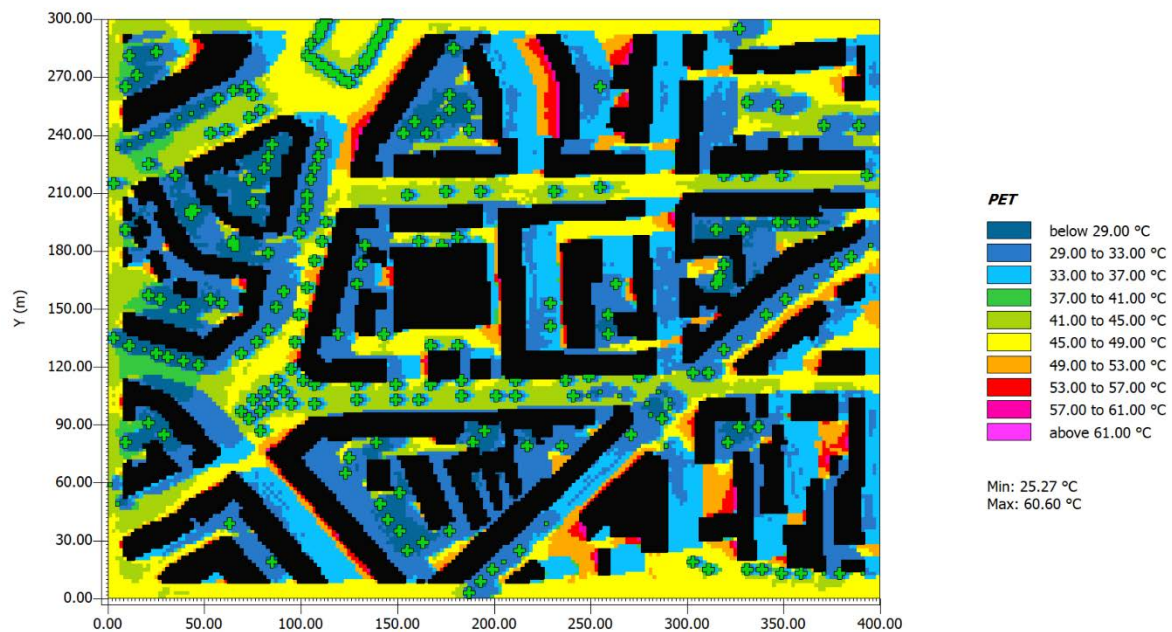
2.2.7.3.2 Ergebnisse Mikroklimasimulation Ist-Zustand

Das Mikroklima im Untersuchungsgebiet zeigt eine für Blockrandbebauungen typische Differenzierung zwischen den Straßenbereichen und den Innenhöfen (siehe Anhang A.3 Tafeln Tafel_5_a_Frankfurt_SQ und Tafel_5_c_Frankfurt_Detail). Durch die höhere Auflösung der

Detailsimulationen treten die hierbei entstehenden Strukturen etwas deutlicher zu Tage als in den gröber aufgelösten Übersichtssimulationen.

Im Frühjahr und Sommer sind die Innenhöfe sowohl tagsüber als auch nachts etwas kühler als die umgebenden Straßenbereiche. Da die Bebauungsstruktur jedoch relativ inhomogen ist, lassen sich keine deutlichen Muster identifizieren. Im Sommer beträgt die Spanne der Lufttemperatur am Tage zwischen den wärmsten und den kühlgsten Bereichen knapp 1,5 K, zu den übrigen Jahreszeiten knapp 1 K. In den Nachtstunden reduziert sich die Temperaturspanne auf unter 1 K und sollte daher nicht überinterpretiert werden.

Abbildung 103: Verteilung des PET-Wertes in Frankfurt am 01. Juli um 16:00 Uhr für den Status Quo

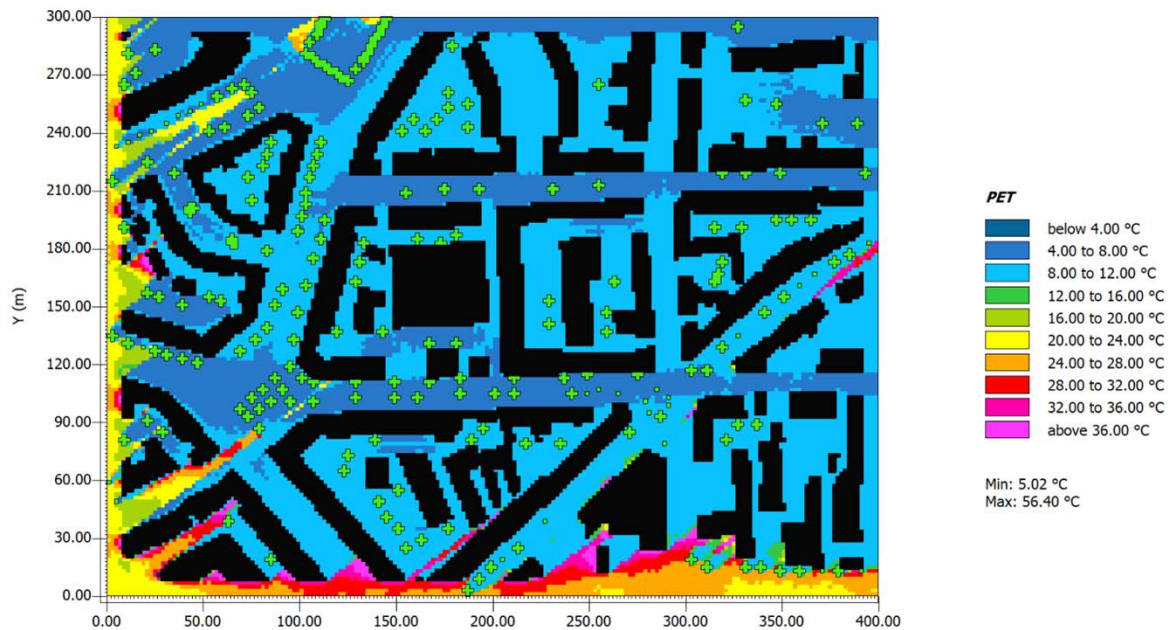


Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Abbildung 103 zeigt die Verteilung des PET-Wertes um 16:00 Uhr im Juli. Je nach lokaler Windgeschwindigkeit liegen die PET-Werte in den Schattenbereichen zwischen 29 und 35 °C, also im leicht warmen bis warmen Empfindungsbereich. In den unbeschatteten Zonen sind Werte um die 46 °C zu finden, die lokal in den windschwachen Zonen im Norden und in der Nähe von Fassaden bis auf ca. 55 °C ansteigen. All diese Bereiche sind der „sehr heißen“ Empfindungsstufe zuzuordnen.

Der thermische Komfort im Januar um 16:00 Uhr (Abbildung 104) ist durch eine nahezu vollständige Beschattung des Untersuchungsgebiets gekennzeichnet. Lediglich an den Modellrändern und der nordwestlichen Straße können die Sonnenstrahlen das Fußgängerniveau erreichen. Die Modellränder sind hierbei Artefakte, die durch das Ende des Simulationsgebiets entstehen und dadurch keine verwertbaren Daten liefern. Die winddurchströmten Straßenbereiche weisen einen PET von knapp 7 °C auf, sind also dem „kühlen“ thermischen Empfinden zuzuordnen. In den windgeschützteren Bereichen ist der PET marginal höher mit Werten um die 9 °C, was formal dem „leicht kühlen“ Bereich zuzuordnen wäre, qualitativ aber keinen relevanten Unterschied macht.

Abbildung 104: Verteilung des PET-Wertes in Frankfurt am 22. Januar um 16:00 Uhr für den Status Quo

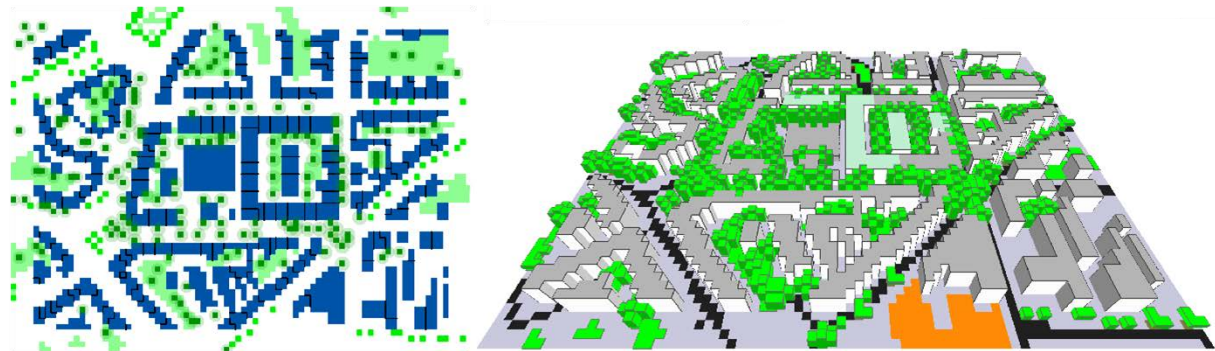


Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.7.3.3 Optimierte Variante

Für die mikroklimatischen Optimierungen wurden im Modell keine Veränderungen an der Bebauungsstruktur vorgenommen. Somit wurden als wesentliche Maßnahmen die Begrünung durch große, schattenwerfende Bäume sowohl in den Innenhöfen als auch im Straßenraum geplant (vgl. Abbildung 105). Des Weiteren wurden die vorhandenen Flachdächer begrünt. Wie auch bei den vorherigen Mikroklimasimulationen wurden die Photovoltaikanlagen auf den Dächern nicht berücksichtigt.

Abbildung 105: Modellgebiet der optimierten Variante als Aufsicht und 3D-Ansicht



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

2.2.7.3.4 Ergebnisse Mikroklimasimulation Optimierte Variante

Tafel_5_b_Frankfurt_OPT und Tafel_5_c_Frankfurt_Detail zeigen die Lufttemperaturen der optimierten Variante im Vergleich zum Status Quo.

Durch den intensiven Einsatz von großkronigen Bäumen lassen sich zwei typische mikroklimatologische Effekte beobachten: Während der Nachtstunden sowie im Winter und Frühjahr auch um 16:00 Uhr dominiert der schützende Effekt der Baumkronen und es lässt sich

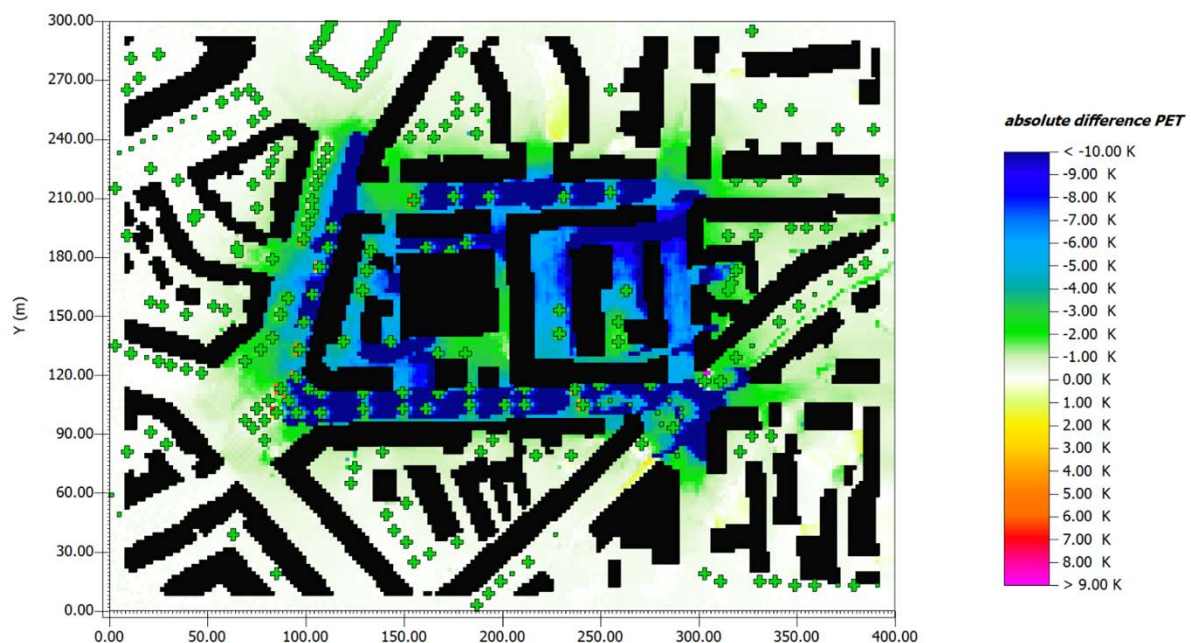
eine leichte Erhöhung der Lufttemperatur feststellen. Dieses wird durch die Modifikation der langwelligen Strahlungsbilanz, dem sogenannten „Biergarteneffekt“ hervorgerufen. Die Wärmestrahlung der Bodenoberfläche wird hier zum Teil von den Ästen und Blättern der Bäume abgefangen und wieder zum Boden zurückgestreut. Dieser Effekt entsteht auch im Winter wenn die Bäume zwar unbelaubt sind, aber durch die Äste immer noch eine ca. 30 %ige Verdeckung des Himmels erfolgt. Zu diesem Effekt addiert sich zudem die Wirkung der Bäume als Windhindernis.

Der Biergarteneffekt kann in den Sommermonaten potenziell dem Ziel, die thermische Situation im Untersuchungsgebiet zu verbessern, entgegenstehen. Tatsächlich lässt sich auch im vorliegenden Beispiel feststellen, dass in den frühen Morgenstunden im Juli die Lufttemperatur in den begrünten Bereichen ca. 0,5 K höher liegt als im Status Quo-Fall (vgl. Anhang A.3 Tafel_5_c_Frankfurt_Detail).

Während des Tages dominiert im Sommer jedoch ein deutlich positiver Effekt der Umgestaltung, der zu einer Reduzierung der Lufttemperatur bis zu 2 K und mehr führt. Allerdings ist dieser Effekt aufgrund der schlecht durchströmbaren Blockstruktur lokal ungefähr auf jene Bereiche beschränkt, in denen eine Begrünung vorgenommen wurde, die Fernwirkung ist sehr eingeschränkt.

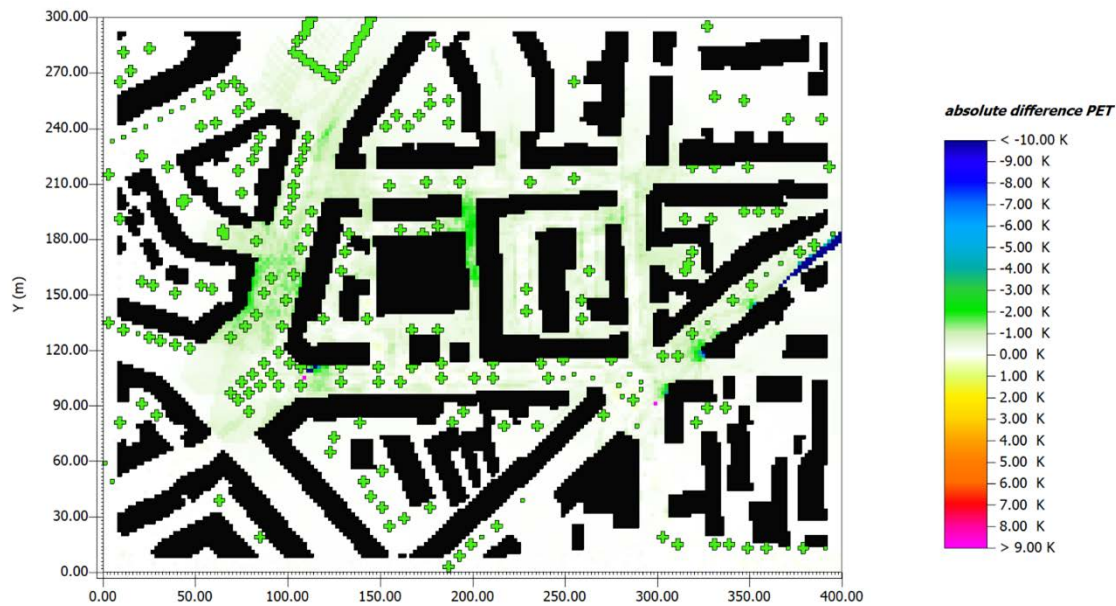
Die Veränderung des PET-Wertes im Untersuchungsgebiet (Abbildung 106) unterstreicht nochmals die vorherigen Aussagen. Hier tritt der Schattenwurf zwar als dominierendes Element in den Vordergrund, aber auch die Reduzierung der Lufttemperatur macht sich analog in einer Reduzierung des PET um 2 bis 3 K in den unbeschatteten Bereichen bemerkbar.

Abbildung 106: Veränderung des PET-Wertes in Frankfurt am 01. Juli um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

Abbildung 107: Veränderung des PET-Wertes in Frankfurt am 22. Januar um 16:00 Uhr durch die Optimierungsmaßnahmen



Quelle: Eigene Darstellung, ENVI_MET

In Abbildung 107 ist die Veränderung des PET-Wertes am 22. Januar durch die Optimierungsmaßnahmen dargestellt. Da, wie bereits bei der Betrachtung des Status Quo erläutert, das gesamte Untersuchungsgebiet um 16:00 Uhr bereits beschattet ist, zeigt sich kein großer Unterschied in der PET-Verteilung zwischen dem Status Quo und dem optimierten Quartier. Es lassen sich lediglich minimale Veränderungen ablesen, die auf kleinere Modifikationen des Windfelds zurückzuführen sind.

2.2.7.3.5 Zusammenfassende Beurteilung

Im Untersuchungsgebiet in Frankfurt lag der Fokus auf dem Einsatz von großkronigen Straßenbäumen sowie Dachbegrünungen zur Reduzierung der Hitzebelastung im Jahr 2050 unter der Annahme des IPCC-Szenarios B1. Für die Tagesstunden im Sommer konnte eine Reduzierung der Lufttemperatur bis zu 3 K erreicht werden, was einer Neutralisierung des für Frankfurt prognostizierten Temperaturanstiegs bis 2050 entspricht. Für den Winter, das Frühjahr sowie die sommerlichen Nachtstunden führt der Einsatz von großkronigen Bäumen zu einer leichten lokalen Erhöhung der Lufttemperaturen durch die schützende Wirkung der Äste und Blätter. Hier muss im konkreten Planungsfall überprüft werden, ob ein möglicher Wärmestau gegebenenfalls durch alternative Anordnungen der Bäume verhindert werden kann.

In dicht bebauten Gebieten wie in Frankfurt liegt der Großteil des Stadtgebiets im Winter in den Nachmittagsstunden bereits im Schatten der Häuser. Zusätzlich eingeführte Beschattungselemente wie in diesem Falle die großkronigen Bäume haben daher im Winter keinen Effekt auf den thermischen Komfort.

2.2.7.4 Gebäudesimulation

2.2.7.4.1 Das Simulationsmodell

Bei den Gebäudesimulation wurden hinsichtlich Bauphysik zwei Grundgebäudetypen unterschieden: Bestandsgebäude und Neubauten.

Für die Bestandsgebäude wurde auf der Grundlage des ZUB-Kataloges für Bestandsgebäude (Klauß et al. 2009) eine massive Bauweise mit verhältnismäßig hohen thermischen Speichermassen angenommen. Demnach bestehen die Fassaden aus verputzten Vollziegeln mit einem U-Wert von $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für die Dächer (überwiegend Satteldächer in Sparrendachkonstruktion) wurde eine Dämmung von 10 cm berücksichtigt (Klauß et al. 2009)). Der U-Wert des oberen Gebäudeabschlusses beträgt damit $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für die Fenster wurde eine Wärmeschutzdoppelverglasung der 1. Generation mit einem U-Wert von $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem g-Wert von 0,6 angenommen. Für den Boden zum unbeheizten Keller wurde eine massive Konstruktion mit einem U-Wert von $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ berücksichtigt.

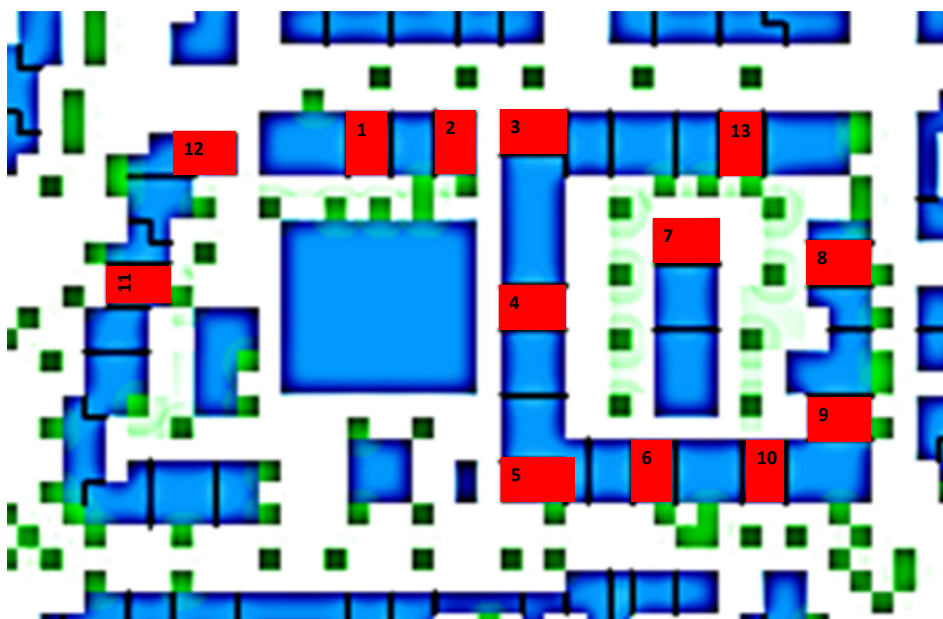
Für die Neubauten wurde im Ausgangsfall, abweichend zur tatsächlichen Umsetzung, ein Effizienzhaus 55-Standard berücksichtigt. Dementsprechend wurde für die Fassaden eine monolithische Bauweise aus leichtem Porenbeton mit einem U-Wert von $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ angenommen. Für die Flachdächer wurde eine Konstruktion aus Innenputz, 20 cm Beton, 24 cm Dämmung und Abdichtung mit einem resultierendem U-Wert von $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ vorausgesetzt. Für den Boden wurde eine massive Konstruktion mit einem U-Wert von $0,25 \text{ W/m}^2$, für die Fenster eine Dreifachverglasung mit einem U-Wert von $0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ berücksichtigt. Gegenüber den Bestandsgebäuden ist der Anteil der Fensterflächen an der Fassade bei den Neubauten mit ca. 30 % deutlich höher (ca. 20 %).

Weitere Parameter z. B. bzgl. des Heizsystems, der Lüftung und des Sonnenschutzes können der folgenden Tabelle 19 entnommen werden.

Die Simulationen wurden auf Wohnungsebene durchgeführt. Als Referenzgeometrie wurde sowohl für die Bestandsgebäude als auch für die Neubauten eine Wohnung mit 80 m^2 Wohnfläche gewählt. Hinsichtlich der Zonierung der Wohnungen wurden die gleichen Annahmen wie für die Modellgebäude in Köln getroffen.

Die Lage der zur Abbildung des Quartiers ausgewählten 39 Wohnungen (13 Orte mit jeweils Dach-, Mittel-, und Erdgeschosswohnung) sind der folgenden Abbildung zu entnehmen. Bei den Wohnungen mit den Nummern 1 bis 8 handelt es sich um Neubauten. Die Wohnungen mit den Nummern 9 bis 13 befinden sich in Bestandsgebäuden.

Abbildung 108: Lage der Referenzwohnungen im Quartier



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse und ENVI_MET

2.2.7.4.2 Varianten

Den Ausgangspunkt der Untersuchungen für das Frankfurter Quartier bildet die Variante Status Quo 1 (SQ1), bei der die bereits zuvor beschriebenen Hüllqualitäten berücksichtigt wurden. Die Beheizung erfolgt für alle Gebäude über gebäudezentrale Gasbrennwertkessel, die auch die Warmwasserbereitung übernehmen. Die einzelnen Wohnungen sind über Zirkulationssysteme an den zentralen Warmwasserspeicher angebunden. Eine Kühlung ist zunächst nicht vorgesehen. Diese wird in der Variante SQ2 mittels Split-Klimageräten berücksichtigt. Die Varianten Optimierte 1 (Opt1) und Optimierte 2 (Opt2) entsprechen bauphysikalisch und technisch den Varianten SQ1 und SQ2. Jedoch wurden hierbei die Maßnahmen zur Optimierung des Mikroklimas (siehe Kapitel Mikroklimasimulationen) berücksichtigt. Aufbauend auf der Variante Opt2 wurden die folgenden Varianten Opt3 bis Opt6 entwickelt.

Bei der Variante Opt3 wurde zur Verbesserung des sommerlichen und winterlichen Wärmeschutzes eine verbesserte Dämmung und ein wirksamer Sonnenschutz berücksichtigt. Für die Neubauten wurde ein energetischer Standard entsprechend eines Effizienzhauses 40⁶³ mit folgenden Kennwerten angenommen:

- ▶ U-Wert Fassaden: 0,15 W/m²K
- ▶ U-Wert Dächer: 0,1 W/m²K
- ▶ U-Wert Boden zum Keller: 0,15 W/m²K
- ▶ U-Wert Fenster: 0,8 W/m²K (Dreifachwärmeschutzverglasung mit g= 0,55)

Darüber hinaus wurde eine Lüftungsanlage mit 80 % Wärmerückgewinnung berücksichtigt.

Für die Bestandsgebäude wurde angenommen, dass es möglich ist die Fassaden und Dächer so zu dämmen, dass auch die o. g. U-Werte erreicht werden können. Auch für die Fenster wurde die zuvor beschriebene Dreifachverglasung angenommen. Lediglich für den Boden wurden aufgrund begrenzter Deckenhöhe eine Dämmrestriktion auf maximal 4 cm angenommen, so dass hier nur ein U-Wert von 0,5 W/m²K erreicht werden kann. Die Nachrüstung einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung wird im Bestand als unrealistisch angesehen und daher nicht einkalkuliert.

Sowohl beim Neubau als auch beim Gebäudebestand wird in der Variante Opt3 ein wirksamer, automatisch betriebener außenliegender Sonnenschutz berücksichtigt. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Wärmeversorgung von Erdgas auf perspektivisch klimaneutrale Fernwärme umgestellt werden kann.

In der Variante Opt4 soll die Option einer kostengünstigen, möglichst nachhaltigen Kühlung durch die Vorsehung von gebäudezentralen Luft-Wasser-Wärmepumpen mit natürlichem Kältemittel untersucht werden. Durch die umfangreichen Dämmmaßnahmen und die partielle Nachrüstung von Gebläsekonvektoren in sensiblen Räumen wie Wohn- und Kinderzimmern können im Altbau die Systemtemperaturen des Heizsystems erheblich gesenkt werden, so dass auch hier eine effiziente Wärmebereitstellung über Monoblock-Luftwärmepumpen mit dem Kältemittel Propan möglich wird. Das erzeugte Warmwasser wird mittels Wärmeübergabestationen für die einzelnen Wohneinheiten bereit gestellt⁶⁴.

⁶³ Dieser liegt bzgl. der Hüllqualitäten und der Lüftung wahrscheinlich sehr nahe an den tatsächlich realisierten Gebäuden (Passivhausqualität).

⁶⁴ Details hierzu siehe Beschreibungen der entsprechenden Lösung im Quartier Hamburg

In der Variante Opt5 werden zusätzlich die Dächer weitestgehend mit PV belegt (Annahme: 50 % der Dachfläche), was einer installierten Leistung von ca. 1,5 kWp pro Wohnung entspricht⁶⁵.

Schließlich sollte mit Variant Opt6 untersucht werden, wie weit sich der PV-Eigennutzungsanteil durch entsprechende Batteriespeicher erhöhen lässt.

Die wesentlichen Parameter der bei den Gebäudesimulationen berücksichtigten Varianten sind nochmal in der folgenden Tabelle 19 zusammengefasst.

⁶⁵ Insgesamt 210 kWp auf den Neubauten

Tabelle 19: Übersicht der untersuchten Varianten für das Frankfurter Quartier

	SQ1 (ohne Kühlung)	SQ2 (mit Kühlung)	Opt1 (ohne Kühlung)	Opt2 (mit Kühlung)	Opt3 (ohne Kühlung)	Opt4 (mit Kühlung)	Opt5 (mit Kühlung)	Opt6 (mit Kühlung)
Mikroklima	Ist-Zustand	Ist-Zustand	Optimiert	Optimiert	Optimiert	Optimiert	Optimiert	Optimiert
Wärmeschutz	Neubau: EH 55 Bestand: teilsaniert	siehe SQ1	siehe SQ1	siehe SQ1	Neubau: EH 40 Bestand: saniert	siehe Opt3	siehe Opt3	siehe Opt3
Heizsystem	Gasbrennwertkessel Neubau: Fußboden- heizung Bestand: Heizkörper ⁶⁶	siehe SQ1	siehe SQ1	siehe SQ1	Klimaneutrale Fernwärme, Neubau: Fußbodenheizung Bestand: Heizkörper ⁶⁷	Zentralheizungen mit Monoblock- Luftwärmepumpe mit natürlichem Kältemittel Neubau: Fußbodenheizung Bestand: Heizkörper, partiell ersetzt durch Gebläsekonvektoren ⁶⁸	siehe Opt4	siehe Opt4
Warmwasser- bereitung	Zentral, Zirkulations- system ⁶⁹	siehe SQ1	siehe SQ1	siehe SQ1	siehe SQ1	Siehe SQ1	Siehe SQ1	Siehe SQ1
Kühlung	-	Split- Klimageräte, 26°C Zieltemperatur	-	Split- Klimageräte, 26°C Zieltemperatur	-	Neubau: Fußbodenkühlung Bestand: Gebläsekonvektoren	siehe Opt4	siehe Opt4

⁶⁶ Auslegungstemperatur: 70/ 50⁶⁷ Auslegungstemperatur: 55/ 40⁶⁸ Dadurch Absenkung der Auslegungstemperatur auf 50/ 40 möglich⁶⁹ Beim Bestand wurde davon ausgegangen, dass alle zugänglichen Leitungen, wie beim Neubau, gem. aktuellem Anforderungsniveau gedämmt sind.

	SQ1 (ohne Kühlung)	SQ2 (mit Kühlung)	Opt1 (ohne Kühlung)	Opt2 (mit Kühlung)	Opt3 (ohne Kühlung)	Opt4 (mit Kühlung)	Opt5 (mit Kühlung)	Opt6 (mit Kühlung)
Lüftung	Permanenter Luftwechsel 0,4 1/h Neubau: Abluftanlage Bestand Fensterlüftung und Infiltration zusätzliche Lüftung zur Kühlung im Sommer ⁷⁰	siehe SQ1	siehe SQ1	siehe SQ1	Neubau: Zu-Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (80 %), Luftwechsel: 0,4 1/h Fensterlüftung: Luftwechsel: 0,25 1/h ⁷¹ zusätzliche Lüftung zur Kühlung im Sommer, siehe SQ1	siehe Opt3	siehe Opt3	siehe Opt3
Sonnenschutz	manuell betrieben ⁷²	siehe SQ1	siehe SQ1	siehe SQ1	automatisch betriebener wirksamer Sonnenschutz ⁷³	siehe Opt3	siehe Opt3	siehe Opt3
Erneuerbare Energien vor Ort	-	-	-	-	-	-	1,5 kWp/Wohnung ⁷⁴	PV: 1,5 kWp/Wohnung Batterie ⁷⁵ 2 kWh/Wohnung

⁷⁰ Sommerliche (Stoß-) Lüftung bei Raumtemperaturen über 24°C und kühlerer Außentemperatur sowie Anwesenheit der Bewohner; morgens von 7-8 Uhr mit Luftwechsel von 6 1/h, nachmittags/ abends von 16-22 Uhr mit Luftwechsel von 4 1/h; Nachtlüftung über gekipptes Fenster im Schlafzimmer von 22-6 Uhr mit Luftwechsel von 0,4 1/h

⁷¹ Reduzierter Luftwechsel durch verbesserte Luftdichtigkeit in Folge der Sanierung

⁷² Zur Berücksichtigung der unvermeidbaren Fehlregelungen wurde ein mittlerer Fc-Wert von 0,5 angenommen

⁷³ Annahme: mittlerer Fc-Wert von 0,2

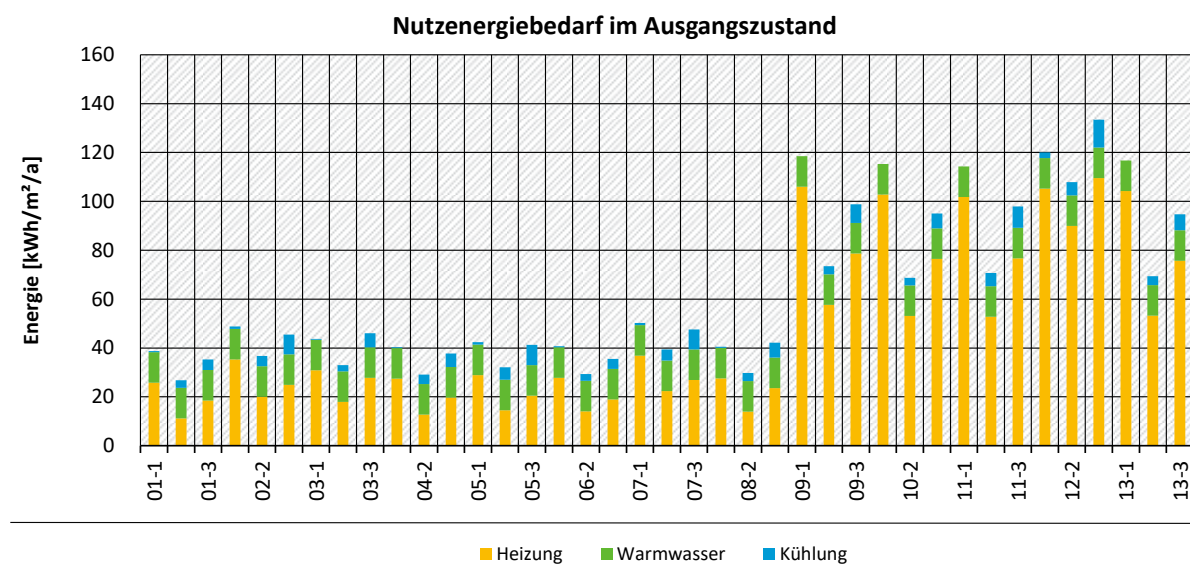
⁷⁴ Entspricht in etwa einer Belegung von 50 % der Dachflächen Ausrichtung, angenommene Orientierung: 30° Neigung bei südlicher Ausrichtung

⁷⁵ Es wurde von einer rein technischen Betrachtung ausgegangen. D. h. das sowohl der Batteriespeicher als auch die PV sowohl für die Gebäudetechnik als auch für den Haushaltsstrom genutzt werden können.

2.2.7.4.3 Ergebnisse

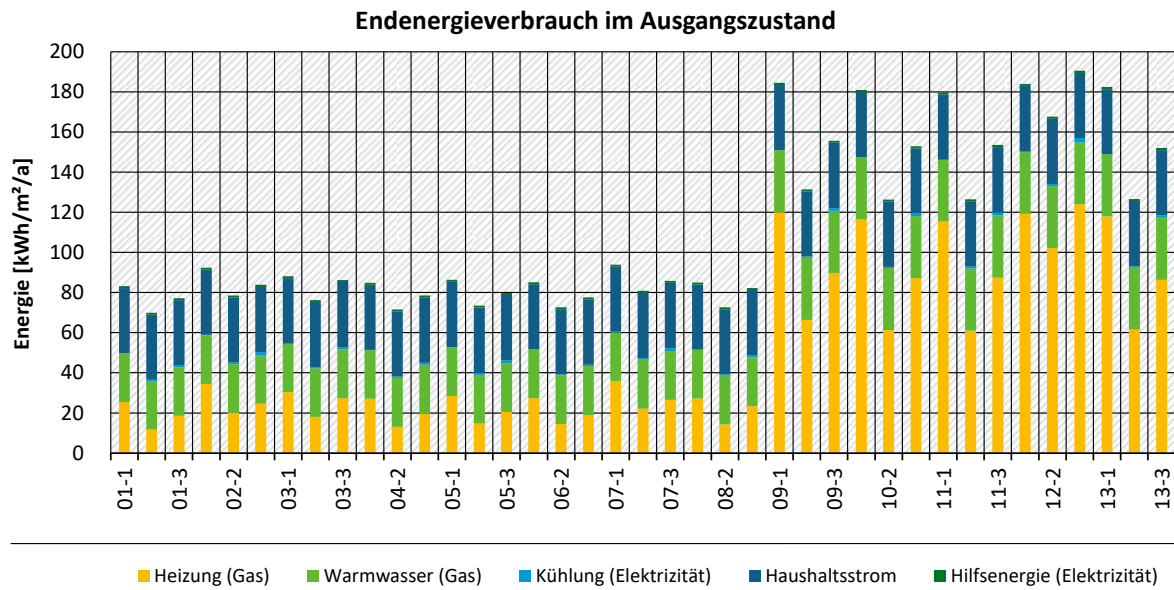
Erwartungsgemäß ist der Nutzenergiebedarf für Heizen in den teilsanierten Bestandgebäuden am höchsten. Bei den Dach- und Erdgeschosswohnungen (Wohnungen mit den Endziffern -3 und -1) liegt dieser im Bereich zwischen 76 kWh/m² und 110 kWh/m² (siehe folgende Abbildung). Deutlich niedriger ist der Nutzenergiebedarf fürs Heizen bei den Mittelgeschosswohnungen (Wohnungen mit den Endziffern -2). Ein qualitativ ähnliches Verhalten ist auch bei den Neubauten zu beobachten, wobei der Nutzenergiebedarf fürs Heizen hier in einem Bereich zwischen 11 kWh/m² und knapp 40 kWh/m² liegt. Bzgl. des Nutzenergiebedarfs für Kühlung sind keine systematischen Abweichungen zwischen Neubau und Bestand zu beobachten. Signifikante Unterschiede ergeben sich hier in Folge der Lage der Wohnungen. Während die Erdgeschosswohnungen nur einen vernachlässigbaren Nutzenergiebedarf fürs Kühlen aufweisen, steigt dieser bei den Mittelgeschosswohnungen und erreicht Maximalwerte von bis zu 13 kWh/m²a bei den Dachgeschosswohnungen. Der Nutzenergiebedarf für Warmwasser wurde mit 12,5 kWh/m² a für alle Wohnungen gleich angenommen.

Abbildung 109: Nutzenergiebedarf der Wohnungen der Variante SQ2 (mit Gebäudekühlung) des Frankfurter Quartiers



Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Betrachtet man den Endenergiebedarf, so verschiebt sich das Bild, wie auf der folgenden Abbildung zu erkennen ist. Während die Kennwerte für Heizung sich nur geringfügig ändern, steigt der Endenergiebedarf für Warmwasser aufgrund der Verteilungsverluste stark an und übersteigt bei den Mittelgeschosswohnungen im Neubau den Heizenergiebedarf. Da die Kühlung bei der betrachteten Variante SQ2 über Split-Klimageräte bereitgestellt wird, die eine Jahresarbeitszahl (SEER) von im Mittel ca. 5 haben, sinkt der Endenergiebedarf für Kühlung entsprechend ab. Der anlagentechnische Hilfsenergiebedarf ist gering, insbesondere im Vergleich zum Haushaltsstrombedarf, der mit 32,5 kWh/m²a angesetzt wurde bzw. dem Warmwasserbedarf, der inklusive Verluste im Neubau 24 kWh/m²a und 31 kWh/m²a im Bestand beträgt.

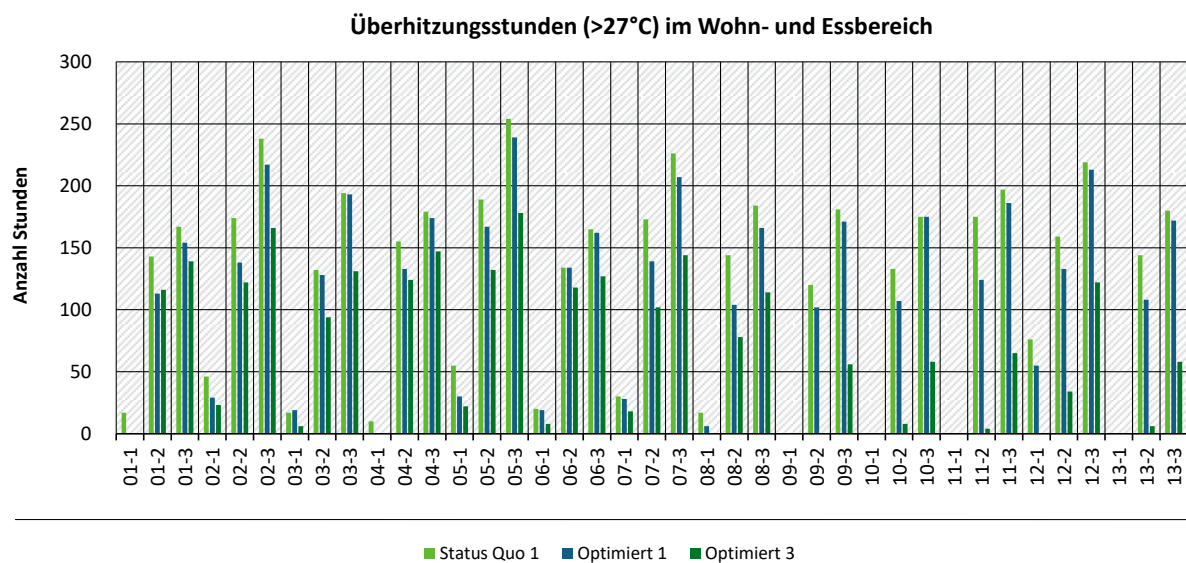
Abbildung 110: Endenergiebedarf der Wohnungen der Variante SQ2 (mit Gebäudekühlung) des Frankfurter Quartiers

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Die jährlichen Überhitzungsstunden, sowohl im Wohn-/ Essbereich als auch in den Schlaf- und Kinderzimmern in den Mittel- und Dachgeschosswohnungen der Varianten SQ1 und Opt1 übersteigen häufig 150 h/a⁷⁶, d. h. in 15 % der Nutzungszeit wird es hier unbehaglich warm (vgl. Abbildung 111 und Abbildung 112). Deutlich weniger kritisch ist die Situation in den Erdgeschosswohnungen. Bei den Bestandsgebäuden ist hier bis auf eine Ausnahme keine Überhitzung zu beobachten. Durch die mikroklimatische Optimierung des Quartiers (Variante Opt1) wird eine leichte Verbesserung erreicht. Deutlich reduzieren lassen sich die Überhitzungsstunden durch die Verbesserung der Gebäudehülle und des Sonnenschutzes (vgl. Variante Opt3 in der Abbildung 111 und Abbildung 112). Insgesamt liegen aber auch hier die Überhitzungsstunden vor allem bei den Neubauten mit häufig immer noch über 100 h/a in den Mittel- und Dachgeschosswohnungen in einem nicht akzeptablen Bereich, so dass zur Gewährleistung ausreichender Behaglichkeit im Sommer eine Kühlung erforderlich wird. Dies betrifft sowohl die Neubauten als auch die Bestandsbauten.

⁷⁶ Die Gesamtstundenzahl der Anwesenheit im Sommer für die Zone Wohnen/ Essen beträgt 1.071 h/a und für die Zone Schlaf- und Kinderzimmer 1.220 h/a

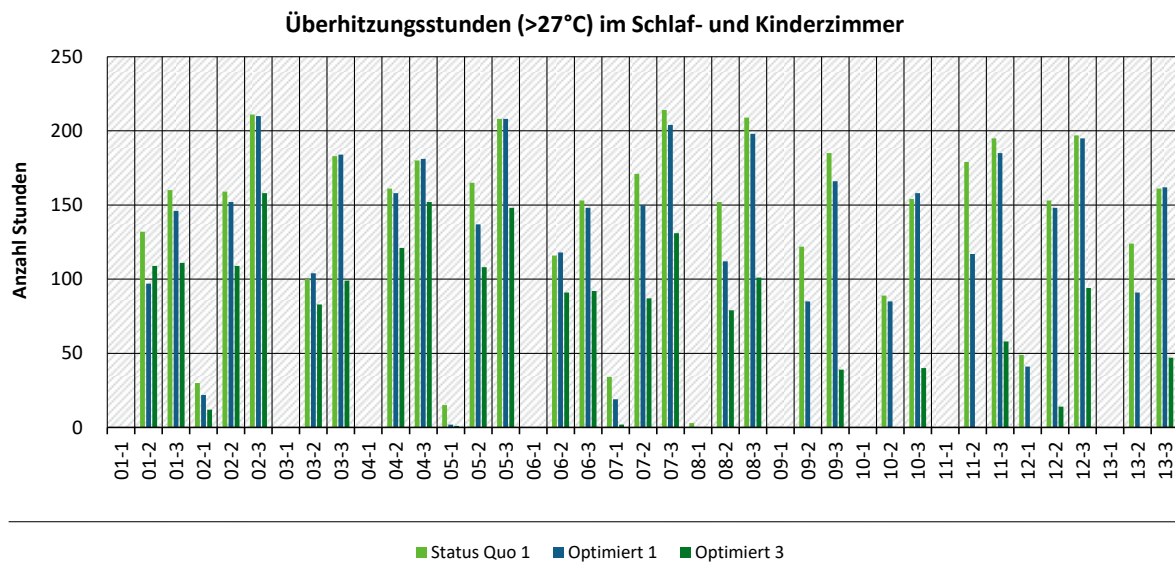
Abbildung 111: Vergleich der Überhitzungsstunden (> 27 °C) im Wohn- und Essbereich der Wohnungen im Frankfurter Quartier



Quartiersvarianten Status Quo 1 (Ausgangszustand, Gebäude ohne Kühlung), Optimiert 1 (optimiertes Quartier, Gebäude ohne Kühlung) und Optimiert 3 (optimiertes Quartier und optimierte Gebäude ohne Kühlung).

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Abbildung 112: Vergleich der Überhitzungsstunden (> 27 °C) in den Schlaf- und Kinderzimmern der Wohnungen im Frankfurter Quartier



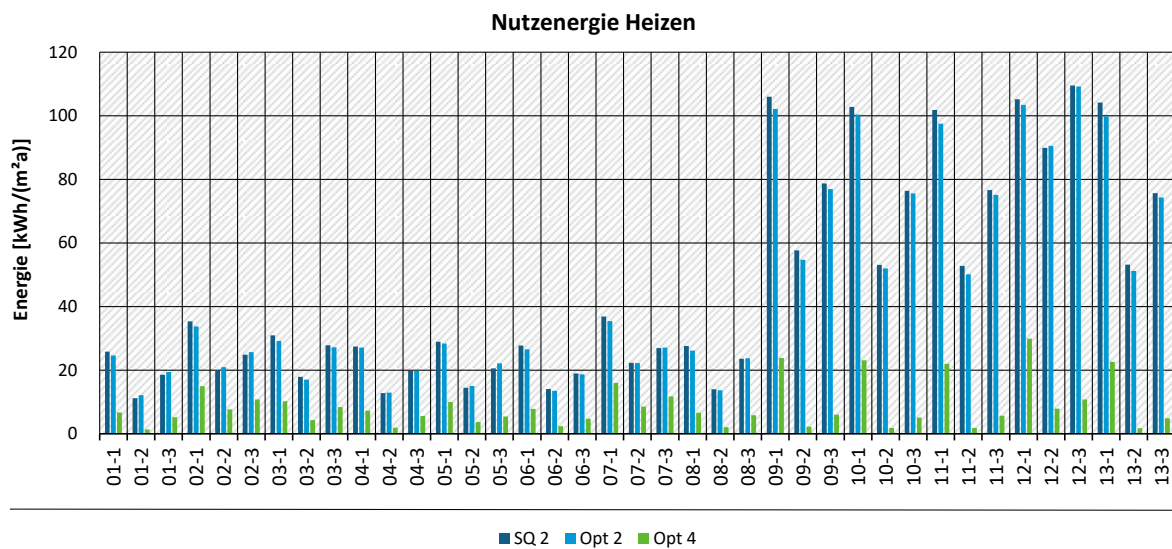
Quartiersvarianten Status Quo 1 (Ausgangszustand, Gebäude ohne Kühlung), Optimiert 1 (optimiertes Quartier, Gebäude ohne Kühlung) und Optimiert 3 (optimiertes Quartier und optimierte Gebäude ohne Kühlung).

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Wie auf den folgenden beiden Abbildungen zu erkennen ist, wird durch die mikroklimatischen Optimierungsmaßnahmen sowohl der Heizenergiebedarf als auch der Kühlenergiebedarf leicht reduziert (Vgl. Varianten SQ2 und Opt2). Der Heizenergiebedarf der nicht optimierten Gebäudevarianten SQ2 und Opt2 liegt bei den Neubauwohnungen im Bereich zwischen 11 und 37 kWh/m²a, bei Bestandswohnungen zwischen 53 kWh/m²a und 110 kWh/m²a und ist jeweils

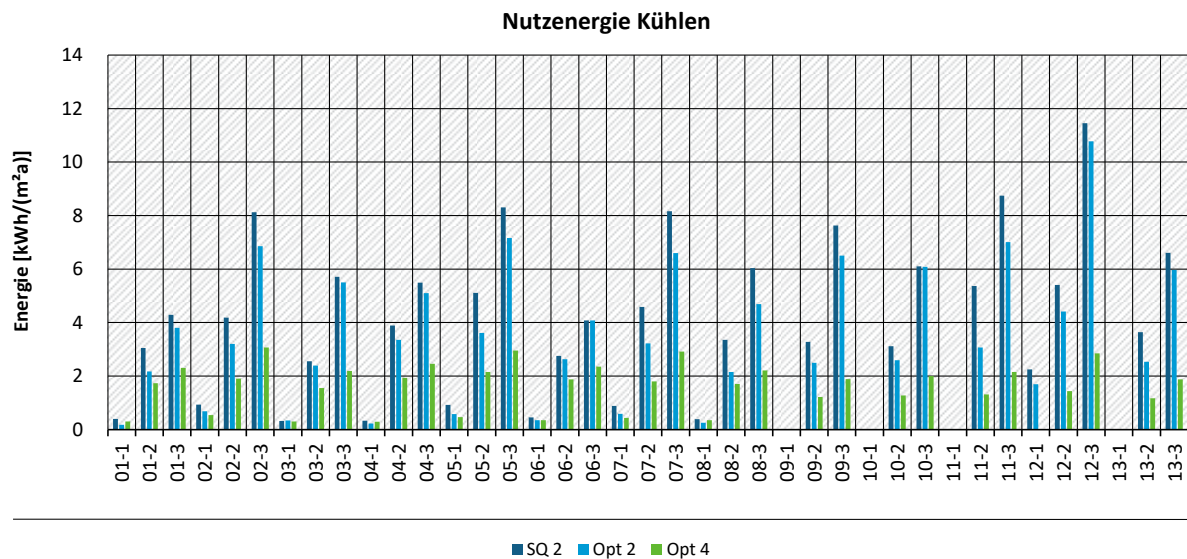
in den Mittelgeschosswohnungen am geringsten. Der Kühlenergiebedarf ist deutlich geringer und liegt bei den Wohnungen der nicht optimierten Gebäudevarianten SQ2 und Opt2 im Bereich zwischen 0 kWh/m²a und 11 kWh/m²a und ist jeweils in den Erdgeschosswohnungen am geringsten. Durch die Dämm- und Sonnenschutzmaßnahmen (Varianten Opt4) verringert sich sowohl der Heiz- als auch der Kühlenergiebedarf. Im Neubau sinkt der Heizenergiebedarf aller Wohnungen unter 15 kWh/m²a (Passivhausstandard), im Bestand relativ noch deutlicher auf unter 30 kWh/m²a. Der maximale Kühlenergiebedarf kann sogar auf 3 kWh/m²a begrenzt werden.

Abbildung 113: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Heizung der Wohnungen im Frankfurter Quartier



Quartiersvarianten SQ2 (Ausgangsfall), Opt2 (optimiertes Mikroklima) und Opt4 (optimiertes Mikroklima und verbesserte Gebäude).

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Abbildung 114: Vergleich des Nutzenergiebedarfs für Kühlung der Wohnungen im Frankfurter Quartier

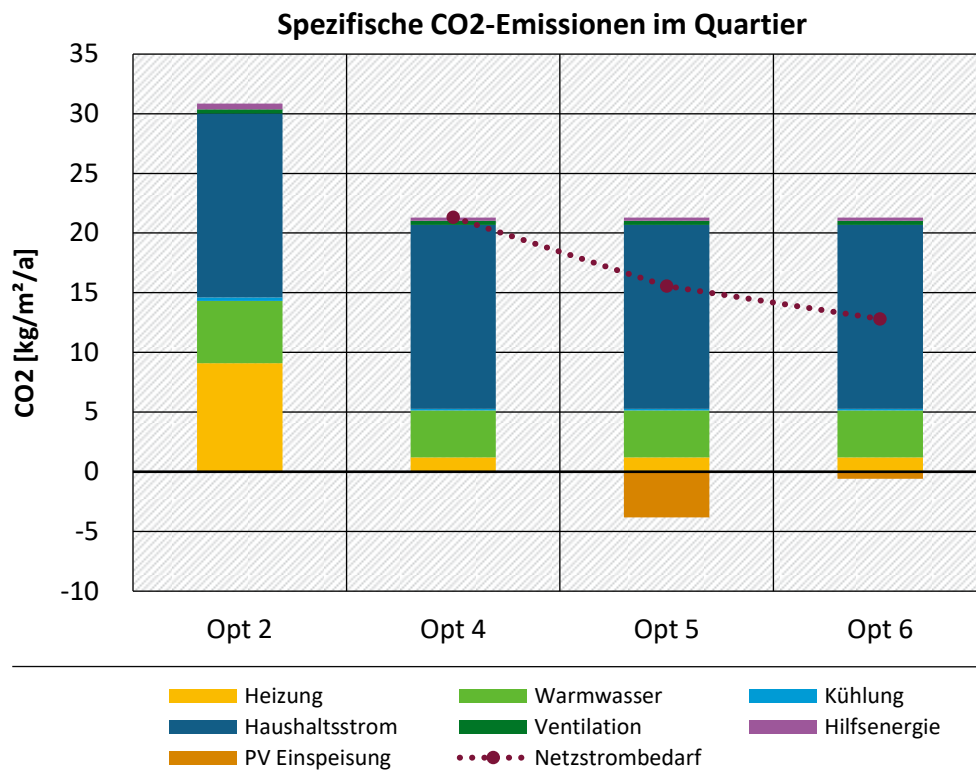
Quartiersvarianten SQ2 (Ausgangsfall), Opt2 (optimiertes Mikroklima) und Opt4 (optimiertes Mikroklima und verbesserte Gebäude).

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Ähnlich wie bei den beiden anderen deutschen Quartieren kann eine quartiersautarke Versorgung allein durch Verbesserungsmaßnahmen und vor Ort bereitgestellter erneuerbarer Energie nicht erreicht werden.

Die gebäudebedingten CO₂-Emissionen⁷⁷ (d. h. ohne Haushaltsstrom) konnten durch die Verbesserungsmaßnahmen der Gebäude (vgl. Varianten Opt2 und Opt4 der Abbildung 115) um ca. 10 kg/m²a, d. h. ca. auf ein Drittel, gesenkt werden. Durch die Direktnutzung des von den PV-Anlagen auf den Dächern erzeugten Stroms (pro Wohnung im Mittel 1,5 kWp, vgl. Variante Opt5) können die CO₂-Emissionen um nochmals 5,7 kg/m²a gesenkt werden. Eine weitere Reduktion, um nochmals 2,8 kg/m²a, wird durch die Berücksichtigung der Batteriespeicher möglich (pro Wohnung im Mittel 2 kWh, vgl. Variante Opt6). Der verbleibende Überschuss des PV-Stroms, der in das Netz eingespeist werden muss, wird dabei minimal.

⁷⁷ 0,474 g/kWh für Strom; Quelle: Umweltbundesamt 2021 (Wert für 2018; Annahme: Gleiche Werte für Netzbezug und Einspeisung); 0,201 g/kWh für Erdgas; Quelle: Jührich 2016

Abbildung 115: Vergleich der CO₂-Emissionen verschiedener Varianten

Opt2 (keine Gebäudemaßnahmen), Opt4 (verbesserter Wärmeschutz und Sonnenschutz), Opt5 (zusätzliche PV) und Opt6 (zusätzlicher Batteriespeicher).

Quelle: Eigene Darstellung, Guidehouse

Insgesamt (inklusive des Haushaltsstromes, der mit ca. 15 kg/m²a den größten Anteil der CO₂-Emissionen ausmacht) verbleiben bei Berücksichtigung von einheitlichen Strommix-Emissionsfaktoren noch spezifische CO₂-Emissionen von ca. 13 kg/m²a. Dies ist gegenüber der Variante Opt2 zwar eine Verminderung um fast 60 %, bedeutet aber auch, dass auch für das Quartier in Frankfurt zusätzliche erneuerbare Energien aus der Region bereitgestellt werden müssen, um eine Klimaneutralität zu erreichen. Bei Berücksichtigung differenzierter (d.h. höherer Emissionsfaktoren für PV und elektrischer Wärmeerzeugung⁷⁸) müsste für eine jahresbilanzielle Klimaneutralität der CO₂-Strommixfaktor einen Grenzwert von 213 kg/kWh erreichen. Bei der geplanten Forcierung des Ausbaus erneuerbarer Energien für die Stromversorgung sollte dieser Grenzwert mittelfristig erreicht werden können.

2.2.7.4.3.1 Zusammenfassende Beurteilung

Durch die mikroklimatischen Optimierungsmaßnahmen im Quartier (vor allem durch die Implementierung der großkronigen Bäume) können sowohl bei ungekühlten Gebäuden die Überhitzungsstunden (>27 °C) in den Innenräumen als auch der Nutzenergiebedarf für Kühlung bei gekühlten Gebäuden messbar, allerdings nicht entscheidend, gesenkt werden. Durch den Abschirmungseffekt wird auch der Gesamtnutzenergiebedarf für Heizung minimal gesenkt. Selbst mit den berücksichtigten effektiven Maßnahmen einer sehr guten Gebäudedämmung und eines sehr wirksamen Sonnenschutzes ist es weder bei den Bestandsbauten noch bei Neubauten möglich ohne Kühlung eine ausreichende sommerliche Behaglichkeit in den Sommermonaten zu

⁷⁸ 860 g/kWh (Verdrängungsstrommix (GEG 2020)); weitere Hintergründe zum Rechenansatz: Siehe Kapitel 2.2.5.4.3.2

erreichen. Der dazu notwendige Kühlenergiebedarf spielt bei der Gesamtenergiebilanz jedoch eine untergeordnete Rolle. Durch die beschriebenen Effizienzmaßnahmen kann der gebäudebedingte Energiebedarf erheblich auf etwa ein Drittel reduziert werden. Hinsichtlich der CO₂-Emissionen der Wohnungen im Quartier dominiert jedoch der Haushaltsstrom. Durch PV-Anlagen auf den Dächern kann der Strombedarf erheblich reduziert werden. Eine jahresbilanziell neutrale Strombilanz (d.h. Erzeugung = Verbrauch) ist allerdings nicht möglich. Eine rechnerisch jahresbilanziell klimaneutrale Energieversorgung ist jedoch unter Berücksichtigung differenzierter Emissionsfaktoren für Strom möglich. Hierfür müsste der CO₂-Emissionsfaktor für den Strommix 213 g/kWh betragen.

2.2.8 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Simulationen

2.2.8.1 Mikroklimasimulationen

Die Anwendung von hochauflösenden Mikroklimamodellen ermöglicht die numerische Vorhersage der Auswirkungen von strukturellen Änderungen in städtischen Planungsgebieten auf das Stadtklima.

Hierbei wurden in der vorliegenden Studie zwei unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten hochauflösender Stadtklimadaten verwendet: zum einen die Möglichkeit regionale Klimadaten an die speziellen Gegebenheiten des Gebäudestandorts im urbanen Kontext anzupassen und zum anderen die Analyse der räumlich-zeitlichen Verteilung des thermischen Komforts im Außenbereich.

Der erste Anwendungsfall wurde praktisch umgesetzt, um die klimatologischen Eingangsdaten der thermischen Gebäudesimulation parzellenscharf an die lokalen Bedingungen anzupassen. Hierbei wurde der eigentlich nur kurze Zeitspannen umfassende Analysehorizont des Modells ENVI_MET auf ein komplettes Jahr erweitert. Durch die Aufteilung der Rechenaufgaben in verschiedene Zeitschichten, die auf unterschiedlichen Computern simuliert und wieder zu einer Jahreszeitreihe zusammengesetzt wurden, war dieser Ansatz im Rahmen dieses Projekts zeitlich durchführbar. Für eine praxistaugliche Anwendung wird es jedoch notwendig sein, Analogieschlüsse z. B. über KI-Verfahren zu erzeugen, so dass nicht ein komplettes Jahr simuliert werden muss.

Die Analyse des Mikroklimas im Außenbereich als zweiter Anwendungsfall hat nicht zum Ziel, komplette Jahreszeitreihen zu erzeugen, sondern die Interaktionen zwischen der gebauten Umwelt und dem Mikroklima zu verstehen und hieraus Hinweise für eine optimale Planung abzuleiten.

Diese Analysen konzentrieren sich somit auf typische Situationen, wie beispielsweise einen heißen Sommertag, die es ermöglichen, die komplexen Prozesse im Stadtquartier zu verstehen.

Bei der Analyse der Daten wurde der thermische Komfortindex PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) verwendet. Die PET beschreibt das thermische Empfinden eines Menschen unter der Einwirkung von Strahlungsflüssen (vor allem Sonnenstrahlung), Wind, Lufttemperatur und Luftfeuchte. Hierbei ist der Einfluss der Sonnenstrahlung der dominierende Faktor. Aus diesem Grund verbessern Beschattungsmaßnahmen besonders effektiv den thermischen Komfort. In bereits beschatteten Bereichen oder bei fehlender Sonneneinstrahlung haben jedoch die lokale Windgeschwindigkeit und die Lufttemperatur einen deutlichen Einfluss auf den thermischen Komfort.

Im Gegensatz zu lokalen Beschattungselementen ist die Verteilung von Wind und Lufttemperatur abhängig von der Gesamtdynamik des Mikroklimas im Untersuchungsgebiet und lassen sich nur durch ein Gesamtkonzept optimieren.

Die Beurteilung des Wirkungsgrades von Maßnahmen und die Auswahl geeigneter Maßnahmen hängt sehr stark von der im Status Quo vorgefundenen thermischen Situation ab und muss für den jeweiligen Einzelfall beurteilt werden.

Die effizienteste Maßnahme besteht in der Verringerung der direkten Sonneneinstrahlung durch beschattende Elemente. Hierbei kommen sowohl technische Lösungen wie Sonnensegel oder aber grüne Strukturen wie Bäume in Betracht. Technische Lösungen beschränken sich hierbei auf das reine Abschatten der Sonneneinstrahlung und können sich selbst stark erwärmen und somit zu einer indirekten Erwärmung der Umgebung beitragen. Vegetation hingegen erwärmt sich durch die Transpiration der Blätter wenig und wirkt auch im Schatten und nachts kühlend

auf die Umgebung. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine ausreichende Wasserversorgung, um das Überleben der Pflanzen zu gewährleisten. Dieses kann sich in trockenen Klimazonen als limitierender Faktor erweisen, so dass bauliche Lösungen hier eher in Betracht zu ziehen sind als in Bereichen mit ausreichender Wasserversorgung.

Die für Hamburg vorgestellte Kühlung durch Wasserverneblung (Wasserspray) stellt ebenfalls eine sehr effiziente Methode dar, um die Lufttemperatur deutlich zu reduzieren, welche in Verbindung mit Beschattungsmaßnahmen den maximalen Kühleffekt erzielen kann. Allerdings ist auch hier die Verfügbarkeit von sauberem Wasser sowie eine entsprechende technische Infrastruktur zur Vernebelung eine Grundvoraussetzung, die in vielen heißen Klimaten nicht erfüllt werden kann.

Eine besondere Herausforderung stellt die Reduzierung der Hitzebelastung während der Nachtstunden dar. Zwar wird der Außenbereich nachts im Allgemeinen wenig frequentiert, aber die Bereitstellung kühler bzw. kühlerer Luft ist auch für die passive Belüftung der Innenräume eine wichtige Voraussetzung für einen gesunden Schlaf.

Die thermische Belastung während der Nachtstunden wird zum einen durch die Aufheizung und nachfolgende Abgabe der Wärmeenergie der unterschiedlichen urbanen Strukturen definiert. Eine Reduktion des Energieeintrages während der Tagesstunden wirkt hier somit lange nach und kann die Wärmebelastung reduzieren. Eine weitere Kühlung in der Nacht kann nur durch Verdunstungskühlung erreicht werden, wobei vor allem offenen Grünflächen mit ausreichender Himmelssicht eine wichtige Rolle zukommt. Baumbestände hingegen können innerhalb bebauter Bereiche durch die abschirmende Wirkung (Biergarteneffekt) sowie die Abbremsung des Windes auch als wärmende Faktoren in Erscheinung treten. Die Beurteilung der Auswirkungen von lokalen Umgestaltungen während der Nachtstunden ist somit noch sensibler gegenüber der jeweiligen Stadtstruktur, so dass der Einzelfall zu untersuchen ist.

2.2.8.2 Gebäudesimulationen

Die berücksichtigten Optimierungsmaßnahmen zur Verringerung des Hitzeinseleffektes auf Quartiersebene haben einen messbaren, in der Regel aber verhältnismäßig geringen positiven Einfluss auf den sommerlichen Innenraumkomfort. Hinsichtlich der energetischen Aspekte wird die geringfügige Minderung des Kühlenergiebedarfs oft durch die leichte Erhöhung des Heizenergiebedarfs nahezu kompensiert. Bis auf die Gebäude in Hamburg ist in allen Fällen trotz umfänglicher Vermeidungsmaßnahmen (Lüftungskühlung, Sonnenschutz und Verbesserung der Gebäudehüllen) eine Kühlung zur Sicherstellung eines guten sommerlichen Komforts erforderlich. Vor allem die Dach- und Mittelgeschosswohnungen erweisen sich bezüglich der Überhitzungsproblematik als kritisch. Der Kühlenergiebedarf der Gebäude ist weitestgehend unabhängig vom Baujahr und wird abgesehen vom Lüftungsverhalten vielmehr von der Hüll- und Sonnenschutzqualität beeinflusst. Im Vergleich zu anderen Energiebedarfen, wie z. B. Haushaltsstrom, Warmwasser- oder dem Heizenergiebedarf ist der Endenergiebedarf für Kühlung in den deutschen Quartieren vergleichsweise gering. Dies ist nicht zuletzt auch auf die berücksichtigten hocheffizienten Kühltssysteme (z. B. Fußbodenkühlung) zurückzuführen. Umso wichtiger ist hierbei der Verzicht auf fluorierte Kältemittel, die unvermeidbare direkte Treibhausgasemissionen oder im Falle der ungesättigten HFKW (auch als Hydrofluorolefine (HFO) bezeichnet) bzw. deren Zerfallsprodukte weitere Umweltschäden verursachen. Hinsichtlich der angestrebten Klimaneutralität durch erneuerbare Energien vor Ort ist das Verhältnis der verfügbaren Dachfläche zur Wohnfläche der begrenzende Faktor. Während für das Quartier in Tunis aufgrund der hohen Einstrahlung und der überwiegend geringen Geschosshöhen durch PV-Anlagen auf den Dächern jahresbilanziell ebenso viel Strom erzeugt werden kann wie auch im optimierten Quartier benötigt wird, ist dies selbst im ebenfalls sehr

sonnenreichen Madrid nicht möglich. Aufgrund der achtgeschossigen Gebäude ergaben sich pro Wohnung geometriebedingt rechnerisch hier lediglich 1 kWp installierter PV-Leistung. Auch bei den untersuchten deutschen Quartieren reicht die zur Verfügung stehende Dachfläche, trotz der geringeren Geschosshöhe und der umfangreichen Verbesserungsmaßnahmen an den Gebäuden, nicht für eine jahresbilanziell klimaneutrale Strombilanz aus. Dies liegt vor allem an dem verbleibenden Haushaltsstrombedarf, dessen Minimierung daher ein wesentlicher Baustein zur Herstellung der Klimaneutralität von (Wohn-)Quartieren ist. Eine rechnerisch jahresbilanzielle Klimaneutralität ist bei Berücksichtigung differenzierter CO₂-Faktoren (d.h. höherer Emissionsfaktoren für PV und elektrischer Wärmeerzeugung⁷⁹) möglich. In Großstadtquartieren mit einer hohen Wohndichte (vgl. Quartier Campo Bornheim in Frankfurt) ist dazu jedoch noch eine weitere Verbesserung des CO₂-Strommixfaktors im deutschen Stromnetz notwendig.

⁷⁹ 860 g/kWh (Verdrängungsstrommix (GEG 2020)); weitere Hintergründe zum Rechenansatz: Siehe Kapitel 2.2.5.4.3.2

3 Akteursanalyse und Workshops

Um den Transfer der Projektergebnisse in die Praxis zu gewährleisten, beinhaltete das Forschungsvorhaben einen umfassenden Austausch mit Praxisakteuren. Dieser basiert auf den in Abbildung 116 dargestellten Arbeitsschritten, die in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden.

Abbildung 116: Übersicht des Vorgehens zum Austausch mit Praxisakteuren.



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

3.1 Literaturrecherche

3.1.1 Akteursanalyse und Zuständigkeiten

Anhand einer Literaturanalyse wurden zunächst die Zuständigkeiten für die verschiedenen in Abschnitt 1.3 betrachteten Maßnahmen zur Vermeidung urbaner Hitzeinseln untersucht. Diese sind je nach Kommune unterschiedlich geregelt, in Tabelle 20 sind beispielhaft typische Zuständigkeiten der verschiedenen Ämter dargestellt. Neben den verschiedenen Zuständigkeiten für die einzelnen Maßnahmen ist in vielen Kommunen die Zuständigkeit für die Koordination des Themas in einem der Ämter angesiedelt (z. B. Umweltamt).

Tabelle 20: Zuständigkeiten für die Umsetzung von Maßnahmen zur Vermeidung urbaner Hitzeinseln

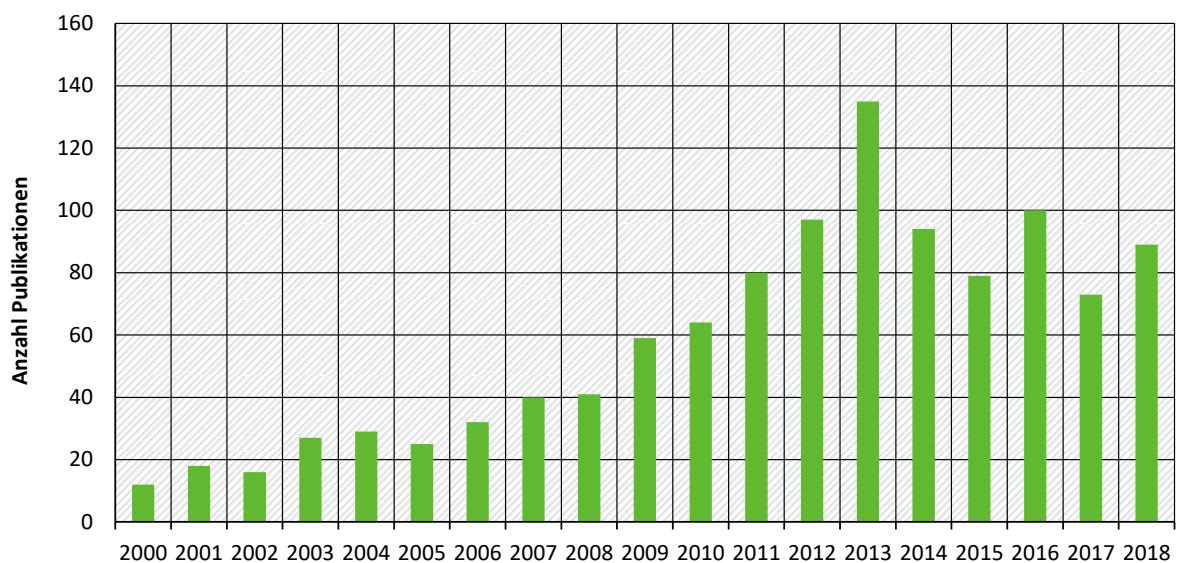
Nr.	Bezeichnung	Zuständigkeit der Stadtverwaltung	Beispiele für
1	Aufhellen von Belägen und Oberflächen im Freiraum	Bei städtischen Flächen: direkte Zuständigkeit der Stadtverwaltung	Tiefbauamt
2	Sicherung und Erweiterung des Baumbestandes	Bäume auf öffentlichen Flächen: direkte Zuständigkeit der Stadtverwaltung. Bäume auf privaten Flächen: kommunale Handlungsmöglichkeiten über Baumsatzung, Baumschutzverordnung oder Bebauungspläne	Amt für Grünflächen, Umweltamt, Ordnungsamt
3	Sicherung bestehender und Anlage von zusätzlichen Waldflächen	Direkte Zuständigkeit der Stadtverwaltung	Forstamt
4	Entsiegelung von Oberflächen im Freiraum/ Vermeidung von Versiegelung	Auf städtischen Flächen: direkte Zuständigkeit der Stadtverwaltung, z. B. über Flächennutzungsplan	Stadtplanungsamt

Nr.	Bezeichnung	Zuständigkeit der Stadtverwaltung	Beispiele für zuständige Ämter
5	Sicherung und Erweiterung von Grün- und Freiräumen	Direkte Zuständigkeit der Stadtverwaltung, z. B. über Flächennutzungsplan	Stadtplanungsamt
6	Erhaltung der städtischen Luftzirkulation und Vernetzung der Freiräume	Direkte Zuständigkeit der Stadtverwaltung, z. B. über Flächennutzungsplan	Stadtplanungsamt
7	Dach- und Fassadenbegrünung	Keine direkte Zuständigkeit der Stadtverwaltung; im Neubau: Handlungsmöglichkeiten über Bebauungspläne	Bauamt, Stadtplanungsamt
8	Erhöhung des Wasseranteils im Quartier	Direkte Zuständigkeit der Stadtverwaltung	Stadtplanungsamt
9	Beschattung von Freiflächen und Wegen	Direkte Zuständigkeit der Stadtverwaltung	Stadtplanungsamt

3.1.2 Stellenwert des Themas

Generell zeigt sich in der Literaturanalyse, dass der Stellenwert des Themas in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat. Abbildung 117 zeigt die jährliche Anzahl von deutschsprachigen Veröffentlichungen im Zeitverlauf und unterstreicht die deutlich zunehmende Relevanz des Themas. Die Analyse verdeutlicht, dass die Anzahl der Publikationen in den letzten 10 Jahren um ein Vielfaches höher ist als im davorliegenden Zeitraum.

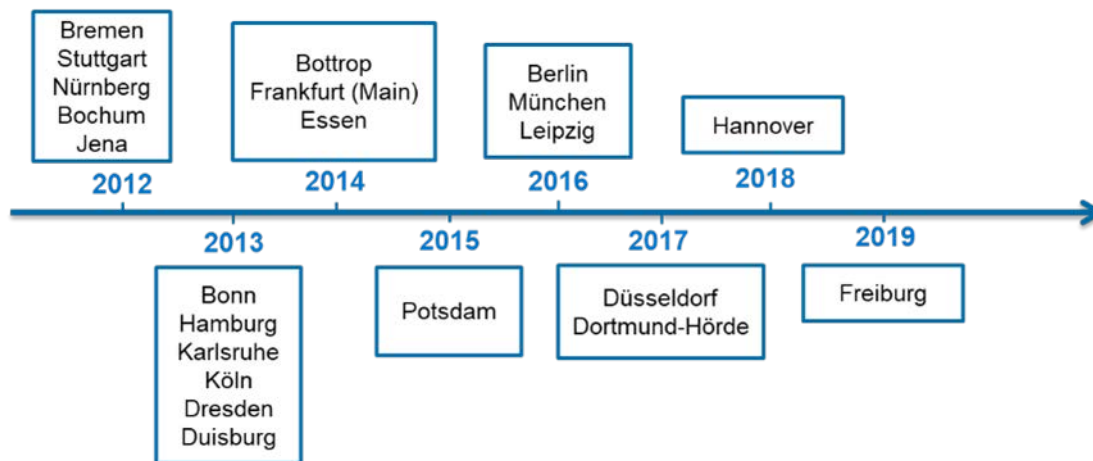
Abbildung 117: Anzahl an deutschsprachigen Publikationen zum Thema urbane Hitzeinseln.



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Daten von google scholar⁸⁰, Öko-Institut

Neben der zunehmenden Relevanz des Themas in wissenschaftlichen Veröffentlichungen hat die Thematik auch im Bereich der kommunalen Planung einen zunehmenden Stellenwert. Dies zeigt sich durch die zahlreichen Klimaanpassungskonzepte, die in den letzten Jahren in verschiedenen Kommunen entwickelt wurden (siehe Abbildung 118).

⁸⁰ Die Analyse beinhaltet Veröffentlichungen mit den Schlagworten „Hitzeinsel“ und „Wärmeinsel“.

Abbildung 118: Übersicht der Veröffentlichungszeitpunkte von Klimaanpassungsplänen in Städten.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

3.1.3 Datengrundlage und Planungstools

Zeitlich und räumlich aufgelöste Temperaturdaten stellen eine wichtige Planungsgrundlage für Konzepte zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln dar und sind typischerweise ein zentraler Bestandteil von kommunalen Konzepten. Dazu sind auch Software-Tools nötig, um auf Basis der Werte von Messstationen eine solche Datenbasis zu entwickeln.

Der Vergleich von Klimaanpassungskonzepten unterschiedlicher Kommunen zeigt, dass sich die Konzepte in Hinblick auf die Datengrundlage und die verwendeten Tools unterscheiden. Da in der Literatur die Rolle von Datenverfügbarkeit und Planungstools nur unzureichend beleuchtet ist, wurde in den Experteninterviews weiter darauf eingegangen.

3.2 Leitfadenbasierte Interviews

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden im Zeitraum zwischen Februar und Juli 2019 insgesamt 16 Interviews mit kommunalen Akteuren durchgeführt. Dabei wurden Akteure aus Berlin, Bonn, Dresden, Düsseldorf, Erfurt, Freiburg, Hamburg, Hannover, Köln und Ludwigsburg befragt. In den Interviews wurden die folgenden Themen beleuchtet (für eine detaillierte Darstellung der Fragen siehe Anhang A.2):

- ▶ Erfahrungen mit bereits umgesetzten Zielen und Maßnahmen
- ▶ Akteure und Zuständigkeiten bei der Umsetzung von Maßnahmen
- ▶ Stellenwert des Themas im Vergleich zu anderen Belangen
- ▶ Datenverfügbarkeit
- ▶ Hemmnisse und unterstützende Politikmaßnahmen

Die Auswertung der Interviews unterteilt sich in die Darstellung der in den Kommunen durchgeführten Maßnahmen (Abschnitt 3.2.1), die in den Interviews diskutierten Hemmnisse (Abschnitt 3.2.2) sowie die vorgeschlagenen Verbesserungspotenziale und Handlungsoptionen (Abschnitt 3.2.3).

3.2.1 Durchgeführte Maßnahmen

Die in den Interviews genannten Maßnahmen der jeweiligen Kommunen werden im Folgenden aufgelistet. Sie sind in Maßnahmen auf der Planungsebene und Praxis aufgeteilt und nach Häufigkeit und Relevanz sortiert.

Tabelle 21: Maßnahmen auf der Planungsebene

Maßnahmen auf Planungsebene	Beispiele/ Anmerkungen
Klimaanpassungskonzepte	Sehr viele Kommunen haben in den letzten 10 Jahren Klimaanpassungskonzepte entwickelt.
Stadtklimaanalysen	Viele Kommunen haben teils sehr hochauflösende Stadtklimaanalysen durchgeführt, die urbane Hitze-Hotspots aufzeigen. Diese Klimaanalysen sind jedoch mit einem hohen Kostenfaktor verbunden.
Hitzeaktionspläne	Einige Kommunen haben Handlungspläne für Hitzesituationen erstellt.
Fortschrittsberichte	Regelmäßige Berichterstattung wird in vielen Kommunen zur Informationsweitergabe und Überprüfung der Umsetzung von Maßnahmen praktiziert.
Bauleitpläne mit Planungshinweiskarten	Viele Kommunen berücksichtigen Klimaanpassung in den aktuellen Bauleitplänen. Die Planungshinweiskarten enthalten jedoch meist nur Empfehlungen, keine verpflichtenden Vorgaben. Problematik besteht mit Verpflichtungen zu Klimaanpassung im Bestand.
Zusätzliche Gutachten in kritischen Zonen	Einige Kommunen verlangen bei Bauvorhaben in Zonen, die in den Stadtklimaanalysen als kritisch bewertet worden sind, zusätzliche Gutachten zu deren Klimaverträglichkeit.
Verankerung in städtisches Leitbild	Inkorporation des Themas im Leitbild der Kommunen/ des Dezernats/ des Oberbürgermeisters betont die Relevanz von urbanen Hitzeinseln und erhöht den Wirkungskreis der Anpassungsmaßnahmen.
Begrünungssatzung	Manche Kommunen haben eine Begrünungssatzung, die zu Dachflächenbegrünung bei Neubauten verpflichtet.

Maßnahmen auf Planungsebene	Beispiele/ Anmerkungen
Positive Deutung des Begriffs Klimaanpassung	Durch Neubesetzung des Begriffs Klimaanpassung (Erhalt der Lebensqualität anstatt Katastrophenbegriff) versuchen Kommunen das Thema attraktiver und zugänglicher zu machen.

Tabelle 22: Maßnahmen in der Praxis

Maßnahmen in der Praxis	Beispiele/ Anmerkungen
Förderprogramme für Dach- und Fassadenbegrünung im Bestand	Sehr viele Kommunen schaffen Anreize zur Dach- und Fassadenbegrünung im Bestand durch Förderprogramme. In einigen Interviews wurde erwähnt, dass die Umsetzung von Fassadenbegrünung oft schwieriger ist als die von Dachbegrünung.
Erhöhung des Stadtgrünanteils	Sehr viele Kommunen wollen mehr Stadtbäume pflanzen, stoßen bei der Umsetzung jedoch auf viele Hemmnisse (z. B. mangelnder Platz für Wurzelwerk, mangelndes Budget für Pflege).
Klimaangepasstes Stadtgrün	Anpassung der Artenzusammensetzung des Stadtwaldes an das zukünftige Klima, um den Fortbestand des Stadtgrüns unter geänderten klimatischen Bedingungen zu gewährleisten.
Verbindung und Freihaltung von Kaltluftschneisen Bessere Trinkwasserversorgung	Einige Kommunen untersuchen, wie sie durch Baurestriktionen die Kaltluftzufuhr in der Kommune erhalten oder verbessern können. Viele Kommunen erhöhen die Anzahl der Trinkbrunnen im öffentlichen Raum, um den Zugang zu Trinkwasser während Hitzeereignissen zu verbessern.
Klimaanpassung der	Durch die Klimaanpassung bestehender kommunaler Gebäude und das klimagerechte Bauen kommunaler Neubauten dienen einige Kommunen als Vorbilder und Vorreiter für klimaangepasstes Bauen für ihre Bürger.
Bürgersensibilisierung	Anhand relevanter und greifbarer Beispiele sensibilisieren einige Kommunen ihre Bürger: z. B. Beschreibung der Hitzeentwicklung an beliebten Plätzen der Stadt oder Vergleich von Hitzewirkung verschiedener Gartenmaterialien.
Kombination von Grün- und Wasserflächen	Viele Kommunen betrachten die Entwicklung von Grün- und Wasserflächen integriert, um den synergetischen Kühleffekt von Stadtgrün und Wasserflächen zu nutzen.
Erhöhung von Versickerungsflächen	Einige Kommunen nannten die Erhöhung von Versickerungsflächen als eine Maßnahme gegen Überschwemmungen bei Starkregenereignissen. Dies wird u. a. über Förderprogramme oder Richtlinien bei Neubauten umgesetzt.
Minimierung neuer Flächenversiegelung	Einige Kommunen nannten die Minimierung von neuer Flächenversiegelung durch das bevorzugte Errichten von Wohn- und Gewerbeflächen auf Brachflächen und unbebauten Flächen in der Stadt anstatt auf unbebauten Flächen am Stadtrand.
Fortbildung von Fachkräften	Einige Kommunen setzen gezielt auf Fortbildungsprogramme für Fachkräfte, um Wissenslücken zu schließen oder Irrtümern zu begegnen, z. B. Fortbildungsprogramme für Architekten zur Kombination von PV und Dachbegrünung.
Mobile Beschattungsvorrichtungen	Mobile Beschattungsvorrichtungen können, als Ergänzung zu anderen Beschattungsvorrichtungen, die Hitzeeinwirkung an kritischen öffentlichen Orten reduzieren.

3.2.2 Hemmnisse

Die in den Interviews genannten Hemmnisse bei der Umsetzung von Maßnahmen der jeweiligen Kommunen werden im Folgenden aufgelistet. Sie sind nach Häufigkeit und Relevanz sortiert.

Tabelle 23: Hemmnisse

Hemmnisse	Beispiele/ Anmerkungen
Fehlende rechtliche Verbindlichkeit der Klimaanpassung: Klimaanpassung noch nicht als Pflichtaufgabe	- Die fehlende gesetzliche Verankerung der Klimaanpassung wird von allen Kommunen als sehr großes Hemmnis bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln gesehen. - Fehlende Priorisierung bei Zielkonflikten: Alle Kommunen beklagen fehlende Durchsetzungskraft der Klimaanpassung bei Zielkonflikten gegenüber anderen, rechtlich verbindlichen städtischen Interessen (z. B. gegenüber Lärmschutz, Denkmalschutz, Wohnungsmangel etc.). - Viele Kommunen betrachten die BauGB-Klimaschutznovelle 2011 als zu unkonkret. - Gesetzlich verbindliche Richtwerte für die Vermeidung von urbanen Hitzeinseln werden von den meisten Kommunen gefordert.
Fehlendes Budget	- Fast alle Kommunen haben Schwierigkeiten folgende Bereiche zu finanzieren: - Personal, - Förderprogramme (z. B. Dach- und Fassadenbegrünung) im Bestand, - Instandhaltung von Klimaanpassungsmaßnahmen, z. B. Pflege von Stadtbäumen und Fassadenbegrünung, - Eigenmittel (gilt für Kommunen oder Privatpersonen). - Alle Kommunen kritisieren mangelndes Budget für Klimaanpassung. Projektbezogene Finanzierungen erschweren langfristige Personalplanung und Projektbetreuung. Ein kommunaler Förderpool für Klimaanpassung ist gewünscht.
Personalmangel	- Klimaanpassung als Zusatzaufgabe für alle Kommunen. - Befristung durch projektbezogene Finanzierung stellt ein großes Problem in allen Kommunen dar. - Insbesondere bei kleineren Kommunen fehlt oft fachkundiges Personal.
Informationsmangel zu Folgewirkung von urbanen Hitzeinseln und zur Wirksamkeit der Maßnahmen gegen urbane Hitzeinseln	- Fast alle Kommunen beklagen einen Mangel an Information über Folgewirkung von urbanen Hitzeinseln: - Fehlende Daten zu Krankheits- oder Mortalitätsraten aufgrund von Hitze, - Mangelnde Verbreitung von Kenndaten zu Hitzeentwicklung (Hitzetage, Tropennächte etc.) auf kommunaler Ebene, die von der Politik genutzt werden können, - Teils fehlende Daten zu Gefährdungspotenzialen in der Stadt (z. B. vulnerable Bevölkerung), - Unsicherheiten in Klimaprognosen, - Ohne Daten zu Folgewirkungen gibt es nur eine geringe Argumentationsgrundlage für Maßnahmen gegen urbane Hitzeinseln. - Alle Kommunen kritisieren einen Mangel an Information über <u>Wirksamkeit der Maßnahmen</u> gegen urbane Hitzeinseln: - Schwierige Quantifizierbarkeit der Wirkung von Maßnahmen gegen urbane Hitzeinseln, - Räumliche Differenzierung wichtig, aber aufwendig.

Hemmnisse	Beispiele/ Anmerkungen
Schwierigkeit der verpflichtenden Klimaanpassung im Bestand	- Bauleitpläne betreffen nur Neubauten, die nur einen sehr geringen Teil der Bebauung ausmachen. - Viele Kommunen kritisieren, dass der Bestand, der den Hauptteil der bebauten Stadt ausmacht, nur sehr schwer durch Gesetze zu erreichen ist und nachträgliche Änderungen der Bauleitpläne gesellschaftlich nicht umsetzbar sind. - Viele Kommunen beklagen den mangelhaften Informationsstand der Zielgruppen, z. B. private Wohnungseigentümer oder Wohnungseigentümergeinschaften, über urbane Hitzeinseln und Handlungsoptionen gegen urbane Hitzeinseln. - Freiwillige Maßnahmen für den Bestand bedürfen viel Öffentlichkeits- und Überzeugungsarbeit und werden in vielen Kommunen nicht flächendeckend von der Bevölkerung genutzt. - Geringer Gebäudeanteil in öffentlicher Hand.
Fehlende Impulse auf Bundes- und Länderebene	- Alle Kommunen wünschen sich eine starke Vorreiterrolle der Politik auf Bundes- und Länderebene, die Klimaanpassung priorisiert. - Gesetze auf Bundesebene nötig, damit diese auf Landes- und Kommunalebene übertragen werden können.
Hürden in ämterübergreifender Zusammenarbeit	- Unklare Zuständigkeiten, fehlende ämterübergreifende Abstimmung und fehlende Koordination von Aufgaben in vielen Kommunen. - Klimaanpassung ist ein Querschnittsthema, das eine Vielzahl an Akteuren involviert, die alle verschiedene Hintergründe und Ziele haben. Dies führt zu vieldimensionalen Ziel- und Interessenkonflikten. - Bewusstsein für klimaangepasste Stadtentwicklung ist in den meisten Kommunen schon hoch, jedoch divergieren Bewusstsein und Umsetzung oft.
Fehlende Penetration der Klimaanpassung in der Stadtplanung und Stadtumbau	- Manche Kommunen kritisieren fehlende Sensibilisierung für Klimaanpassung bei Stadtplanern und Bauherren. - Manche kommunalen Vertreter kritisieren fehlende Zusammenarbeit der zuständigen Stellen für Klimaanpassung einerseits und Bau andererseits in der Stadtverwaltung.
Komplexität des Problembereichs urbane Hitzeinseln	- Urbane Hitzeinseln sind deutlich schwieriger greif- und bekämpfbar als andere städtischen Probleme, wie zum Beispiel Wohnungsnot. - Da keine schnellen Erfolge erzielbar sind, ist es oft kein attraktives Thema für Politiker und Politikerinnen in den meisten Kommunen.
Teils fehlende integrierte Betrachtung von Klimaanpassung	- Einige Kommunen beklagen, dass Klimaschutz und Klimaanpassung nicht immer integriert betrachtet werden. - Viele Kommunen beklagen, dass Klimafolgenanpassung nicht immer sektorübergreifend gedacht wird.
Geringe Hilfestellungen für Kommunen	- Hilfestellungen sind besonders bei finanzschwachen Kommunen nötig. - Durch Hilfestellungen erhoffen sich viele Kommunen Vermeidung von Doppelarbeit.
Teils fehlende Vernetzung	- Viele Kommunen wünschen sich eine bessere Vernetzung auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene. - Unerfahrene Kommunen können von erfahrenen Kommunen lernen. - Vermeidung von Doppelarbeit.
Schwierigkeit der Umsetzung von	In vielen Kommunen lässt sich Fassadenbegrünung schwieriger umsetzen als Dachbegrünung. Gründe dafür sind u. a.:

Hemmnisse	Beispiele/ Anmerkungen
Fassadenbegrünung (im Vergleich zu Dachbegrünung)	○ Mehr Vorurteile gegenüber Fassadenbegrünung in der Bevölkerung, ○ Erhöhter Pflegeaufwand der Fassadenbegrünung.
Platzmangel für Maßnahmen gegen urbane Hitzeinseln	• Aufgrund zu enger städtischer Infrastruktur (z. B. Kabel, Kanalisation) finden einige Kommunen keinen Platz für neue Stadtbäume. • In allen Kommunen besteht der Zielkonflikt mit Wohnraumbedarf.
Unsicherheit bei Haftungsfragen	• Einige Kommunen nannten fehlende Information und Rechtssicherheit bei Haftungsfragen bei der Umsetzung von Maßnahmen gegen urbane Hitzeinseln.
Starre Fördermittelstruktur	• Einige Kommunen wünschen sich ein Umdenken in der Fördermittelstruktur, um eine effektive Förderung zu gewährleisten, die die Bedürfnisse der Kommune widerspiegeln, z. B. Förderung von Begrünung von sowohl öffentlichen als auch privaten Gebäuden in einem Programm.

3.2.3 Vorschläge und Handlungsoptionen

Die in den Interviews genannten Vorschläge zur Verbesserung der Handlungsoptionen von Kommunen bei der Klimafolgenanpassung und der Vermeidung von urbanen Hitzeinseln werden im Folgenden aufgelistet. Sie sind nach Häufigkeit und Relevanz sortiert. Die Auflistung beinhaltet auch besonders positive Beispiele aus der Praxis, die von den Interviewpartnern genannt wurden.

Tabelle 24: In den Interviews genannte Vorschläge zur Verbesserung der Handlungsoptionen

Vorschläge	Beispiele/ Anmerkungen
Klimaanpassung als Pflichtaufgabe durch starken gesetzlichen Rahmen	• Gesetzlich vorgeschriebene Klimaanpassungs- und Hitzeaktionsplanung, die verpflichtende Zuständigkeiten zuschreiben. • Verpflichtende Klimaverträglichkeitsuntersuchung (ähnlich zur Umweltverträglichkeitsuntersuchung). • Pflichtmaßnahmen anstatt freiwilliger Maßnahmen. • Konkrete Richtlinien oder Grenzwerte für klima- bzw. hitzeangepassten Städtebau (vergleichbar dem Lärmschutz). ○ Gutes Beispiel: Paris: bis 2020 soll jeder Pariser nicht mehr als 7 Minuten Fußweg zur nächsten Grün- oder Wasseranlage benötigen (Ville de Paris 2021). • Verbesserte rechtliche Stellung in folgenden Gesetzen: ○ BauGB: ▪ Klimaanpassung als Pflicht-, nicht nur Abwägungsaufgabe. ▪ Nachverdichtung im Quartier soll verpflichtend klimaangepasst erfolgen, unabhängig vom energetischen Zustand des Quartiers (§34 BauGB). ○ Städtebauförderung: ▪ Maßnahmen zur Klimafolgenanpassung als Voraussetzung für Städtebauförderungen. ▪ Gutes Beispiel: Hessen - Richtlinie des Landes Hessen zur Förderung der nachhaltigen Stadtentwicklung (RiLiSe) 2017: Städtebauförderung vorrangig für nachhaltige Stadtentwicklung (Hessisches Ministerium für Soziales und Integration 2017). ○ Bauleitpläne:

Vorschläge	Beispiele/ Anmerkungen
	▪ Stärkere Baubeschränkung oder Bauverbot in Kaltluftleitbahnen oder anderen sensiblen Gebieten (Klimatopen) anstatt nur Empfehlungen in der Planungshinweiskarte der Bauleitpläne und anschließender Abwägung. ▪ Nachträgliche Änderung der Bebauungspläne für Bestand. ○ Starke Klimagesetze auf Länderebene: ▪ gutes Beispiel Thüringer Klimagesetz – ThürKlimaG (2018): Klimaanpassung in § 10-13 verankert (Thüringer Landtag 2018a) ○ Verpflichtende Maßnahmen in andere bestehende städtische Satzungen integrieren, z. B. in Stellplatzsatzung oder Vorgärtensatzung. Problematik der Überprüfung. ○ Weitere Gesetze, von denen sich die Interviewpartner Verbesserungen gewünscht haben: ▪ Landesbauordnung ▪ Landeswassergesetze ▪ Straßenbauordnung
Mehr Budget für Klimaanpassung	• Separates, spezielles Budget für Klimaanpassung in Kommunen z. B. durch einen Klimaanpassungstitel. • Erhöhtes Budget ermöglicht langfristige Personalbindung und bessere Förderprogramme.
Verbesserung der Datengrundlage in Kommunen	• Klimaanalysen: ○ Verpflichtend für Kommunen, mit Vorlage vom Gesetzgeber. ○ Bessere Finanzierungshilfen für Klimaanalysen, insbesondere für kleinere Kommunen. ○ Regelmäßige Fortschreibung. • Folgewirkung von urbanen Hitzeinseln: ○ Hitzebedingte Mortalitäts- und Krankheitsrate in Kommunen berechnen. Verpflichtende Richtlinien zur Datenerhebung vom Bund. ▪ Gute Beispiele: Berlin: Fachartikel: durchschnittlich 5 % der Todesfälle von 2001 bis 2010 können statistisch auf erhöhte Temperaturen zurückgeführt werden (Scherer et al. 2013). Berlin & Hessen: Schätzungen der hitzebedingten Sterbefälle im Hitzesommer 2018: 490 (Berlin), 740 (Hessen) (Robert Koch Institut 2019). ○ Bessere Aufbereitung und Verbreitung von Kenndaten zu Hitze auf kommunaler Ebene (z. B. Anzahl Tropennächte). • Objektive Daten zur Wirksamkeit von Maßnahmen gegen urbane Hitzeinseln. ○ z. B. Temperaturreduktionspotenzial der verschiedenen Maßnahmen unter verschiedenen klimatischen Bedingungen (Dach- und Fassadenbegrünung, Wasserbewirtschaftung, Beschattung, Aufhellung von Oberflächen, Baumbestände, etc.). ○ Kenndaten zum Klimaverhalten von verschiedenen Oberflächentypen. ○ Kosten-Nutzen-Analyse, um Wirtschaftlichkeit zu demonstrieren.

Vorschläge	Beispiele/ Anmerkungen
Bundes- und Landesregierungen als aktive Vorreiter	▪ Gutes Beispiel: UBA-Studie zu Kosten und Nutzen von 28 Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel in Deutschland (Tröltzsch et al. 2012). ○ Aufbereiten der bestehenden wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Wirksamkeit von Maßnahmen in allgemeinverständlicher Sprache.
Bessere Vernetzung	• Aktionen auf Bundes- und Länderebene brauchen tatsächliche Ausstrahlung auf kommunale Ebene. ○ Gutes Beispiel: Thüringen: Klimaanpassungsstrategie (IMPAKT 2) und Klimagesetz (ThürKlimaG, (Thüringer Landtag 2018b)). • Innerhalb der Kommunen: ○ Stadtentwicklung und Klimaanpassung in einem Resort. ○ Regelmäßiger Austausch zu Klimaanpassung zwischen allen beteiligten Ämtern, z. B. durch langfristige Arbeitsgruppen. • Zwischen den Kommunen: ○ Kommunenübergreifende Workshops oder Projekttreffen, die den Wissenstransfer und Erfahrungsaustausch zwischen den Klimaanpassungsakteuren verschiedener Kommunen fördern. ➔ Beispiel: Experten-Workshop im Frühjahr 2020 im Rahmen dieses Projekts.
Hilfestellungen für Kommunen erweitern und besser bekanntmachen	• Bestehende Hilfestellungen verbreiten und Kommunen zugänglich machen. ○ Gutes Beispiel: Klimavorsorgeportal (KliVo, (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2020)) der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS): bündelt Daten und Informationen zum Klimawandel und Klimafolgenanpassung für Kommunen. • Hilfestellungen zur Umsetzung von Maßnahmen zur Klimafolgenanpassung erweitern, insbesondere für kleinere Kommunen, die finanziell schwächer gestellt sind und weniger Erfahrung zum Thema mitbringen als größere Kommunen.
Informationen für Bevölkerung besser bekanntmachen	• Bestehende Hilfestellungen verbreiten und der Bevölkerung besser zugänglich machen. ○ Gutes Beispiel: Praxisratgeber Klimagerechtes Bauen des difu (Jolk et al. 2017a): informiert Bürger*innen über Maßnahmen für Neubau und Bestand und nennt weitere Informationsquellen und Beratungsstellen.
Erhöhung der Handlungsfähigkeit und Rechtssicherheit	• Identifikation von konkreten, umsetzbaren Schlüsselmaßnahmen anstatt abstrakter Ziele. • Erhöhte Rechtssicherheit bei Haftungsfragen.
Reduktion der administrativen Hürden bei Förderprogrammen	• Der hohe administrative Aufwand bei der Fördermittelakquise ist eine große Hemmschwelle für Kommunen und bindet viel Personal.

3.3 Experten-Workshop

Am 31.3.2020 fand im Rahmen des Forschungsvorhabens ein Fachgespräch statt, in dem die Ergebnisse mit Expert*innen aus Wissenschaft und Praxis diskutiert wurden. Dabei machten die Vertreterinnen und Vertreter verschiedener Kommunen mit etwa der Hälfte den größten Anteil der Teilnehmenden aus, gefolgt von Wissenschaftler*innen sowie Expert*innen aus der Planung

von Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln. Der Workshop wurde aufgrund der Corona-Situation im Online-Format durchgeführt.

Im Rahmen des Fachgesprächs wurden die Ergebnisse der Mikroklimasimulation für die Quartiere in Tunis und Köln vorgestellt und mit den Teilnehmenden diskutiert. In der anschließenden offenen Diskussionsrunde wurden weitere Vorschläge zur Umsetzung von Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzeinseln eingebracht. Insbesondere wurden die Nutzung von Grünflächenfaktoren, die Nutzung von Gelegenheitsfenstern bei ohnehin anstehenden Umgestaltungsmaßnahmen sowie die stärkere Berücksichtigung von Verdunstung zur Vermeidung von Hitzeinseln hervorgehoben. Die Vorschläge wurden in die weitere Projektbearbeitung aufgenommen.

4 Vorschläge zur Anpassung des rechtlichen Rahmens und weiterer Instrumente

Im Folgenden werden Vorschläge zur Verbesserung verschiedener Aspekte rund um die Themenfelder Stadtraumklima, sommerlicher Wärmeschutz und nachhaltige Gebäudekühlung entwickelt. Die Vorschläge sind teilweise aus den Ergebnissen der im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungen abgeleitet, teilweise werden aber auch zusätzliche relevante Aspekte aufgegriffen. Die Auswahl der Vorschläge erfolgte auf der Grundlage einer zuvor erstellten Auswahl, die im Rahmen einer Projektbesprechung auf die aus Sicht des Auftraggebers und der Autoren zehn wichtigsten Punkte reduziert wurde. Thematisch werden identifizierte Verbesserungsmöglichkeiten sowohl bei kommunalen, länderspezifischen und nationalen als auch transnationalen (EU-)Rechtsvorschriften und Regelungen aufgegriffen. Auch Förderprogramme wurden berücksichtigt.

4.1 Überwindung der Hindernisse für natürliche Kältemittel

Durch die europäische F-Gas-Verordnung (EU 2014) werden die bisher üblichen fluorierten Kältemittel mit höherem Treibhauspotenzial für Kälte-/Klimaanlagen und Wärmepumpen weiter verknappt und teurer werden. Der Einsatz von natürlichen, d. h. fluorfreien Kältemitteln als Alternative kann sowohl die Emission von fluorierten Treibhausgasen (F-Gase), von neuen fluorierten Gasen als auch den Eintrag von persistenten (d. h. sehr stabilen) und grundwassergängigen atmosphärischen Abbauprodukten aller fluorierten Kältemittel deutlich reduzieren (Behringer et al. 2021).

In Geräten mit geringer Kälteleistung wie Kühlschränken sind natürliche Kältemittel, heute meist der Kohlenwasserstoff Isobutan, schon lange Standard (Vogelsammer 2021). Auch für Wärmepumpen in Wäschetrocknern (Jendrischik 2020) oder für die Hausbeheizung (z. B. Fraunhofer 2019, HAUTEC Wärmepumpen, Energie-Experten.org 2021) werden Systeme mit natürlichen Kältemitteln wie dem Kohlenwasserstoff Propan angeboten.

Obwohl Anlagen, die natürliche Kältemittel verwenden, seit langer Zeit entwickelt und erprobt werden, steigt die Anzahl von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln für Kühlung und Beheizung von Räumen bisher nur langsam. Ein Grund dafür ist die Brennbarkeit einiger natürlicher Kältemittel. Kohlenwasserstoffe wie Propan, Butan und Isobutan werden in der Norm ISO 817 zur Kältemittelklassifizierung in die Sicherheitsklasse A3 (geringe Toxizität, höhere Brennbarkeit) eingestuft, Ammoniak in die Klasse B2L (höhere Toxizität, geringere Brennbarkeit). Bei einem Schaden oder Leck an den kältemittelführenden Bauteilen oder Leitungen besteht durch austretendes Kältemittel Brand- und Explosionsgefahr. Für den sicheren Einsatz von brennbaren Kältemitteln müssen daher sowohl die Komponenten und der Anlagenaufbau angepasst als auch Risikoanalysen erstellt werden.

Für die maximal zulässigen Füllmengen für brennbare Kältemittel gelten unterschiedliche Werte, die sich nach Kältemittel, verwendeter Norm und Einbausituation unterscheiden.

Für die Außenanwendung gilt keine Füllmengenbegrenzungen, da die Bildung gefährlicher Konzentrationen wenig wahrscheinlich ist. Jedoch gibt es Vorgaben für die Gewährleistung der Sicherheit und die Einhausung. Für Geräte in Räumen/ Gebäuden sind verschiedene maximal zulässige Füllmengen für den Einsatz von brennbaren Kältemitteln festgelegt, je nach Raumlage, Raumgröße, Zugänglichkeit und Kältemittel.

Obwohl die maximal zulässige Füllmenge von 150 g brennbarem Kältemittel (unabhängig von der Raumgröße) aus der Norm DIN EN 60335-2-24 (2019) nur für Haushaltskühlgeräte galt,

wurde sie auf andere Normen der Reihe übertragen (Colbourne 2020). In vielen Fällen wurden dabei wichtige Faktoren, wie die Raumgröße, die Position im Raum und zusätzlich mögliche Sicherheitsvorkehrungen nicht berücksichtigt, was den Einsatz von natürlichen Kältemitteln in Kühl- und Klimageräten sowie Wärmepumpen mit höherer Leistung bisher erschwerte (Colbourne 2020).

In den letzten Jahren wurden diese Höchstwerte in den europäischen Normungsgremien intensiv diskutiert und einige Anpassungen in einschlägigen Normen vorgenommen oder angeregt. Im gültigen Entwurf liegen nun die Produktnormen (DIN EN IEC 60335-2-40/A11) für elektrisch betriebene Wärmepumpen, Klimageräte und Raumluft-Entfeuchter und (DIN IEC 60335-2-89) für gewerbliche Kühl-/Gefriergeräte vor. Die EN 378-Reihe (DIN EN 378-2:2018-04; DIN EN 378-4:2019-12; DIN EN 378-3:2020-12; DIN EN 378-1:2021-06) enthält ebenfalls Füllmengenvorgaben für Kälteanlagen und Wärmepumpen in Abhängigkeit der Raumgröße, Anpassungen werden weiter diskutiert. Im Gegensatz zu den auch brennbaren fluorierten A2L-Kältemitteln, die zudem im Brandfall giftige Fluorverbindungen bilden, sind die heute möglichen Füllmengen für Anlagen mit natürlichen brennbaren Kältemitteln (außer im Außenbereich) immer noch vergleichsweise niedrig.

Ein Normungsauftrag der EU Mandat M/555 (European Commission 2021) führte zu zwei die Normen ergänzenden Technischen Spezifikationen für Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen mit brennbaren Kältemitteln: zur Installation (CEN/TS 17606:2021) und zu Betrieb, Wartung, Instandhaltung, Reparatur und Außerbetriebnahme (CEN/TS 17607:2021). Die CEN/TS 17606 befasst sich mit Hinweisen zur alternativen Risikoanalyse. Auf dieser Basis kann der sichere Einsatz von brennbaren natürlichen Kältemitteln in Anlagen mit höheren Füllmengen erweitert werden und so umweltfreundlicheres Heizen und Kühlen ermöglichen.

Einige Firmen bieten schon Anlagenkonzepte mit natürlichen Kältemitteln an. Für den erfolgreichen Einsatz brennbarer Kältemittel empfiehlt es sich, bereits bei der Planung des Gebäudes oder des Umbaus Fachfirmen für Klima- und Heizungstechnik einzubinden, die Erfahrungen mit Anlagen mit natürlichen Kältemitteln haben. Dies ist notwendig, um sinnvolle Anlagenkonzepte und die Anforderungen an Bauraum, Lüftung, Schallschutz und eventuelle regionale Baubestimmungen usw. von Anfang an einzubeziehen.

Folgende Maßnahmen können die breitere Einführung von Kälte-/ Klimatechnik mit natürlichen Kältemitteln unterstützen:

- Verabschiedung der bisherigen Normentwürfe.
- Weitere Prüfung und Überarbeitung der einschlägigen Kältenormen zur Verbesserung der Einsatzbedingungen für A3-Kältemittel, Anpassung und ggf. Erhöhung der maximal zulässigen Füllmengen für A3-Kältemittel verhältnismäßig zu den bereits erfolgten Verbesserungen für fluorierte brennbare A2L-Kältemittel.
- Einbeziehung des Fachwissens von Firmen, die natürliche Kältemittel anbieten, an der Normerarbeitung, Mitarbeit in den Normengremien fördern.
- Förderung von Fachschulungen speziell zu den Normen und deren Anwendung für natürliche (halogenfreie) Kältemittel für die Kältebranche, um sowohl Regelungen und neue Möglichkeiten kennenzulernen als auch Wege zum Einsatz von natürlichen Kältemitteln aufzuzeigen.
- Förderung von Planern für halogenfreie Kälte-/ Klimatechnik.

- Keine Förderung von Anlagen mit halogenierten Kältemitteln in öffentlichen Förderprogrammen (wie es bereits vorbildlich in der Kälte-Klima-Richtlinie (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAfA)) praktiziert wird).
- Vorbildwirkung des Bundes und der Länder nutzen, indem neue Kälte-/ Klimatechnik nur mit natürlichen (halogenfreien) Kältemitteln beschafft wird.
- Im Kälte-/ Klimahandwerk: Fortbildung speziell zur Sachkunde im Umgang mit A3-Kältemitteln, um Sicherheitsaspekte zu vermitteln und ggfs. Vorurteile und Berührungsängste zu beseitigen.
- Unabhängige Beratungsplattform für natürliche Kältemittel.
- Sensibilisierung von Architekten, Planern und Bauherren für halogenfreie Kühlkonzepte, z. B. Bekanntmachung von guten Praxisbeispielen in Bau- und Architektenzeitschriften, auf einschlägigen Plattformen, in Schulungen und auf Tagungen.
- Erstellung eines Verzeichnisses mit einschlägiger Firmen und guten Praxisbeispielen (beides online).

4.2 Wirtschaftlichkeitsgebot und sommerlicher Wärmeschutz im GEG

4.2.1 Ausgangslage

Der sommerliche Wärmeschutz von Gebäuden kann einen wichtigen Beitrag leisten, um im Sommer die Temperaturen im Innenraum auf einem erträglichen Niveau zu halten. Zudem können Maßnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes in Gebäuden mit aktiver Kühlung dazu beitragen, den Energiebedarf für die Kälteerzeugung zu reduzieren.

Im Gebäudeenergiegesetz (GEG) wird der sommerliche Wärmeschutz in neu zu errichtenden Gebäuden in § 14 adressiert. § 14 (1)-(3) legen fest, dass die Gebäude mit baulichen Maßnahmen zur Begrenzung der Sonneneinstrahlung versehen werden müssen und konkretisieren die Anforderungen mit Bezug auf DIN 4108-2.

In § 14 (4) werden die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz unter den Vorbehalt der Wirtschaftlichkeit gestellt, sofern im Gebäude Anlagen zur Kühlung vorhanden sind.

4.2.2 Beurteilung

Durch den Vorbehalt der Wirtschaftlichkeit in § 14 (4) gelten somit in Gebäuden ohne aktive Kühlung strengere Vorgaben als in solchen, in denen Anlagen zur Kühlung vorhanden sind. Dies könnte somit ein Anreiz darstellen, Anlagen zur Kühlung in Gebäuden einzuplanen.

Da die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz nach § 14 (1)-(3) für ungekühlte Gebäude offensichtlich unabhängig von den zu erwirtschaftenden Einsparungen sind, ist eine Einschränkung der Anforderungen in § 14 (4) für gekühlte Gebäude nicht über den Grundsatz der Wirtschaftlichkeit zu rechtfertigen.

4.2.3 Verbesserungsvorschlag

Vor dem Hintergrund des zunehmenden Einsatzes von aktiver Kühlung sollten die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz auch dann uneingeschränkt zur Geltung kommen, wenn das Gebäude über Anlagen zur Kühlung verfügt. Der § 14 (4) sollte demnach ersatzlos gestrichen werden.

4.3 Schärfung der ordnungsrechtlichen Anforderungen zur Begrenzung des Kühlenergiebedarfs von Gebäuden

Verbesserungsvorschlag zur Umsetzung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG).

4.3.1 Ausgangslage

Bedingt durch den Klimawandel und urbane Hitzeinselbildungen kommt es in vielen Gebäuden zu einer zunehmenden sommerlichen Überhitzungsproblematik. Dies führt dazu, dass vor allem in Neubauten immer mehr aktive Kühlanlagen eingesetzt werden. Bei neuen Wohngebäuden mit Fußbodenheizung wird die Kühlung nicht selten durch auf Kühlbetrieb umschaltbare Luft-Wasser-Wärmepumpen realisiert.

4.3.1.1 Aktuelle Berücksichtigung GEG

Gem. § 14 des GEG sind Gebäude so zu errichten, dass der Sonneneintrag durch einen ausreichenden baulichen sommerlichen Wärmeschutz nach den anerkannten Regeln der Technik begrenzt wird. Maßgeblich hierfür ist das Einhalten der Anforderungen der DIN 4108-2: 2013-02.

Gemäß GEG § 15 und § 18 darf der rechnerische Jahresgesamtprimärenergiebedarf von Neubauten das 0,75fache der entsprechenden in Anlage 1 (Wohngebäude) bzw. Anlage 2 (Nichtwohngebäude) spezifizierten Referenzgebäude nicht überschreiten.

4.3.1.1.1 Wohngebäude

Beim Referenzwohngebäude wird derzeit weder ein Sonnenschutz noch eine Kühlung berücksichtigt.

Vorgesehene Kühlsysteme sind bei der Bestimmung des Jahresprimärenergiebedarfs zu berücksichtigen. Dabei muss das für Wohngebäude derzeit immer noch unübliche Rechenverfahren nach DIN V 18599: 2018-09 angewendet werden.

4.3.1.1.2 Nichtwohngebäude

Beim Referenznichtwohngebäude ist die gleiche Sonnenschutzvorrichtung wie diejenige des zu errichtenden Gebäudes anzunehmen. Für die Raumkühlung wird unterschieden zwischen Nur-Luft-Klimaanlagen und Raumkühlung. Für jede der beiden Raumkühlungsarten werden spezifische Parameter und Kennwerte vorgegeben. Der Primärenergiebedarf für das Kühlsystem und die Kühlfunktion der raumlufttechnischen Anlage darf für Zonen der Nutzungen 1 bis 3 (Büros), 8 (Klassenzimmer), 10 (Bettenzimmer), 16 (WCs), 18 bis 20 (Neben- und Verkehrsflächen sowie Lager) und 31 (Turnhallen) nur zu 50 % angerechnet werden.

4.3.2 Beurteilung

4.3.2.1 Wohngebäude

Grundsätzlich wird durch die aktuellen normativen Vorgaben sichergestellt, dass der Primärenergiebedarf einer Kühlung in zu errichtenden Wohngebäuden vollständig durch energetische Maßnahmen aus anderen Bereichen ausgeglichen werden muss. Der Umstand, dass im Referenzgebäude kein Sonnenschutz vorgegeben wird, wird jedoch als unglücklich eingeschätzt. Diese Beurteilung beruht auf der Einschätzung, dass dem sommerlichen Wärmeschutz bei der Wohngebäudeplanung in der Regel ohnehin eine, vergleichsweise, geringe Bedeutung beigemessen wird und behördliche Prüfungen zum sommerlichen Wärmeschutz offensichtlich sehr selten stattfinden.

Darüber hinaus ist bei der derzeit sicher nicht unüblichen Praxis einer Kühlung über umschaltbare Luft-Wasser-Wärmepumpen zu befürchten, dass diese bei der Berechnung häufig unberücksichtigt bleiben. Dies würde nämlich zum einen für den Fachplaner i. d. R. eine Umstellung des üblichen Rechenverfahrens (nach DIN 4108/4701) bedeuten und zum anderen auch den rechnerischen Primärenergiebedarf negativ beeinflussen, so dass ggf. weitere Maßnahmen zum Erreichen des angestrebten Wärmeschutzniveaus erforderlich würden. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass eine Überprüfung eines unberücksichtigten Vorhandenseins einer Kühlfunktion der Wärmepumpe nicht stattfindet.

4.3.2.2 Nichtwohngebäude

Bei den Nutzungen, für die nur 50 % des Kühlenergiebedarfs angerechnet werden darf (u. a. Büros und Klassenzimmer) wird durch die aktuellen normativen Vorgaben sichergestellt, dass bei der Vorsehung einer Kühlung diese entweder hocheffizient oder durch energetische Maßnahmen aus anderen Bereichen ausgeglichen werden muss. Dass dabei jedoch beim Referenzgebäude nur der Sonnenschutz des geplanten Gebäudes zu berücksichtigen ist, ist kritisch zu beurteilen. Darüber hinaus bleiben selbst bei einer Einhaltung der Minimalanforderungen der DIN 4108-2: 2013-02 oft erhebliche Energiebedarfsreduktionspotenziale durch mögliche effizientere Sonnenschutzmaßnahmen unberücksichtigt.

4.3.3 Verbesserungsvorschläge

4.3.3.1 Wohngebäude

Die Berechnungen im Rahmen des Forschungsvorhabens haben gezeigt, dass durch wirksamen Sonnenschutz in kühlen Sommerklimaregionen in vielen Fällen maschinelle Kühlung entbehrlich ist. Auch für den Fall, dass zur Sicherstellung der angestrebten Minimalanforderungen an die Behaglichkeit eine Kühlung nicht vermieden werden kann, ist ein wirksamer Sonnenschutz eine wichtige Grundvoraussetzung, um den Kühlenergiebedarf zu begrenzen.

Es wird daher vorgeschlagen im Referenzgebäude als Sonnenschutz *für alle südlich orientierten Fenster* die Kennwerte einer *manuell betriebenen weißen außenliegenden-Jalousie (45°-Stellung)* zu verwenden. Für alle *östlich- oder westlich orientierten Fenster* wird vorgeschlagen die Kennwerte für *manuell betriebene dunkelgraue Rollläden (3/4 geschlossen)* anzusetzen.

Zur Vermeidung der mutmaßlich häufigen Nichtberücksichtigung der Kühlfunktion von Luft-Wasserwärmepumpen wird vorgeschlagen, beim geplanten Einsatz von solchen im Energiebedarfsnachweis eine ausdrückliche Erklärung der vorgesehenen Funktion (nur Heizen oder Heizen und Kühlen) einzufordern. Dies sollte ggf. auch bei der Endabnahme des Gebäudes überprüft werden.

4.3.3.2 Nichtwohngebäude

Anstelle der bisherigen einfachen Übernahme der Sonnenschutzkennwerte aus dem geplanten Gebäude wird vorgeschlagen, bei Nichtwohngebäuden als Referenzsonnenschutz *für alle nicht nördlich orientierten Fenster* die Kennwerte einer *in Abhängigkeit der Einstrahlung automatisch betriebenen weißen Außen-Jalousie (45°-Stellung)* zu verwenden.

4.4 Praxishilfe für Prüfbehörden

Vorschläge zur Verbesserung des Vollzugs der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz gem. DIN 4108-2: 2013-02.

4.4.1 Ausgangslage

Zur Sicherstellung des sommerlichen Wärmeschutzes bei Neubauten sieht das GEG in § 14 eine Prüfung auf der Grundlage der DIN 4108-2: 2013-02 vor. Der Nachweis zur Einhaltung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz ist demnach mindestens für den Raum zu führen, der zu den höchsten Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes führt (kritischer Raum). Trotz der Existenz dieser Anforderung kommt es offenbar bei vielen Neubauten zu einer sommerlichen Überhitzung, die nicht selten die Nachrüstung einer Klimaanlage zur Folge hat. Dies kann sowohl auf unzureichende Anforderungen der Norm (Schlitzberger 2013) als auch auf eine verbreitete Missachtung der gesetzlichen Anforderungen zurückgeführt werden.

Nicht zuletzt auch aufgrund des verhältnismäßig großen Prüfaufwandes der verantwortlichen Behörden ist davon auszugehen, dass derzeit viele Bauanträge unzureichend auf die Einhaltung der Minimalanforderungen der DIN 4108-2: 2013-02 geprüft werden.

4.4.2 Ziel

Anhand einer einfachen und übersichtlichen Checkliste könnte den Prüfbehörden ein Mittel bereitgestellt werden, um den Umfang und die Qualität der notwendigen Prüfungen zu verbessern und somit einen wichtigen Beitrag zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen und somit letztendlich zur Verbesserung des sommerlichen Raumklimas und Verringerung des Kühlenergiebedarfs in Neubauten zu leisten.

4.4.3 Vorschlag einer Checkliste

Um den Prüfungsaufwand der Behörden zu minimieren, sollten die Prüfpunkte der Checkliste hierarchisch geordnet sein, so dass der Aufwand zur Erkennung grober Verstöße minimal ist. Die folgende Tabelle versteht sich als ein erster Vorschlag einer möglichen Checkliste, der in Zusammenarbeit mit den Prüfbehörden und auf Basis von praktischen Erfahrungen weiterentwickelt werden sollte. Denkbar wäre auch eine softwaretechnische Umsetzung, die ggf. ergebnisabhängig gleichzeitig auch schon automatische Texte für die Rückmeldungsschreiben zum Bauantrag erzeugen könnte.

Tabelle 25: Entwurf Checkliste zur Prüfung des sommerlichen Wärmeschutzes bei Bauanträgen

Prüffrage	Anmerkung	Ergebnisabhängige
1. Enthalten die Bauantragsunterlagen Angaben zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes?		Ja => Weiter zu Prüffrage 2 Nein => Aufforderung zum Nachreichen der Unterlagen
2. Wurde zur Prüfung der mutmaßliche kritische Raum ausgewählt?	Hierzu ist eine Lokalisation des ausgewählten Raumes in den Grundrissen erforderlich. Maßgeblicher Parameter für eine erste Beurteilung ist das Verhältnis zwischen (nicht nördlich orientierter) Fensterfläche zur Grundfläche. Besonders kritisch sind Dachfenster.	Ja => Weiter zu Prüffrage 3 Nein => Aufforderung zur Nachbesserung
3. Welche Art der Nachweisführung wurde gewählt?		a) Ausnahmetatbestand gem. DIN 4108-2, Abschnitt 8.2.2. - Wohngebäude mit einem

Prüffrage	Anmerkung	Ergebnisabhängige Handlungsempfehlung
		Fensterflächenanteil⁸¹ des kritischen Raumes von $\leq 35\%$ => Weiter zu Prüffrage 4 - Fensterflächenanteil des kritischen Raumes von $< 10\%$⁸² => Weiter zu Prüffrage 5 b) Rechnerischer Nachweis nach dem Sonneneintragskennwertverfahren bzw. durch Gebäudesimulationen => Weiter zu Prüffrage 6 c) keine => Aufforderung zum Nachreichen der Unterlagen
4. Ist für alle nicht überwiegend nördlich orientierten Fenster ein ausreichender außenliegender Sonnenschutz vorgesehen?	Als ausreichender außenliegender Sonnenschutz zählen u. a. Rollläden, Jalousien, Raffstores. ⁸³	Ja => Prüfung erfolgreich Nein => Aufforderung zur Nachbesserung
5. Ist der Fensterflächenanteil des kritischen Raumes geringer als die Grenzwertvorgaben für den Ausnahmetatbestand?	Dass der kritische Raum derartig geringe Fensterflächenanteile aufweist, ist für die meisten Gebäudetypen unwahrscheinlich.	Ja => Prüfung erfolgreich Nein => Aufforderung zur Nachbesserung
6. Wurden die Berechnungen ordnungsgemäß durchgeführt?	Die Prüftiefe liegt im Ermessensspielraum des Prüfers. Eine (zu optimierende) Liste sollte die häufigsten Fehlerquellen der Berechnungen auflisten, z. B: - Abminderungsfaktoren der Sonnenschutzvorrichtungen: Bei üblichem Sonnenschutz muss $F_c \geq 0,25$ sein. - Abminderungsfaktoren F_c bei Dachflächenfenstern: Aus Kostengründen wird - wenn überhaupt - häufig nur ein innenliegender Sonnenschutz vorgesehen (=> Abminderungsfaktor $F_c \geq 0,65$). - Bauart: Bei Häusern, die in Holzbauweise errichtet werden (oft Fertighäuser) ist i. d. R. eine leichte Bauart anzusetzen. Eine schwere Bauart ist selten.	Ja => Prüfung erfolgreich Nein => Aufforderung zur Nachbesserung

⁸¹ grundflächenbezogen⁸² Ausnahmen: bei ausschließlichen Dachfenstern $< 7\%$ bzw. $< 15\%$ bei ausschließlich nördlichen Fassadenfenster⁸³ und Markisen parallel zu Verglasung mit einer geringen Transparenz von $< 15\%$

Prüffrage	Anmerkung	Ergebnisabhängige Handlungsempfehlung
	- Nachtlüftung: Die praktische Umsetzbarkeit einer ggf. angesetzten hohen Nachtlüftung ($n > 5 \text{ 1/h}$) ist kritisch zu hinterfragen. Da hierfür großflächige Öffnungen vorhanden sein müssen, sind damit i. d. R. weitere Problematiken wie Einbruchschutz, Schutz vor Außenlärm und Witterung verbunden, die einer gesonderten Lösung bedürfen.	

4.5 BEG: Vorschlag zur Berücksichtigung von natürlichen Kältemitteln (Bonus-Regelung)

4.5.1 Ausgangslage

Die Bundesförderung für Effiziente Gebäude (BEG)⁸⁴ ist ein zentraler Eckpfeiler zur Erreichung der Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Die BEG ist untergliedert in die drei Teilbereiche

- ▶ Wohngebäude (BEG WG)
- ▶ Nichtwohngebäude (BEG NWG)
- ▶ Einzelmaßnahmen (BEG EM)

Die Förderung wird entweder als zinsvergünstigter Kredit oder als Investitionskostenzuschuss gewährt. Die Förderhöhe ist anhängig von der Qualität der Maßnahmen.

Im Rahmen der BEG werden zusätzlich zur Grundförderung unterschiedliche Boni gewährt (z. B. für den Einsatz Erneuerbarer Energien, nachgewiesene Nachhaltigkeit oder ein Innovationsbonus Biomasse für emissionsarme Biomasseanlagen).

Im Rahmen der Einzelmaßnahmenförderung der BEG⁸⁵ wird u. a. effiziente Kältetechnik zur Raumkühlung in Bestandsnichtwohngebäuden gefördert. Kompressionskälteanlagen müssen dazu gemäß den technischen Mindestanforderungen⁸⁶ über eine Leistungsregelung verfügen und einem typenabhängigen Mindest-Jahresnutzungsgrad⁸⁷ erreichen. Der Fördersatz beträgt 20 % der förderfähigen Ausgaben. Förderfähig sind dabei sowohl die Materialkosten sowie die Kosten für fachgerechten Einbau und die Einregulierung durch die jeweiligen Fachunternehmen.

Für die Raumkühlung werden in der Praxis derzeit weit überwiegend Kompressionskälteanlagen mit klimaschädlichen teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) eingesetzt.

Die Verwendung teilfluorierter Kohlenwasserstoffe wird auf EU-Ebene durch die Verordnung (EU) Nr. 517/2014 begrenzt. Das CO₂-äquivalente Treibhauspotenzial der in den Markt

⁸⁴ Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAfA)

⁸⁵ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 17.12.2020

⁸⁶ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020

⁸⁷ gemäß Herstellernachweise zu den produktspezifischen Kenndaten

gebrachten teilfluorierten Kohlenwasserstoffe soll demnach bis zum Jahr 2030 auf ein Fünftel der Ausgangsmenge (183,1 Mio. t CO₂-Äquivalent im Jahr 2015) reduziert werden.

Der Anteil an der Gesamtklimawirkung, der durch direkte Emissionen der Kältemittel durch Leckagen im Betrieb, bei der Wartung/Reparatur und bei der Entsorgung von Kältemaschinen entsteht, ist von vielen Faktoren abhängig. Er liegt im Bereich zwischen jährlich 3-17 % (Offermann et al. 2016). Mit sinkendem CO₂-Emissionsfaktor für Strom steigt dieser entsprechend.

Ein möglicher Ausschluss von Wärmepumpen mit fluorierten Kältemitteln von der Förderung ist derzeit nicht vorgesehen, soll aber bis 1. Januar 2025 überprüft werden. Zumindest wird jedoch die Verwendung von natürlichen Kältemitteln oder synthetischen Kältemitteln mit einem geringen Treibhauspotenzial (GWP – Global Warming Potential) empfohlen.

4.5.2 Verbesserungsvorschlag

Als klimawirksame Sofortmaßnahme wird, analog zum Innovationsbonus für emissionsarme Biomasseanlagen, vorgeschlagen, bis zum Zeitpunkt eines etwaigen Ausschlusses der Förderung von Anlagen mit fluorierten Kältemitteln *einen Innovationsbonus von 5 % für kältetechnische Anlagen und Wärmepumpen zu gewähren, wenn diese keine fluorierten Kältemittel (sondern natürliche Kältemittel wie etwa Propan) einsetzen.*

Auch bei der BEG-Förderung von Neubauten wäre z. B. in Form einer Ergänzung der Nachhaltigkeitsklasse auch eine angemessene Bonusregelung für den Einsatz von Wärmepumpen oder Klimaanlage ohne fluorierte Kältemittel denkbar.

Durch diese Anreize könnte nicht zuletzt auch das derzeit offenbar fehlende Bewusstsein zur Verwendung dieser klimaschonenden Techniken gestärkt und somit ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung Klimaneutralität gegangen werden.

4.6 Definition erneuerbarer Kühlung im Rahmen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU

4.6.1 Ausgangslage

Die EU-Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Renewable Energy Directive (RED⁸⁸) sowie deren Neufassung RED II⁸⁹) setzen den Rahmen für den Ausbau von erneuerbaren Energien in der EU. Im Rahmen der Nationalen Energie- und Klimapläne (NECPs) berichten die EU-Mitgliedstaaten über den Fortschritt in Bezug auf die Ziele für den Ausbau erneuerbarer Energien im Rahmen der RED, wobei die berichteten Zahlen aufgegliedert sind in die Bereiche Strom (RES-E), Wärme und Kühlung (RES-H&C) sowie Verkehr (RES-T).

Während die RED die Methodik zur Berechnung der Anteile erneuerbarer Energien für Strom, Wärme und Verkehr vorgibt, bietet sie keine Hinweise darauf, wie der Anteil an erneuerbarer Kälte zu berechnen ist. Aufgrund der fehlenden methodischen Leitlinien können die Mitgliedsstaaten derzeit keine erneuerbare Kühlung ausweisen. Kühlung spielt daher derzeit keine Rolle für die Zielerreichung.

Gemäß der Neufassung der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie der EU aus dem Jahr 2018 (RED II) muss die Kommission im Rahmen eines delegierten Rechtsaktes die Festlegung einer Methodik zur Berechnung der Menge, der für Kühlung und Fernkälte genutzten erneuerbaren

⁸⁸ Richtlinie 2009/28/EG (Amtsblatt der Europäischen Union 2009)

⁸⁹ Richtlinie EU 2018/2001 (Amtsblatt der Europäischen Union 2018)

Energie bis Dezember 2021, vorlegen. Ein ähnlicher Ansatz wurde für Wärmepumpen gewählt. Leitlinien für die Mitgliedstaaten zur Berechnung der erneuerbaren Energie von Wärmepumpen gemäß Artikel 5 der RES-Richtlinie wurden im Jahr 2013 veröffentlicht.

Die Festlegung der Berechnungsmethodik kann potenziell einen wichtigen Einfluss darauf haben, welche Techniken als „erneuerbar“ eingestuft werden und somit zur Zielerreichung im Rahmen der RED beitragen. Die Methodik wird derzeit im Auftrag der Europäischen Kommission erarbeitet⁹⁰ und wurde im Herbst 2020 in einer Stakeholder-Konsultation bewertet. Ein finaler Vorschlag zur Definition liegt Stand April 2021 nicht vor.

4.6.2 Optionen für die Definition erneuerbarer Kälte

Die Definition von erneuerbarer Kälte im Rahmen der RED II kann grundsätzlich zwei Komponenten beinhalten: Anforderungen an den für die Kälteerzeugung genutzten Strom⁹¹ sowie direkte oder indirekte Anforderungen an die genutzte Wärmesenke. Da der Stromverbrauch in der RED und RED II separat erfasst wird, konzentriert sich die Definition von erneuerbarer Kälte v. a. auf den Anteil der Umgebungsenergie.

Ein ähnlicher Ansatz wird in der RED/RED II für Wärmepumpen gewählt, wo die genutzte Umgebungsenergie als erneuerbar eingestuft wird, sofern die Effizienz der Wärmepumpe einen festgelegten Schwellenwert überschreitet. Die Effizienz der Wärmepumpe ist dabei als Seasonal Performance Factor (SFP⁹²) definiert. Während Wärmepumpen die Umgebungsenergie zum Heizen nutzbar machen, verwendet konventionelle Kältetechnik die Umgebungsenergie lediglich für die „Entsorgung“ der Abwärme des Kälteprozesses.

Grundsätzlich dienen die festzulegenden Mindestanforderungen an die Definition von erneuerbarer Kälte dazu, die durch die Wärmepumpe im Kältemodus an die Umgebung abgegebene Wärmemenge, die als erneuerbare Kälte angerechnet werden kann, in sinnvoller Weise zu begrenzen. Der Bereich der möglichen Definitionen ist dabei am unteren Ende durch die Situation begrenzt, in der keine Umgebungsenergie als erneuerbare Kühlung anerkannt wird (d. h. keine Anrechnung von konventioneller Kältetechnik in der RED II), sowie am oberen Ende durch die Situation, in der die gesamte Umgebungsenergie einbezogen ist (d. h. unabhängig von der Kühlanwendung, der Effizienz des Systems oder der Art der verwendeten Kältequelle).

In Braungardt et al. (2019) werden die nachfolgenden Optionen zur Berücksichtigung erneuerbarer Kälte in der EU-Erneuerbaren-Energien-Richtlinie betrachtet:

4.6.2.1 Option 1: Mindestanforderungen an die Energieeffizienz

Option 1 verfolgt den gleichen Ansatz wie für Wärmepumpen im Heizmodus und definiert die Mindestanforderungen über den Wirkungsgrad der Kälteerzeugung. Neben der Konsistenz zur Methodik für Wärmepumpen besteht der Vorteil dieses Ansatzes darin, dass nur Techniken einbezogen werden, die Mindeststandards für Energieeffizienz erfüllen und somit zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen. Allerdings stellt die Definition der Mindeststandards im Vergleich zum Ansatz für Wärmepumpen eine größere Herausforderung dar: Für die Heizung werden die Mindestanforderungen an den SPF so gewählt, dass der für die Stromgestehung erforderliche fossile Brennstoffeinsatz geringer ist als der für die Bereitstellung von Wärme auf der Grundlage der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Das bedeutet, dass die von

⁹⁰ Siehe Tender N° ENER/C1/2018-493: Renewable Cooling under the Revised Renewable Energy Directive (European Commission (DG Energy) 2018)

⁹¹ Bei Ad-/ Absorptionskälte könnten auch Anforderungen an die für die Kälteerzeugung genutzten Wärme gestellt werden, aufgrund der weitaus höheren Bedeutung von Strombasierten Systemen konzentriert sich die Betrachtung auf diesen Bereich.

⁹² Siehe Annex VII der Richtlinie

Wärmepumpen bereitgestellte Nutzwärme fossile Brennstoffe direkt ersetzt. Im Gegensatz dazu werden bei der Kälteerzeugung keine Verbrennungsprozesse ersetzt, so dass die Festlegung der Mindeststandards keine klare wissenschaftlich-technische Grundlage hat. Trotz der mangelnden wissenschaftlichen Grundlage in Bezug auf die Definition erneuerbarer Kälte sind ambitionierte Mindeststandards unter umweltpolitischen Gesichtspunkten grundsätzlich zu begrüßen, da vermieden wird, dass herkömmliche Klimaanlage zur Erreichung der Ziele beitragen können. Zudem besteht die Herausforderung, dass je nach Ambitionsniveau der Mindeststandards in einigen Mitgliedstaaten der Einbezug der Kälteerzeugung zu einem deutlichen Anstieg der Anteile an erneuerbarer Energie führen kann und somit die Ambition der Ziele reduziert wird. Eine weitere Herausforderung kann die Verfügbarkeit von Daten sein, da Daten zur Kühlung nicht in den jährlichen Eurostat-Fragebögen erfasst sind. Insbesondere für den Bestand an Geräten bzw. Systemen zur Kälteerzeugung ist daher mit einer unzureichenden Datenlage zu rechnen. Ein Vorteil des Ansatzes über Mindeststandards für die Energieeffizienz ist, dass der Ansatz Synergien mit den Mindeststandards auf Grundlage der Ökodesign-Richtlinie aufweist.

4.6.2.2 Option 2: Mindestanforderungen an die Temperatur der Wärmesenke

Als zweite Option können Mindestanforderungen an die Temperatur der Wärmesenke gestellt werden (z. B. 10 K unter der Temperatur der Umgebungsluft). Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass Techniken mit natürlichen Wärmesenken bevorzugt werden. Diese benötigen in der Regel keine stromgetriebenen Kältekreise und haben somit typischerweise einen geringeren Energieverbrauch. Eine Herausforderung in Bezug auf den Ansatz besteht darin, dass die Mitgliedstaaten Schätzungen der installierten Leistung der entsprechenden Kälteerzeugungssysteme vorlegen müssten. Diese Daten sind üblicherweise nicht in den Energiestatistiken vorhanden.

4.6.2.3 Option 3: Anforderung an die Art der Wärmesenke

Als dritte Option können die Mindestanforderungen über die Art der Wärmesenke definiert werden. Beispielsweise kann die Außenluft als Wärmesenke ausgeschlossen werden. Mit diesem Ansatz würden somit alle herkömmlichen Klimaanlage und reversiblen Wärmepumpen nicht zum Anteil erneuerbarer Kühlung beitragen. Als mögliche Wärmequellen könnten beispielsweise der Boden (Geothermie), Wasser oder Schnee zugelassen werden. Ähnlich wie bei Option 2 ist ein Vorteil, dass typischerweise Techniken mit natürlichen Wärmesenken bevorzugt werden und dass die Unterscheidung zwischen erneuerbarer und nicht erneuerbarer Kühlung die Richtung der Wärmeströme gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik widerspiegelt. Eine Herausforderung ist auch hier die Verfügbarkeit von verlässlichen statistischen Daten.

4.6.3 Schlussfolgerungen

Die Definition und Methodik zur Berechnung von erneuerbarer Kälte sollte so ausgestaltet werden, dass herkömmliche Anlagen und Geräte zur Kälteerzeugung nicht als erneuerbare Kälte angerechnet werden können.

Während die Nutzung von Kältemitteln in der Bewertung der Optionen und der Ausarbeitung der Methodik derzeit keine explizite Rolle spielt, bestehen Synergien zur ambitionierten Ausgestaltung der Effizienzanforderungen: Sofern die Anforderungen so gesetzt werden, dass herkömmliche Klimaanlage von der Anrechnung ausgenommen sind und sich die Anrechenbarkeit auf Anlagen zur freien Kühlung beschränken, wirkt sich dies förderlich auf die Verbreitung von Anlagen zur Kühlung ohne Nutzung von Kältemitteln aus.

4.7 Ausarbeitungen zur Forderung eines Stadtklimaneutralitäts-Nachweises in Umweltverträglichkeitsprüfungen für neue Quartiere

4.7.1 Ausgangslage

Bei der Planung und Errichtung neuer Stadtquartiere oder ähnlich dimensionierten Umgestaltungsvorhaben regulieren derzeit eine Vielzahl von Regeln, Verordnungen und Grenzwerte das Bauvorhaben. Der größte Teil dieser Regularien betrifft die Baukörper an sich, aber auch die Interaktion zwischen Baukörpern (Abstände, Tageslichtzugang, Sonnenstunden) werden in Richtlinien und Vorschriften berücksichtigt. Für den reinen Außenbereich, der oftmals aufgrund der Bauträgerschaft unabhängig von den Bauwerken geplant wird, existieren im Wesentlichen die Vorgaben zum Schallschutz (z. B. DIN 18005 Teil 1) und zur Luftreinhaltung (z. B. TA Luft, EU-Richtlinie 1999/30/EG). Bereits für die relativ einfach zu bestimmende Größe wie Durchlüftung und Windkomfort existieren keine verbindlichen gesetzlichen Vorgaben, sondern lediglich unterschiedliche Maße zur Komfortbetrachtung, deren Auswahl und Anwendung freiwillig ist. Die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) definiert beispielsweise in ihrem „Kriterienkatalog Quartiere“ verschiedene Evaluierungskriterien zur Nachhaltigkeit, unter anderem auch für den Aspekt Stadtklima (ENV 1.5), bleibt aber hier sehr allgemein.

4.7.2 Verbesserungsvorschlag

Sowohl dem Mikroklima innerhalb des Planungs- bzw. Bebauungsgebiets als auch den Auswirkungen der Strukturveränderung auf die nähere Umgebung sollte in Form nachvollziehbarer und klar definierter Regeln und Grenzwerte Beachtung geschenkt werden.

Eine mögliche Erweiterung der Umweltverträglichkeitsprüfung auf den Bereich der Stadtklimatologie würde hierbei zunächst auf die Wechselwirkungen der Planung mit der näheren Umgebung abzielen. Hierbei muss das Ziel sein, dass es durch die Quartiersneuplanung oder Strukturveränderung als Minimalforderung zu keiner Verschlechterung der klimatologischen Verhältnisse in den übrigen Stadtbereichen kommt. Hierzu zählen insbesondere

- ▶ die Gewährleistung der Durchlüftung der angrenzenden Gebiete, insbesondere die Fortführung von Frischluft- und Kaltluftleitbahnen und
- ▶ als Mindestanforderung die Vermeidung der Erwärmung der durchströmenden Luft durch die Bebauung. Im Idealfall sollte ein Kühleffekt erreicht werden, bei dem die aus dem Quartier ausströmende Luft im Mittel kühler ist als die einströmende Luft.

Innerhalb des Quartiers lassen sich lokal ungünstige mikroklimatologische Verhältnisse nicht immer vermeiden. Daher sollten Planungen vor allem im Hinblick auf die angestrebte Nutzung hinsichtlich folgender Kriterien untersucht werden:

- ▶ Ist für alle relevanten Windrichtungen bei den lokal üblichen Windgeschwindigkeiten und Windspitzen ein ausreichender Windkomfort in allen für Fußgänger relevanten Bereichen gegeben?
- ▶ Stimmt die beabsichtigte Nutzung unterschiedlicher Bereiche (Passage, Aufenthalt, etc.) mit dem angebotenen Mikroklima überein? Hierbei ist nicht nur die generelle Verteilung zu betrachten, sondern auch die zeitliche Dynamik der Nutzung und des Mikroklimas.

- Durch den Klimawandel ist zukünftig mit einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität von sommerlichen Hitzewellen zu rechnen. Die Planung der Quartiere sollte dahingehend überprüft werden, dass das lokale Mikroklima auch unter der Annahme solcher Hitzeperioden noch ausreichend Abkühlungsdynamik aufweist. Insbesondere bei der Planung von Begrünungsmaßnahmen ist sicherzustellen, dass diese auch ausreichend bewässert werden, da sich die Kühlungseffekte sonst abmindern oder sogar ins Gegenteil verkehren können.

Wie die im Rahmen dieses Berichts präsentierten Beispiele verdeutlichen, ist die Abschätzung der Auswirkungen von Strukturveränderungen auf das Mikroklima eine hochkomplexe Fragestellung. Für die Berücksichtigung der vorgenannten Aspekte sowie den Nachweis einer angepassten Planung ist daher der Einsatz numerischer Simulationsverfahren unerlässlich. Eine rein verbale oder zeichnerische Darstellung der vermuteten Wechselwirkungen und Auswirkungen ist nicht ausreichend.

4.8 Handlungsvorschläge für die Konkretisierung der Auswirkungen des Mikroklimas auf die Stadtplanung

4.8.1 Ausgangslage

Wie bereits in Abschnitt 4.7 dargestellt, ist die Analyse und Bewertung der Auswirkungen von Planungsmaßnahmen auf das Mikroklima und damit auf das Stadtklima der Umgebung eine komplexe Fragestellung, die nur unter Verwendung von numerischen Verfahren mit der notwendigen Genauigkeit und Neutralität untersucht werden kann.

Derzeit ist die Anwendung dieser Verfahren im Planungsprozess weder standardisiert noch etabliert. Als Hindernisgründe lassen sich dabei folgende Faktoren identifizieren:

- a) Hoher Aufwand/ Kosten in der Modellerstellung aufgrund heterogener, inkompatibler und veralteter bzw. nicht-digitaler Datenbestände
- b) Hoher Aufwand/ Kosten aufgrund aufwändiger Simulationsverfahren
- c) Fehlende Standardisierung von Analyseergebnissen und deren Bewertung
- d) Fehlende verbindliche Grenzwerte

4.8.2 Verbesserungsvorschläge

Zur Verbesserung der Ausgangssituation und der Etablierung von stadtklimatologischen Belangen in der Planung sollen im Folgenden die oben angesprochenen Punkte kurz aufgegriffen werden.

Zu a) Aufwändige Modellerstellung

Die Erstellung von konsistenten und aktuellen digitalen Modellen zur weiterführenden Analyse in numerischen Verfahren ist nach wie vor ein großer Kostenfaktor und damit Hindernis bei der Anwendung ebendieser Methoden im Planungsprozess. Der aktuelle Trend zur Erstellung von „digitalen Zwillingen“ von Städten, Ländern oder der Erde ist hierbei ein wichtiger Schritt zur Verbesserung der Ausgangslage. Im Gegensatz zu „normalen“ digitalen Geodaten ist einer der Kernansätze der digitalen Zwillinge, dass alle Datenebenen miteinander kompatibel sind und die in ihnen gespeicherten Informationen standardisiert über Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden und so beispielsweise von Modellen automatisiert abgerufen werden können.

Zu b) Kosten des Simulationsverfahrens

Die Kosten der Simulationsverfahren bestehen einerseits aus den Expertenkosten zum Betreiben der jeweiligen Simulationsmodelle, andererseits aus Kosten des Rechenvorgangs selbst. Wie schon in (a) angesprochen, verlangt das Konzept der digitalen Zwillinge nicht nur eine konsistente Datenbereitstellung über Schnittstellen, sondern auch eine ebenso standardisierte Einbettung der gewünschten Simulationsmodelle. Um Teil eines solchen digitalen Zwillings und damit auch Bestandteil zukünftiger Planungsprozesse zu werden, müssen sich die Expertenmodelle ebenso dem Standardisierungskonzept unterwerfen. Hierdurch ist kein besonderes Expertenwissen mehr nötig, so dass die Einstiegsschwelle für die Anwendung dieser Modelle sinkt.

Die Kosten für den Simulationsvorgang selbst werden in Zukunft durch immer leistungsfähigere Computer sowie Cloud-Anwendungen zunehmend in den Hintergrund treten.

Zu c) Standardisierung von Analyseergebnissen und deren Bewertung

Die Analyse von Simulationsergebnissen ist ein weiterer kostenträchtiger Faktor in der Anwendung von Mikroklimamodellen in der Planung. Die Sichtung und Auswertung der Simulationsdaten durch entsprechendes Fachpersonal ist unumgänglich, aber die Form der Präsentation und der Umfang der Analysen ist oft sehr abhängig von persönlichen Vorlieben und lokalen Gepflogenheiten. Eine Standardisierung der Basiselemente entsprechender Gutachten hinsichtlich des Inhalts, der Art der Darstellung und der prägnanten Zusammenfassung der Kernergebnisse würde hier nicht nur den Arbeitsaufwand und damit die Kosten deutlich reduzieren, sondern es würde auch vermieden, dass durch eine geschickte Auswahl von Daten und Erkenntnissen die Resultate der Studien in eine gewünschte Richtung bewegt werden.

Zu d) Verbindliche Grenzwerte

Die Festlegung von Grenzwerten in Form von konkreten Schwellenwerten ist nicht unumstritten, da sie häufig dazu führt, alle Maßnahmen auf das Ziel der Grenzwertunterschreitung auszurichten. Zudem kann eine lokale Überschreitung von Grenzwerten in nicht-sensiblen Bereichen durchaus sinnvoll sein, wenn dadurch andere, sensiblere Nutzungen deutlich geschont werden.

Im Sinne einer Standardisierung von Mikroklimauntersuchungen wäre es daher sinnvoller, das komplexe räumlich-zeitliche Gefüge des Mikroklimas durch einige Performance-Indikatoren zu beschreiben und beispielsweise über eine Punktskala das Erreichen dieser Indikatoren nachzuweisen. Im Gegensatz zu der binären Grenzwertbetrachtung wären somit auch ausgleichende Betrachtungen über verschiedene Bereiche oder Aspekte einer Planung möglich.

Die von einer Planung erzielte Punktematrix würde, wenn standardisiert angewandt, die Auswirkungen auf das Stadtklima übersichtlich und vergleichbar darstellen.

4.9 Anwendung eines Grünflächenfaktors GFF (wie Grundflächenzahl (GRZ) und Geschossflächenzahl (GFZ))

4.9.1 Ausgangslage

Städtische Grünflächen erfüllen wichtige klimarelevante Funktionen und tragen zu einer Verbesserung des Stadtklimas bei. Städtisches Grün trägt maßgeblich dazu bei, die Auswirkungen des Klimawandels in urbanen Räumen zu verringern und stellt eine wichtige kommunale Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel dar. Es bestehen zahlreiche Instrumente zur Unterstützung der Entwicklung und des Erhalts von urbanen Grünflächen in

der Stadtentwicklung und Stadtplanung. Hier dargestellt wird der Ansatz des Grünflächen- bzw. Biotopflächenfaktors, den einige Städte bereits eingeführt haben, um den Erhalt von urbanen Grünflächen zu sichern, wie beispielsweise Berlin und Malmö. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die umgesetzten Konzepte in Berlin, Malmö und Wien und diskutieren eine mögliche Stärkung des Instruments durch seine Aufnahme in die Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (BauNVO).

4.9.2 Umsetzungsbeispiele

4.9.2.1 Berlin

Um die Umweltbelastungen im Innenstadtbereich zu mindern und den Erhalt von Grünflächen zu sichern, wurde in Berlin im Jahr 1990 der Biotopflächenfaktor (BFF) eingeführt, um dem hohen Bodenversiegelungsgrad im urbanen Raum entgegenzuwirken (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin 2021; Jakob 2010).

Der BFF ist eine ökologische Planungskenngröße, die in Berlin als Rechtsverordnung in einem Landschaftsplan festgelegt werden kann. Dieser benennt für bebaute Grundstücke das Verhältnis von sich positiv auf den Naturhaushalt auswirkenden Flächen eines Grundstückes zur Gesamtfläche des Grundstückes. Damit werden ökologische Mindeststandards festgelegt, die für Neubebauung und bauliche Änderungen bei den städtischen Nutzungsformen Wohnen, Gewerbe und Infrastruktur gelten (Kopetzki 2017).

Zur Berechnung des Faktors werden zunächst einzelne Teilflächen des Gesamtgrundstücks bewertet und einem festgelegten Anrechnungsfaktor zugeordnet (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin 2021). Die Bewertung der Flächen erfolgt im Hinblick auf die potenzielle Übernahme von vegetationsbasierten Ökosystemdienstleistungen. Auf Basis der Bewertungen wird für jeden Flächentyp ein Anrechnungsfaktor zwischen 0 und 1 festgelegt. Ein Faktor von 0 bedeutet dabei, dass die Fläche keine positive Wirkung auf den Naturhaushalt hat, wohingegen dem Faktor 1 jene Flächen zugeordnet werden, die eine hohe Wertigkeit aufweisen.

Die einzelnen Flächentypen eines Grundstückes werden addiert, um den angestrebten BFF-Wert auf der Grundstücksfläche zu erreichen. Der BFF berechnet sich wie folgt:

$$\text{BFF} = \text{Naturhaushaltswirksame Fläche} / \text{Grundstücksfläche}$$

Es gelten je nach Bebauungstyp und Nutzungsart unterschiedliche BFF-Zielwerte, wie die folgende Tabelle aufzeigt. Bei baulichen Änderungen von Wohnungen, öffentlichen Einrichtungen und Kindertagesstätten ist der BFF-Zielwert vom Überbauungsgrad abhängig und wird in verschiedene Zielwerte gestaffelt.

Tabelle 26: Zielwerte für den Biotopflächenfaktor (BFF) in Berlin

BFF-Zielwerte nach Bebauungstyp und Überbauungsgrad (ÜBG)	Bauliche Änderungen		Neubau
	ÜBG	BFF	
Wohnungen	bis 0,37	0,6	0,6
	0,38 bis 0,49	0,45	
	ab 0,5	0,3	
Gewerbliche Nutzungen	bis 1	0,3	0,3

BFF-Zielwerte nach Bebauungstyp und Überbauungsgrad (ÜBG)	Bauliche Änderungen		Neubau
Kerngebietstypische	bis 1	0,3	0,3
Öffentliche Einrichtungen	bis 0,37 0,38 bis 0,49 ab 0,5	0,6 0,45 0,3	0,6
Schulen	bis 1	0,3	0,4
Kindertagesstätten	bis 0,29 0,3 bis 0,49 ab 0,5	0,6 0,45 0,3	0,6
Technische Infrastruktur	bis 1	0,3	0,3

Quelle: Eigene Darstellung nach Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin 2021, verändert

Mittlerweile sind auf fast 5 % der Fläche Berlins verbindliche BFF-Zielsetzungen als Rechtsverordnung in 15 Landschaftsplänen festgelegt (Stand 2020).

Die Charta für das Berliner Stadtgrün und das Handlungsprogramm Berliner Stadtgrün 2030 sehen eine Weiterentwicklung sowie die Überprüfung der rechtlichen Verankerung des BFF vor (Abgeordnetenhaus Berlin 2020).

4.9.2.2 Malmö

In der südschwedischen Stadt Malmö wird ebenfalls ein Grünflächenfaktor (Grönytefaktor, GF) als Planungsinstrument angewandt, um den Erhalt von Grünflächen in städtischen Gebieten zu gewährleisten. Damit adaptiert Malmö ein ähnliches Konzept wie das des Biotopflächenfaktors in Berlin.

Das Instrument wurde im Jahr 2001 im Zuge der Wohnbauausstellung eingeführt und erstmals bei einem großen Neubauprojekt eines Quartiers angewandt. Inzwischen wird der GF auf alle Baugebiete im Stadtgebiete übertragen und nicht nur im Neubau, sondern auch bei umfangreichen Sanierungen eingesetzt. Dabei wird der GF rechtsverbindlich in den Bebauungsplänen festgehalten. Die Zuständigkeit liegt in Malmö im Unterschied zu Berlin auf kommunaler Ebene und unterliegt dem Stadtplanungsamt (Thérèse Hliwa 2015).

Wie auch in Berlin bestehen unterschiedliche Zielwerte des GF für verschiedene Nutzungsarten. Die Berechnung unterscheidet sich von dem des BFF dahingehend, dass Vegetationsmerkmale, wie z. B. die Größe von Bäumen, miteinbezogen werden (Miljöbyggprogram SYD). Zudem sind Oberflächenbedeckungen von Dächern und Fassaden relevant, mit denen ein höherer GF zugewiesen werden kann (ebd). Zusätzlich wurden „green points“ in Malmö eingeführt, die weitere umweltbezogene Maßnahmen beinhalten (ebd).

4.9.2.3 Wien

Die Stadt Wien beschäftigt sich intensiv mit städtischen Grünflächen, so dass auch im Stadtentwicklungsplan 2025 (STEP 2025) der Stadt das Fachkonzept Grün- und Freiraum ein zentraler Bestandteil und richtungsweisend für die Wiener Grün- und Freiraumplanung ist (Stadt Wien). Das im Jahr 2014 beschlossene Fachkonzept enthält unter anderem die Schaffung neuer Erholungsgebiete sowie einen „Lokalen Grünplan“.

Mit dem im Fachkonzept enthaltenen „Lokalen Grünplan“ wurde 2015 ein auf alten Planungsinstrumenten aufbauendes, neues und standardisiertes Planungsinstrument geschaffen (Stadt Wien). Diese Methode kann teilraum- und anlassbezogen besonders in Stadtentwicklungsgebieten erstellt werden, in denen es zu strukturellen Veränderungen kommt.

Dabei werden verschiedene Freiraumtypen verdeutlicht, verortet und im Hinblick auf ihre Versorgungswirksamkeit für die Bewohner und Bewohnerinnen bewertet. Es wird zwischen zwölf Freiraumtypen differenziert, die die Grundlage des Konzepts bilden. Diese Einteilung baut auf gesamtstädtischen Festlegungen (Freiraumnetz Wien) auf und dokumentiert somit die Grün- und Freiraumversorgung für das jeweilige Gebiet. Die Gliederung der Typen richtet sich dabei sowohl nach ihrer Form (lineare und flächige Freiräume) als auch nach ihrem Gestaltungscharakter (urbane oder landschaftliche Prägung), wie die folgende Tabelle zeigt.

Tabelle 27: Übersicht der Freiraumtypen in der Wiener Grün- und Freiraumplanung

	Prägung	Typen
Lineare Freiräume	Urban	Typ 01: Belebte Straßenräume und Zonen für Fußgänger*innen
		Typ 02: Begrünte Straßenräume
		Typ 03: Straßenräume mit angelagerten Grünflächen
	Landschaftlich	Typ 04: Grünachsen
		Typ 05: Grünzüge
		Typ 06: Grünkorridore
Flächige Freiräume	Urban	Typ 07: Nicht öffentlich zugängliche Freiräume
		Typ 08: Teilöffentliches Grün
		Typ 09: Parks
	Landschaftlich	Typ 10: Nutzgebiete
		Typ 11: Baustein Grünraum
		Typ 12: Schutzgebiete

Quelle: Eigene Darstellung nach Stadt Wien 2021

Für jeden der einzelnen Typen werden Ziele bis 2025 festgehalten sowie konkrete Handlungsfelder definiert.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „green.resilient.city“ wurde ein Grünflächenfaktor für die Stadt Wien entwickelt als Grundlage für die zukünftige rechtliche Verankerung in Planungsinstrumenten (Reinwald et al. 2020). Das Projekt stellt weiterhin ein Instrumentarium an Simulationstools zur Verfügung, mit deren Hilfe die mikroklimatischen Auswirkungen von bestehender grüner Infrastruktur und deren Veränderungen auf Parzellenebene und auf der Ebene von Stadtvierteln simuliert werden kann (ebd).

4.9.3 Beurteilung

Wie anhand der ausgeführten Beispiele deutlich wird, bestehen verschiedene Möglichkeiten, wie Städte und Kommunen langfristig ausreichend Grünflächen schaffen und erhalten können. Durch festgelegte Kennwerte eines Grünflächenfaktors kann die Bedeutung des Grünraums gegenüber anderen Zielen in der Stadtentwicklung hervorgehoben werden. Aufgrund ihrer

klimarelevanten Funktionen spielen urbane Grünflächen langfristig eine wichtige Rolle in der kommunalen Klimaanpassung, so dass weitere Städte in Erwägung ziehen, einen Grünflächenfaktor einzuführen. So besteht beispielsweise auch im Rahmen des „Masterplans Freiraum“ der Stadt Nürnberg der Vorschlag, einen verbindlichen Grünflächenfaktor in der Stadtentwicklung anzuwenden. Die bauliche Nutzung soll dabei nicht eingeschränkt, aber ökologische Standards für die Nutzung von Bauflächen festgelegt werden. Insbesondere bei einer hohen baulichen Dichte, d. h. im Innenstadtbereich der Stadt Nürnberg, und den dort vorherrschenden hohen klimatischen Belastungen kann der Grünflächenfaktor einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des Mikroklimas leisten.

Um eine flächendeckende Anwendung von Grünflächenfaktoren in Kommunen zu erreichen, sollte der Grünflächenfaktor verbindlich in der Bauleitplanung festgelegt werden können. Hierzu sollte eine Novellierung der Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (BauNVO) angestrebt werden, um den GFF neben den Maßen der baulichen Nutzung wie Grundflächenzahl und Geschossflächenzahl als Maß der Flächenfreihaltung aufzunehmen.

4.10 Good Practice-Beispiele zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen auf kommunaler Ebene

Die Klimaanpassung ist seit der Novelle des Baugesetzbuches im Jahr 2011 als ein Planungsgrundsatz in der Bauleitplanung festgelegt und zu berücksichtigen. Beispielsweise sind die Anforderungen an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse, worunter auch die Anpassung an Überhitzung von Gebäuden und urbanen Räumen an heißen Sommertagen fällt, im Baugesetzbuch festgehalten. Jedoch muss die Klimaanpassung mit anderen Belangen abgewogen werden. Da die Anforderungen zum Teil unkonkret sind, kommt der Klimaanpassung im Vergleich zu anderen Themen oft nur eine untergeordnete Rolle zu.

Die Kommunen spielen in der Klimaanpassung eine zentrale Rolle und haben diverse Möglichkeiten, Maßnahmen zur Klimaanpassung zu ergreifen. Beispielhaft für eine gelungene Umsetzung kommunaler Klimaanpassungsmaßnahmen – insbesondere im Bereich der Hitzeinseln – werden in den folgenden drei Beispielen aus Mannheim, Bochum und Hannover näher ausgeführt und dabei insbesondere auf die Integration von Anpassungsmaßnahmen während des Planungsprozesses eingegangen.

4.10.1 Konversionsfläche Spinelli Barracks in Mannheim

Als Beispiel für die erfolgreiche Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen in Kommunen kann die Konversionsfläche Spinelli Barracks in Mannheim genannt werden. Mannheim liegt im Oberrheingraben, eine der wärmsten Regionen Deutschlands, und ist mit einer Durchschnittstemperatur von 11,9 °C im Jahr 2019 (WetterKontor 2021) in besonderem Maße von Hitzebelastungen im Sommer betroffen.

Die Fläche des Pilotprojektes beinhaltet rund 80 Hektar einer ehemaligen Kaserne und liegt – im Hinblick auf seine klimaökologische Ausgleichs- und Entlastungswirkung – im wichtigsten Grünzug Mannheims. Die Fläche soll nicht oder nur zu einem geringen Teil bebaut werden, so dass der zentrale Teil als Freifläche in den bestehenden Grünzug integriert wird. Zum einen soll dadurch der Entstehungsraum für Kaltluft erweitert und zum anderen das Eindringen von Frischluft aus den umliegenden Gebieten gefördert werden. Das primäre Ziel der Anpassung ist die Förderung der nächtlichen Abkühlung, um Hitzebelastungen der Anwohnenden zu verringern.

Zu Beginn des Planungsprozesses wurde zunächst eine Machbarkeitsstudie sowie ein Bürgerentscheid durchgeführt, bevor zusätzlich Bürgerplanungsgruppen und Bürgerforen

gegründet wurden, um die Akzeptanz des Projekts durch Beteiligung zu fördern. Es folgte eine Wettbewerbsausschreibung in zwei Stufen. In Stufe 1 wurden klimaökologische Vorgaben wie Beschattungsmaßnahmen und Fassadenbegrünungen thematisiert, in Stufe 2 die übergeordneten Leitideen zur Fläche konkretisiert. Die Wettbewerbe wurden auf die Erfüllung der klimaökologischen Vorgaben hin geprüft. Für die Erstellung der Rahmenplanung fanden Themenwerkstätten für die relevanten Akteur*innen der Planungsbereiche Städtebau und Grünzug statt, in denen wissenschaftliche Begleitgruppen sowie externe Expert*innen fachlichen Input lieferten.

Mit der Phase der städtebaulichen Entwurfsplanung begann auch das Forschungsprojekt KomKlim (Vogt et al. 2018) und es wurden konkrete Konzepte zu Klimaanpassungsmaßnahmen erarbeitet. Essenziell war in dieser Phase auch die Beteiligung der Bürger*innen, die im Rahmen mehrerer Veranstaltungen mit einbezogen wurden und das Thema der Klimaanpassung somit öffentlich zugänglich wurde.

4.10.2 Ostpark Bochum

Im Ostpark Bochum sollen neue, nachhaltige Siedlungsgebiete entstehen. Das Areal umfasst rund 13 Hektar Wohnbauland, auf dem bis zum Jahr 2025 ca. 1.300 Wohneinheiten unterschiedlicher Gebäudetypen errichtet werden sollen, sowie 12 Hektar für Grünflächen. Mit der Lage im Ballungsraum Ruhr, der von hohen Bevölkerungs- und Bebauungsdichten geprägt ist, zeigt sich in einigen Gebieten Bochums eine hohe Hitzebelastung. Das Plangebiet selbst liegt in einer ausgewiesenen Frischluftschneise.

Die Klimaanpassung wurde frühzeitig zu Beginn der Rahmenplanung in den Prozess integriert und fand sich in allen Phasen des Prozesses wieder. Für die Erstellung von Planungsgrundlagen fand eine frühe Abstimmung mit den Fachplanenden statt; die Entwürfe der Planungen wurden kontinuierlich diskutiert. Es wurden Gutachten durchgeführt, die Merkmale im Plangebiet prüften und somit die Voraussetzung für klimaangepasste Planungsideen bildeten. Neben einem Entwässerungskonzept stand vor allem die Minderung von Hitzebelastungen im Zentrum der Rahmenplanung. Die Entwürfe der dafür ergriffenen Maßnahmen wurden jeweils mittels klimatologischer Modellierungen überprüft, so dass keine Einschränkungen der Frischluftschneise vorliegen und die Kalt- und Frischluftzufuhr im Gebiet gewährleistet wird. Der Rahmenplan wurde von den Fachplanungen unter Berücksichtigung von Klimaanpassungsmaßnahmen weiter konkretisiert, bevor der Bebauungsplan erstellt wurde. Im Bebauungsplan wurden Maßnahmen wie die Begrünung von Dächern und die Oberflächenentwässerung verbindlich festgelegt. Andere Maßnahmen wie eine klimaangepasste Bepflanzung privater Freiflächen wurden im Gestaltungshandbuch lediglich als Empfehlung ausgewiesen. Für die Gestaltungsplanung fanden Fachworkshops zum Thema Klimaanpassung statt, bevor Gestaltungsvorgaben unter Berücksichtigung entsprechender Anpassungsmaßnahmen festgelegt wurden.

Für weitere Informationen siehe Jolk et al. (2017b)

4.10.3 Quartier Herzkamp Hannover

Im Rahmen des Pilotprojektes „KlimaWohl“ (Landeshauptstadt Hannover et al. 2019) in Hannover sollte erprobt werden, wie Klimaanpassung bei der Entwicklung eines neuen Wohnquartiers systematisch von Beginn an berücksichtigt werden kann. Das Projektgebiet liegt in einem klimasensiblen Randgebiet Hannovers, durch welches eine Kaltluftschneise verläuft. Bis zum Jahr 2021 sollen auf einer Fläche von 9.200 Quadratmetern ca. 300 Wohneinheiten entstehen sowie weitere Infrastruktur wie eine Kindertagesstätte, ein Bolzplatz und ein Quartiersplatz.

Eine Besonderheit des Vorhabens war die frühzeitige Kooperation öffentlicher und privater Akteure, die das Thema Klimaanpassung zu Beginn in ihre Planung miteinbezogen. Für das Projekt wurden neun Arbeitspakete gebildet, die parallel zum Planungs- und Umsetzungsprozess bearbeitet wurden. Essenziell war der regelmäßige Austausch der Verbundpartner dieser Arbeitspakete, der durch zweiwöchentliche Projekttreffen gefördert wurde. Die verschiedenen Arbeitspakete beschäftigten sich mit unterschiedlichen Themenfeldern und zeitlichen Phasen des Projekts. Um die Ergebnisse am Ende phasen- und organisationsübergreifend zusammenzuführen, fanden in dieser Projektphase mehrere Klausurtreffen statt.

Mit weiteren relevanten Akteursgruppen erfolgte die Zusammenarbeit im Rahmen verschiedener Arbeitswerkstätten und einer Bürgerwerkstatt. Ebenso fanden nicht nur ein interner Austausch statt, sondern auch Vernetzungstreffen mit weiteren Forschungsvorhaben.

In den Arbeitspaketen wurden 20 Maßnahmen zur Klimaanpassung wie Straßenbäume, Fassadenbegrünung oder eine auf die Kaltluftschneise angepasste Anordnung der Gebäude erarbeitet, die im ausgewählten Projektgebiet umgesetzt werden.

Auf Basis des Projekts wurde ein Modell („Hannover-Modell“) entwickelt, das auf weitere Projekte kommunaler Klimaanpassung übertragen werden kann.

4.10.4 Fazit

Die ausgewählten Beispielprojekte zeigen, dass eine frühzeitige Einbindung der Klimaanpassung in den Planungsprozess essenziell für eine erfolgreiche Umsetzung in Quartiersprojekten ist. Dabei sollte Klimaanpassung in allen Phasen des Prozesses aufgegriffen und berücksichtigt werden. Ebenso wichtig ist der interdisziplinäre Austausch zwischen den Planungsteams und externen Expert*innen, um die Klimaanpassungsziele zu erreichen. Auch die Beteiligung der Bürger*innen ist nicht zu vernachlässigen, so dass diese in die Planungsphasen miteinbezogen wurden.

Die aufgeführten Projekte zeigen, wie Klimaanpassung erfolgreich von Kommunen umgesetzt wurde und können als Vorbild für weitere kommunale Umsetzungsmaßnahmen dienen.

A Anhang

A.1 Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln

1. Aufhellen von Belägen bei Gebäuden und im Freiraum
Kurzbeschreibung - Durch Einsatz von hellen und reflektierenden Oberflächenmaterialien mit geringer Wärmespeicherfähigkeit kann die starke Wärmeabsorption an heißen Tagen verringert werden (Albedo). - Je heller die Gebäude und Oberflächen in einer Stadt sind, desto geringer ist die Aufheizung, weil kurzweilige Strahlung reflektiert wird und das Material sich nicht erwärmen kann. - Die Maßnahme ist bei dichter Bebauungsstruktur besonders effektiv, da große Dachflächen vorhanden sind. Der <i>Urban heat island effect</i> (UHIE) durch Aufheizen von Oberflächen ist in Quartieren mit hohen Gebäuden besonders ausgeprägt. - Höchstmögliche Reduktion von Asphalt- und Metalloberflächen zugunsten von hellen Betonflächen, Platten- bzw. Pflasterbelägen (Beton, Naturstein) oder schottergebundenen Decken. - Kombination von helleren Farben, rauen Oberflächen und porösen Materialien bei der Auswahl von Belägen, um die Oberflächentemperatur und die Menge an gespeicherter thermischer Energie zu reduzieren. - Oberflächen können auch nachträglich aufgehellt werden, indem sie mit einer hellen Farbschicht versehen werden.
Einschränkungen - Oberflächenmaterialien wie Pflasterungen sind in der Herstellung teurer als Asphalt. - Helle, reflektierende Oberflächen können durch erhöhte Reflexion zur Erwärmung angrenzender – vor allem dunkler – Flächen führen und erhöhen den Strahlungsstress für Personen, die sich in diesen Bereichen aufhalten. - Hellere Beläge wie Kies oder Pflaster entsprechen nicht immer den Kriterien der Barrierefreiheit.
Anwendbarkeit nach Klimazonen - Wird in anderen Klimata bereits angewendet bzw. hat teilweise sogar Tradition (z. B. im arabischen Raum, Mittelmeerraum, siehe Praxisbeispiele unten)
Rechtliche Rahmenbedingungen - Baugesetzbuch (BauGB), Flächennutzungspläne.
Praxisbeispiele - Neugestaltung des Willi-Graf-Ufers an der Saar in Saarbrücken - o Einsatz heller Oberflächenmaterialien bei der Freiflächengestaltung. - o An heißen Sommertagen Abkühlung von bis zu 10 °C. - Santorin, Griechenland - o Weiße Häuser traditionelle Strategie gegen städtische Aufheizung im Mittelmeerraum. - Nachträglicher Anstrich von Straßen mit weißer Farbe in Los Angeles.

Quellen: Brandenburg et al. (2015); Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2016); Arboristik.de (2018); Dirk Hessel et al. (2017); Dambeck (2010)

2. Sicherung und Ausweitung des Baumbestandes

Kurzbeschreibung:

- Vermeidung von UHIE und Stabilisierung bzw. positive Beeinflussung des Stadtklimas durch
 - o Beschattung durch Blätter und Baumkrone (15 Meter Kronendurchmesser eines Laubbaumes beschatten etwa eine Fläche von 160 m²).
 - o Verdunstung durch Abgabe von Wasserdampf über Blattoberflächen (Transpiration). Verdunstung von bis zu 400 Liter/ Tag abhängig von Baumart, Temperatur u. v. a. Wasserversorgung.
- Kühlung der Umgebungsluft um bis zu 2°C, Kühlung von Asphalt unter Krone um bis zu 20°C
- Umgebung beeinflusst Kühlungspotenzial von Bäumen
 - o Bei großer Hitze schließen Bäume die Poren der Blätter, um sich vor Austrocknung zu schützen und es entsteht kein Kühlungseffekt für die Umgebung.
 - o Offene Flächen mit Luftzirkulation und geringer Luftfeuchte begünstigen Transpiration, der Kühlungseffekt verstärkt sich daher, wenn mehr offene Räume und Plätze vorhanden sind.
 - o Pflanzen der Bäume nicht direkt in Aussparungen im Pflaster, sondern in Grünstreifen, da diese dort widerstandsfähiger sind und ggf. mehr transpirieren.
 - o Durch Wärme- und Trockenstress sowie dichten Boden in der Stadt verkürzt sich die Lebensdauer von Stadtbäumen.
- Erhöhung Wasserrückhalt, Verzögerung des Wasserabflusses.
- Häufigste Baumarten in deutschen Städten: Linde, Ahorn, Eiche, Platane. Aufgrund der Langlebigkeit von Bäumen empfehlen sich insbesondere Arten, welche an zukünftige (extremere) Klimabedingungen angepasst sind.
 - o Bei der Anpflanzung von nicht heimischen Baumarten (Neophyten) ist neben der Anpassung an Klimata auch zu beachten, ob einheimische Insektenarten die Bäume annehmen (Biodiversität).
 - o Als geeignet gelten u. a. Tulpenbaum, Ginkgo, Baumhasel und Zierkirsche⁹³.

Einschränkungen

- Jegliche Bautätigkeiten und innerstädtischen Verdichtungsmaßnahmen, die zu einem Verlust an Stadtbäumen führen.
- Flächenkonkurrenz mit anderen Funktionen und Einrichtungen im öffentlichen Raum
 - o Mindestabstand von Bäumen zu Fassaden, Gebäuden und anderen Bäumen,
 - o Verkehrssicherungspflicht (Totäste).
- Weitere Einschränkungen können Verschmutzung oder Allergien durch Pollenflug sein.
- Kosten für Pflege. Pflegeintervalle der Bäume verlängern sich mit fortschreitendem Alter der Pflanzen (Kosten rund 60 €/ Jahr⁹⁴).

Anwendbarkeit nach Klimazonen

- In Klimazonen mit hoher Luftfeuchtigkeit ist die Kühlung durch Transpiration ggf. geringer, da die Luft bereits wasserdampfgesättigt ist.
- Bewässerung von Stadtbäumen in sehr trockenem Klima ggf. ein Problem.
- Filter- und Beschattungswirkung, sowie weitere Synergien bleiben bestehen.

Rechtliche Aspekte

- Forstrecht, Naturschutzgesetz, Baugesetzbuch, Flächennutzungspläne.

Praxisbeispiele

- Berlin: 433.000 Stadtbäume

⁹³ Aktuelle Informationen zu geeigneten Straßenbäumen finden sich u.a. im Informationsportal der Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz (GALK):

<https://galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste>

⁹⁴ Eschenbruch 2012

2. Sicherung und Ausweitung des Baumbestandes

- 80 Bäume/ km Stadtstraße (alle 13 m Stadtstraße ein Baum).
- Stadtbaumkataster Duisburg
 - Festgeschriebene Neupflanzung von 500 Bäumen pro Jahr,
 - Durch Kataster lässt sich nachvollziehen wie viele Bäume in welcher Straße stehen und wo es baumlose Straßen gibt, welche dann sukzessiv bepflanzt werden.
- MillionTreesNYC
 - Pflanzung von 1 Millionen neuer Stadtbäume in der Stadt New York innerhalb von 7 Jahren.

Weitere positive Effekte

- Feinstaubfilterung
- Blätterdach dämpft Stadtlärm
- Ansprechendes Landschaftselement
- Positive Wirkung auf Biodiversität

Quellen: Brandenburg et al. (2015); Bayerischer Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG); Wolter und Nolte (2018); Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin (2020); Rahman (2016)

3. Sicherung bestehender und Anlage von zusätzlichen Waldflächen

Kurzbeschreibung:

- Vermeidung des UHIE durch Verdunstung und Abgabe von Wasserdampf über Blattoberflächen (Evapotranspiration)
- Kaltluftproduktion eines Waldes $0,6 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ h})$ bis weit über $20 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ h})$ abhängig von Baumart und Wasserverfügbarkeit
- Temperaturunterschied zwischen kühlem Wald und aufgeheizter Stadt bewirken Luftzirkulation
 - Kühle Waldluft fließt in Innenstadt,
 - Waldluft im Sommer bis zu 8 °C kühler.
- Tatsächliche Kühlungswirkung abhängig von
 - makroräumlichen und mikroräumlichen meteorologischen Verhältnissen,
 - Topografie,
 - Luftleitbahnen.
- Mindestgröße für Kühlungseffekt: 1 bis $2,5 \text{ ha}$.
- Durch großflächige Beschattungswirkung treten innerhalb von Waldflächen selten extreme Überhitzungsereignisse ein.
- Allgemeine Verbesserung der Stadtluft durch CO_2 -Bindung und Sauerstoffproduktion.

Einschränkungen

- Konfliktpotenziale mit Liegenschaftseigentümern, die zu Baulandpreisen verkaufen wollen.
- Flächenkonkurrenz mit stadtplanerischen Zielen einer wachsenden Stadt.

Anwendbarkeit nach Klimazonen

- In Klimazonen mit hoher Luftfeuchtigkeit ist die Kühlung durch Evapotranspiration ggf. geringer, da die Luft bereits wasserdampfgesättigt ist.
- Filter- und Beschattungswirkung, sowie weitere Synergien bleiben bestehen.

Rechtliche Aspekte

- Forstgesetz, Naturschutzgesetz, Baugesetzbuch, Flächennutzungspläne

Praxisbeispiele

- Der Aachener Wald (2.357 ha) produziert rund 30% des Kaltluftvolumens der Stadt Aachen (16.085 ha).

3. Sicherung bestehender und Anlage von zusätzlichen Waldflächen

Sonstige positive Effekte

- Wälder sind natürliche Kohlenstoffspeicher
 - o 1 ha Wald fixiert rund 10 t CO₂ pro Jahr.
- ‚Filter‘ städtischer Luft (besonders Aerosole, Stäube und wasserlösliche Gase)
 - o 1 ha Wald filtert bis zu 50 t Ruß und Staub pro Jahr.
- Stellen ansprechendes Landschaftselement dar.
- Erholungsraum für Stadtbewohner*innen.
- Lebensraum vieler Pflanzen und Tiere.

Quellen: Brandenburg et al. (2015); Wolter und Nolte (2018); Jay et al. (2015)

4. Entsiegelung von Oberflächen im Freiraum/ Vermeidung von Versiegelung

Kurzbeschreibung

- Die Entsiegelung von Oberflächen (siehe hierzu Pannicke-Prochnow et al. 2021) trägt zur Vermeidung von UHIE bei:
 - o Entsiegelte Flächen evaporieren. Wenn genügend Regenwasser versickern kann, steigt der Grundwasserspiegel. Gut wasserversorgte Böden geben Feuchtigkeit an die Luft ab und kühlen diese.
 - o Auf entsiegelten Flächen ist der Abfluss von Regenwasser in die Kanalisation geringer. Wenn das Regenwasser nicht versickern kann, verdunstet es (Phasenübergang von flüssig zu gasförmig), wodurch der Umgebung Energie in Form von Wärme entzogen wird und das Kleinklima abkühlt.
- Entsiegelungen zur verstärkten Verdunstung und Versickerung von Niederschlägen können an einer Vielzahl von Flächen angewendet werden, so etwa bei Parkplätzen, Hofflächen, Zufahrten, etc. Eine Entsiegelung kann z. B. durch den Einsatz folgender Materialien erfolgen:
 - o offenporigem Asphalt oder Porenpflaster,
 - o Pflaster mit weiten Fugen,
 - o Schotterdecken,
 - o Schotterrasen,
 - o Rasengittersteinen.

Einschränkungen

- Viele Oberflächenmaterialien wie Pflasterungen sind in der Herstellung teurer als Asphalt.
- Wasserdurchlässige Beläge entsprechen nicht immer den Kriterien der Barrierefreiheit.
- Wasserdurchlässige Beläge weisen häufig nicht die hohe mechanische Eignung für Verkehrsflächen auf wie Asphalt. Sie sind als Ersatz daher vor allem für Parkplätze interessant.

Anwendbarkeit nach Klimazonen

- Potenziell auch in anderen Klimata anwendbar.

Rechtliche Rahmenbedingungen

- Baugesetzbuch (BauGB), Raumordnungsgesetz, Bodenschutzgesetz.

Praxisbeispiele

- Grünes Leben, Baidt
 - o Umwandlung ehemaliger Bundesstraße in Grünfläche.
- Brenzpark, Heidenheim
 - o Großflächige Neuanlage eines Parks auf ehemaliger Industriebrache.
- Sanierungsgebiet Albert-Schweitzer-Straße/Fröbelstraße, Lahr
 - o Umwandlung ehemaliger Kaserne in Passivhausquartier,

4. Entsiegelung von Oberflächen im Freiraum/ Vermeidung von Versiegelung

- Entsiegelung von 1.400 qm,
- Ansäung von 2.800 qm Rasenfläche für Parkplätze.
- Schutter-Renaturierung, Lahr
 - Renaturierung des Schutterufers,
 - Abrückung der Uferbebauung um 13 m.

Sonstige positive Effekte

- Entsiegelter Boden ist Naturgut, Lebensraum für Tiere und Pflanzen und Schadstofffilter.
- Niederschlagswasser, welches versickern kann, speist das Grundwasser, wogegen Regenwasser auf versiegelten Flächen in die Kanalisation abgeleitet werden muss, wo es sich bei Mischkanalisation mit dem Schmutzwasser vermischt. Dies treibt die Kosten für die Abwasserbeseitigung in die Höhe. Ferner können starke Regenfälle die Kanalisationen überlasten, was bedeutet, dass das Abwasser ungereinigt in Bäche und Flüsse gelangt.
- Zu schneller und zu viel Abfluss von Niederschlagswasser aus Siedlungsgebieten steigert die Hochwassergefahr.
- Entsiegelung erhöht ggf. optische Attraktivität von öffentlichen Freiräumen.

Quellen: UMG Umweltbüro Grabher (2008); Bundesverband Garten-, Landschafts und Sportplatzbau e. V. (2006); Baukultur Baden-Württemberg (2016)

5. Sicherung und Erweiterung von Grün- und Freiräumen**Kurzbeschreibung**

- Grüne Infrastrukturen wie Straßenbegleitgrün, begrünte Innenhöfe und Brachflächen sind wichtige Bestandteile der Stadt und tragen zur Reduktion des städtischen Hitzeinseleffektes bei. Der positive Effekt der Pflanzen beruht u. a. auf der Beschattung von horizontalen Erdoberflächen und vertikalen Gebäudeoberflächen und der Evapotranspiration. Bewässerte Pflanzen weisen eine höhere Verdunstungsleistung auf.
- Begrünte Flächen sind im Durchschnitt in den Sommermonaten 3 bis 4 °C kühler als Ziegel- oder Betonflächen, die tagsüber stark aufheizen und nachts die Wärme an die Umgebung abgeben. Grünflächen tragen im Nahbereich insbesondere zur nächtlichen Abkühlung bei.
- Zur Vermeidung von UHIE besonders geeignet sind:
 - Alleen,
 - Einzelbäume und Strauchreihen,
 - Rasen- und Wiesenflächen,
 - Anlage kleinflächiger Grünflächen wie Innenhofbegrünungen,
 - Zulassen von Spontangrün.
- Vorteile Alleen: siehe Maßnahmenblatt Stadtbäume.
- Strauchreihen sind als Straßenbegleitgrün besonders dort geeignet, wo für Bäume kein Platz ist. Sträucher haben die gleichen positiven Effekte wie Stadtbäume, nur sind diese weniger stark ausgeprägt. Sträucher sind billiger und schneller zu pflanzen als Bäume, sind in der Pflege aber aufwendiger.
- Rasen- bzw. Wiesenstreifen entlang von Straßen sollten mindestens ca. 2 m bzw. breiter sein, um klimatische Effekte zu erzeugen. Das Begrünen von Gleiskörpern ist eine weitere Möglichkeit und kann in mehreren Bauarten ausgeführt werden.
- Begrünte Innenhöfe haben einen positiven Einfluss auf das Mikroklima und somit auf die Lebensqualität der Anwohner.

Einschränkungen

- Straßenraum ist Extremstandort für Pflanzen (z. B. Wassermangel, Schadstoffe), Pflanzenauswahl ist wichtig – auch wegen prognostizierter Erwärmung.

5. Sicherung und Erweiterung von Grün- und Freiräumen

- Gewährleistung der Verkehrssicherheit (Totäste).
- Fehlender Platz (Bewusstseinsbildung und Sensibilisierung von Planern notwendig).
- Konkurrenz zu ruhendem Verkehr.
- Grünflächen müssen gepflegt und bewässert werden, um im Sommer auch bei Trockenphasen ihre klimatische Funktion zu erhalten.
- Beseitigung von Müll auf Grünflächen ggf. aufwendiger als auf versiegelten Flächen.

Anwendbarkeit nach Klimazonen

- Potenziell auch in anderen Klimata anwendbar.
- Die Verdunstungsleistung und damit Kühlung durch Grünflächen hängt stark von der Wasserversorgung ab, weswegen diese Maßnahme für sehr wasserarme Regionen ggf. ungeeignet ist.

Rechtliche Rahmenbedingungen

- Baugesetzbuch (BauGB), Flächennutzungspläne, Raumordnungsgesetz, Bodenschutzgesetz.

Praxisbeispiele

- Der 10.000 m² große Alaunpark in Dresden ist nachweislich um bis zu 1,5 °C kühler als seine unbegrünte Umgebung.

Sonstige positive Effekte

- Wasserrückhalt,
- Bindung von Kohlendioxid und Staub
 - o Für Barcelona wurde errechnet, dass jährlich 166 Tonnen Feinstaub und damit 22 % der innerhalb der Stadt verursachten Staubemissionen durch Stadtnatur gebunden werden,
- Erhöhung der Biodiversität in der Stadt,
- Aufenthalts- und Spielraum.

Quellen: Brandenburg et al. (2015); Naturkapital Deutschland – TEEB DE (2017); Monteiro et al. (2016); Stiftung DIE GRÜNE STADT (2010)

6. Erhaltung der städtischen Luftzirkulation und Vernetzung der Freiräume**Kurzbeschreibung:**

- Durch die Schaffung und Freihaltung von unbebauten, mit dem Umland verbundenen, axialen Schneisen kann die städtische Luftzirkulation gefördert und die Versorgung mit Kalt- und Frischluft gewährleistet werden. Insbesondere große, zusammenhängende land- und forstwirtschaftliche Flächen sind Kaltluftproduktionsstätten. In diesem Zusammenhang ist besonders auf die Topografie des Umlandes zu achten
 - o Hanglagen fördern die Luftbewegung,
 - o ebene, bewaldete und unbewaldete Grünflächen fördern die Entstehung von Kaltluft.
- Kaltluftschneisen sollten eine geringe Rauigkeit haben, um den Luftaustausch nicht abzubremesen
 - o z. B. Wiesen, Wasserflächen, Bahnanlagen, breite Straßen.
- Als Mindestbreite für Kaltluftschneisen wird das 10-fache der Höhe der angrenzenden Bebauung empfohlen (mind. 50 m).
- Kaltluftschneisen sollten nicht ‚zugebaut‘ werden, insbesondere Hänge sind von hangparalleler Riegelbebauung freizuhalten.
- Eine Vernetzung sollte entlang der Hauptwindrichtung geschehen.

Einschränkungen

- Konkurrierende stadtplanerische Ziele (z. B. Dichte, Stadtstruktur, Bevölkerungswachstum) sowie bestehende bauliche Strukturen in Luftschneisen und Verkehrsachsen.

Anwendbarkeit nach Klimazonen

- Potenziell auch für andere Klimata anwendbar.

6. Erhaltung der städtischen Luftzirkulation und Vernetzung der Freiräume

Rechtliche Aspekte

- Forstgesetz, Naturschutzgesetz, Baugesetzbuch, Flächennutzungspläne

Praxisbeispiele

- Frankfurt liegt im Talkessel der Rhein-Main-Ebene umgeben von Mittelgebirgen und verfügt über zahlreiche Hochhäuser, wodurch eine gleichmäßige Durchlüftung der Stadt gestört wird. Der 5.000 ha große Frankfurter Stadtwald liegt allerdings entlang der Hauptwindrichtung im Südwesten der Stadt und kann so zur städtischen Luftzirkulation beitragen.
- Die Mainzer Straße in Wiesbaden ist eine breite Frischluftschneise, welche kühlere Luft vom Rhein in die in einem Talkessel gelegene Innenstadt transportiert.

Weitere positive Effekte

- Erhöhter Freizeit- und Erholungswert durch die Vernetzung der innerstädtischen Freiräume mit dem Umland.

Quellen: Brandenburg et al. (2015); Stiftung DIE GRÜNE STADT (2010)

7. Dach- und Fassadenbegrünung

Kurzbeschreibung:

- Dach- und Fassadenbegrünungen können ohne Energieaufwand das sommerliche Aufheizen der Gebäudeoberflächen reduzieren. Ebenso haben sie aufgrund ihrer Verdunstungsleistung einen positiven Effekt auf die Umgebungstemperaturen.
 - o Bei extensiven Dachbegrünungen ist die Substratschicht ca. 15 cm dick, die Bepflanzung erfolgt meist mit genügsamen, niedrigwüchsigen Pflanzen (z. B. Sedum-Arten). Sie haben ein meist geringes Gewicht und eignen sich daher für viele Dächer – es ist oft kein statischer Mehraufwand notwendig. Extensive Dachbegrünungen benötigen wenig Pflege, sind jedoch nicht zum Betreten und Nutzen geeignet.
 - o Intensive Dachbegrünung zeichnet sich durch eine stärkere Substratschicht und die Nutzung von Gräsern, Sträuchern und Bäumen als Bepflanzung aus. Dies hat jedoch eine statische Mehrbelastung zur Folge. Intensive Dachbegrünungen sind meistens für Menschen begehbar und nutzbar.
- Durch Rückhalt des Regenwassers entsteht durch die Evapotranspiration Verdunstungskühle. Durch die verringerte Oberflächenerwärmung wird auch die nächtliche Wärmeabstrahlung vermindert.
- Mit einer extensiven Dachbegrünung kann eine geringfügige Verbesserung des Mikroklimas erzielt werden, die intensive Dachbegrünung bewirkt eine Verbesserung des Mikroklimas. Sowohl intensive als auch extensive Dachbegrünungen erzielen eine geringfügige Verbesserung des Mesoklimas, wenn alle geeigneten Dachflächen eines Blockes begrünt sind.

Einschränkungen

- Zielkonflikt: für intensive/ extensive Dachbegrünungen geeignete Flächen eignen sich oft auch für Photovoltaikanlagen, zur Vermeidung von Problemen wird eine integrative Planung empfohlen,
- Teilweise hohe Kosten bei der Errichtung,
- Pflegeaufwand je nach Anlage der Dachbegrünung,
- Denkmalschutz.

Anwendbarkeit nach Klimazonen

- Potenziell auch in anderen Klimata anwendbar.

Rechtliche Aspekte

- Baugesetzbuch, Flächennutzungspläne

Praxisbeispiele

- Bosco Verticale, Mailand
 - o Komplex begrünter Hochhauskomplex mit 900 Bäumen und 2.000 weiteren Pflanzen,

7. Dach- und Fassadenbegrünung

- Begrünung entspricht etwa 7.000 m² Waldfläche.
- Gründachkartierung Düsseldorf
 - Düsseldorf fördert Dachbegrünung und ist die einzige deutsche Stadt, welche Dachbegrünung kartiert,
 - Mittlerweile verfügen über 1.300 Gebäude über Dachbegrünung, was einer Fläche von 730.000 m² oder 100 Fußballfeldern entspricht.
- Pocket-Park auf Einkaufszentrum, Pforzheim
 - 7.000 m² zusammenhängende Rasenfläche auf Dachfläche eines Einkaufszentrums.

Weitere positive Effekte

- Dach- und Fassadenbegrünung trägt zur Erhöhung der städtischen Biodiversität und zur Verbesserung der Luftqualität bei.
- Schutz und Verlängerung der Lebensdauer der Dachabdichtung, da mechanischer Schutz hergestellt und UV-Strahlung absorbiert wird.
- Durch Verdunstung des gespeicherten Regenwassers kann sich das Raumklima der direkt darunterliegenden Räume im Sommer verbessern.
- Entlastung Siedlungsentwässerung und Kläranlagen durch Regenwasserrückhalt.
- Verbesserung der Luftqualität durch Bindung von Feinstaub.
- Stadtbildgestaltung.
- Schaffung zusätzlicher Freiräume für Stadtbewohner*innen.

Quellen: (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2017; Stiftung DIE GRÜNE STADT 2010; Umweltplanung Bullermann Schneble GmbH 2015)

8. Erhöhung des Wasseranteils im Quartier

Kurzbeschreibung:

- Der kühlende Effekt von Wasserflächen beruht darauf, dass der Wasseroberfläche und der umgebenden Luft die zur Verdunstung erforderliche Energie entzogen wird. Dieser Energieaufwand wird durch Zufuhr warmer Luft aus der Umgebung kompensiert. Bewegtes Wasser (z. B. bei Springbrunnen) trägt generell stärker zur Verdunstungskühlung bei als stehende Wasserflächen. Bei Strahlungswetterlagen konnte für Fließgewässer eine Temperaturabsenkung um 1 °C für eine Reichweite von 400 m nachgewiesen werden. Fließgewässer können je nach Lage zur Hauptwindrichtung außerdem noch wichtige Luftleitbahnen sein.
- Möglichkeiten den Wasseranteil in Städten zu erhöhen sind
 - o Das Anlegen von/ die Vergrößerung bestehender Wasserflächen,
 - o das Freilegen von verrohrten Gewässern,
 - o die Schaffung von Wasserinstallationen.
- Die Vergrößerung des Anteils an Wasserflächen kann durch die Anlage von Teichen, künstlichen Fließgewässern oder der Schaffung von Staubereichen bewirkt werden.
- Mit der Öffnung und Renaturierung verrohrter Bachabschnitte kann eine Verbesserung des Mikroklimas erreicht werden.
- Mehr Wasserinstallationen im öffentlichen Raum z. B. durch Hydranten mit Sprühaufsätzen, Sprühnebel, Splash Pads, Springbrunnen, etc. tragen zur Abkühlung bei. Die Gestaltung der Abflüsse von Trinkbrunnen kann so gestaltet werden, dass das Wasser oberirdisch abläuft und erst später versickert. Eine weitere Möglichkeit ist die Schaffung von mehr (Kinder-) Freibädern sowie Wasserspielplätzen.

Einschränkungen

- Die Errichtungskosten für stehende Gewässer sind hoch. Für fließende Gewässer und die Offenlegung verrohrter Gewässer sind die Errichtungskosten noch höher. Außerdem bedürfen künstliche Wasserflächen einer intensiven Pflege.
- Künstliche Gewässer können bei starken Regenfällen über die Ufer treten und die Umgebung überschwemmen.
- Revitalisierungsmaßnahmen verrohrter Gewässer sind häufig durch bereits vorhandene Infrastruktur bzw. aufgrund von Besitzverhältnissen der dafür notwendigen Grundstücke nur begrenzt möglich.
- Einhaltung von Hygienevorschriften.

Anwendbarkeit nach Klimazonen

- Potenziell auch für andere Klimata anwendbar.

Rechtliche Aspekte

- Naturschutzgesetz, Baugesetzbuch, Flächennutzungspläne

Praxisbeispiele

- Renaturierung des Rosengartenbaches im Stadtteil Siegen-Niederschleden
 - o Teilweise Offenlegung von 130 m Bachlauf (Kosten ca. 266.000 Euro).

Weitere positive Effekte

- Positive Wirkung auf Biodiversität,
- Optische Verschönerung,
- Staubbindung durch erhöhte Luftfeuchte,
- Entlastung des Kanalsystems bei Starkniederschlägen,
- Erhöhung der Konnektivität zwischen Lebensräumen,
- Fließgewässer können als Kaltluftschneisen dienen.

Quellen: Brandenburg et al. (2015); Universitätsstadt Siegen (2016)

9. Beschattung von Freiflächen und Wegen

Kurzbeschreibung:

- Die Beschattung von Freiräumen und Wegen mindert die Aufheizung von Oberflächen, führt somit zu einer geringfügigen Verbesserung des Mikroklimas und kann damit das Wohlbefinden der Menschen steigern. Durch die verminderte Aufheizung verringert sich auch die nächtliche Wärmeabstrahlung. Beschattung ist vor allem bei großen Plätzen wichtig, da diese sonst von Personen gemieden werden.
- Zur Erreichung dieser Ziele wurden folgende Maßnahmen als besonders geeignet bewertet:
 - o Bereitstellung von beschatteten Sitzgelegenheiten,
 - o Beschattung von Freiflächen bei Gebäuden,
 - o Beschattung gebäudeferner Freiflächen.
- Beschattung gebäudeferner Freiflächen durch Sonnensegel o. ä. ist vor allem für größere Freiflächen wie Parkplätze oder öffentliche Plätze geeignet. Diese Maßnahme ist vor allem dann eine Alternative, wenn die Pflanzung von Bäumen aufgrund von z. B. Einbauten nicht möglich ist.
- Beschattung kann auch durch eine Überdachung der Flächen mit PV-Modulen erfolgen. Allerdings kommt es durch die dunkle Farbe der Module zu einer Wärmeentwicklung, so dass ein zusätzlicher UHIE auftritt.

Einschränkungen

- Je nach Konstruktion der Beschattungselemente wird jedoch die nächtliche Wärmeabstrahlung und Durchlüftung verhindert.
- Durch Verminderung der Luftzirkulation Hitzestau sowie Verschlechterung der Luftqualität möglich.

Anwendbarkeit nach Klimazonen

- Potenziell auch für andere Klimata anwendbar.

Rechtliche Aspekte

- Baugesetzbuch, Flächennutzungspläne

Praxisbeispiele

- Urban-Loritz-Platz, Wien
 - o Ein großzügiges Membrandach überspannt und schützt die einzelnen Wartebereiche und die dazwischenliegenden Fußwege.

Weitere positive Effekte

- Abhalten von Witterungseinflüssen wie Regen oder Schnee.
- Möglichkeit der Energiegewinnung, wenn Photovoltaikanlagen als Beschattungselemente verwendet oder auf diesen angebracht werden.

Quelle: Brandenburg et al. (2015)

A.2 Interviewleitfaden

Block 1: Kurze Vorstellung des Projektes

Das Projekt „Nachhaltige Gebäudeklimatisierung in Europa - Konzepte zur Vermeidung von Hitzeinseln und für ein behagliches Raumklima“ beschäftigt sich im Auftrag des Umweltbundesamts mit der Problematik urbaner Hitzeinseln und Strategien zu deren Vermeidung (z. B. Dach- und Fassadenbegrünung, Wasserbewirtschaftung, Beschattung, Aufhellung von Oberflächen, Baumbestände, etc.). In dem Projekt erfolgt u. a. eine Quantifizierung der Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen sowie eine Simulation des Einflusses dieser Maßnahmen auf das städtische Mikroklima im Jahresverlauf. Zudem sollen die Chancen und Hemmnisse bei der Umsetzung von Maßnahmen auf kommunaler Ebene untersucht werden.

Block 2: Übersicht über Maßnahmen und Akteure in Ihrem Verantwortungsbereich

- ▶ Welche Strategien und Maßnahmen zur Vermeidung urbaner Hitzeinseleffekte wurden bereits umgesetzt oder sind in Planung?
- ▶ Wer sind in Ihrer Kommune die wichtigsten Akteure in diesem Bereich?
- ▶ Wie erfolgt die Koordination/ Zusammenarbeit zwischen den Akteuren (z. B. Ämterübergreifende Prozesse)?

Block 3: Stellenwert des Themas

- ▶ Welchen Stellenwert hat die Vermeidung urbaner Hitzeinseleffekte im stadtplanerischen Prozess in ihrer Kommune?
- ▶ Wie sehen Sie den Stellenwert des Themas im Vergleich mit anderen Kommunen?
- ▶ Welchen Stellenwert sollte die Vermeidung urbaner Hitzeinseln Ihrer Meinung nach haben?

Block 4: Verfügbarkeit von Daten

- ▶ Welche Daten stehen zur Verfügung zur Planung von Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseln?
- ▶ Werden regelmäßig räumlich aufgelöste Daten zur Temperaturentwicklung erhoben und aufbereitet?

Block 5: Chancen und Hemmnisse

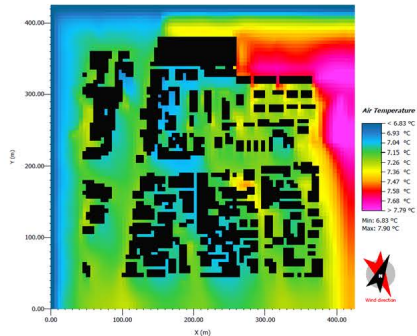
- ▶ Welche Faktoren hemmen die Umsetzung von Maßnahmen zur Vermeidung von urbanen Hitzeinseleffekten auf kommunaler Ebene? (z. B. Akteursebene, planerische Ebene)
- ▶ Gibt es Elemente des nationalen Ordnungsrahmens, die sich fördernd oder hemmend auf die Umsetzung von Maßnahmen auf kommunaler Ebene auswirken?
- ▶ Welche politischen Instrumente auf Bundesebene wären aus Ihrer Sicht erforderlich/ hilfreich, um das Thema weiter voranzutreiben?

A.3 Farbtafeln Mikroklimasimulationen

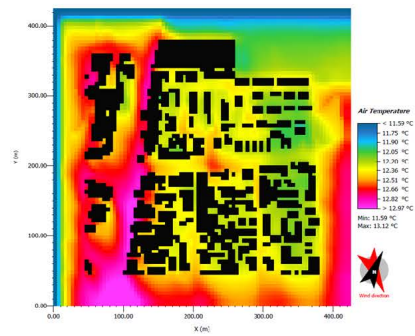
Abbildung 119: Tafel_1_a_Tunis_SQ

Tunis - Status Quo

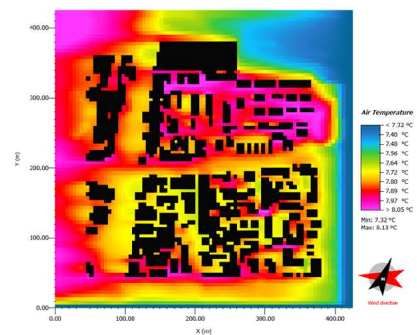
A: Januar, 04:00 Uhr



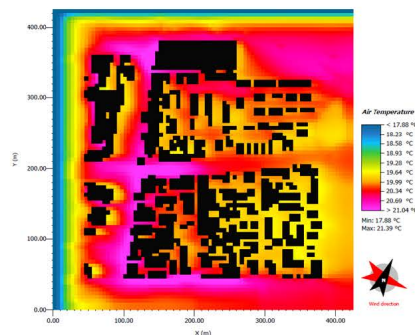
B: Januar, 16:00 Uhr



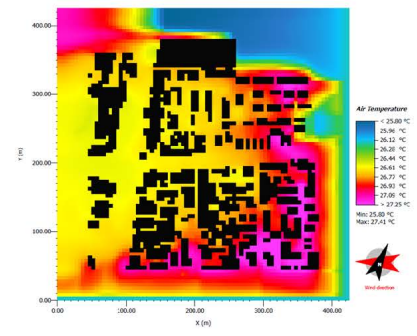
C: März, 04:00 Uhr



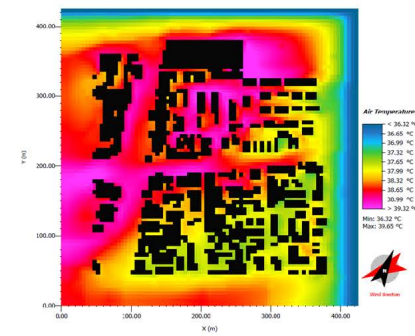
D: März, 16:00 Uhr



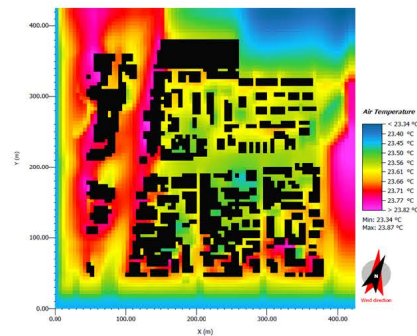
E: Juli, 04:00 Uhr



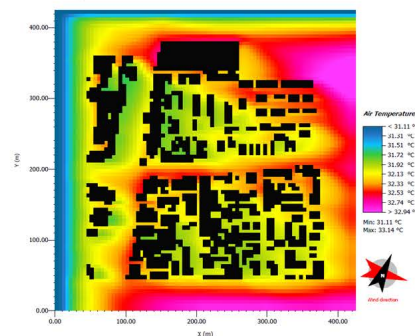
F: Juli, 16:00 Uhr



G: September, 04:00 Uhr



H: September, 16:00 Uhr



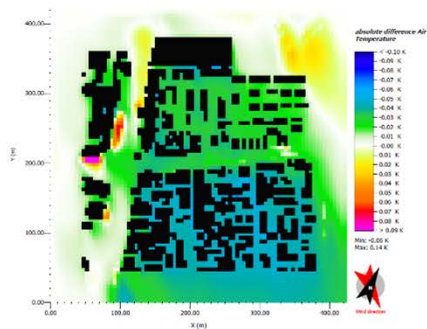
Tafel 1a: Jahresübersicht Tunis

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

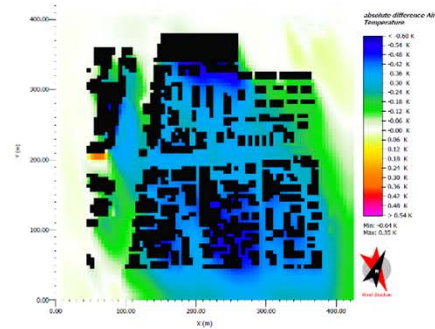
Abbildung 120: Tafel_1_b_Tunis_OPT

Tunis - Optimiert

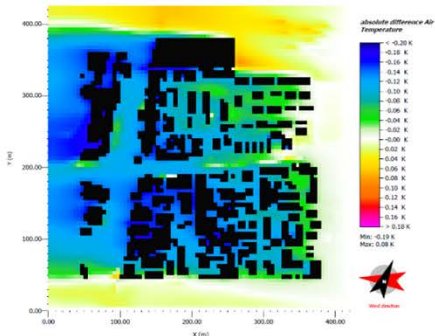
A: Januar, 04:00 Uhr



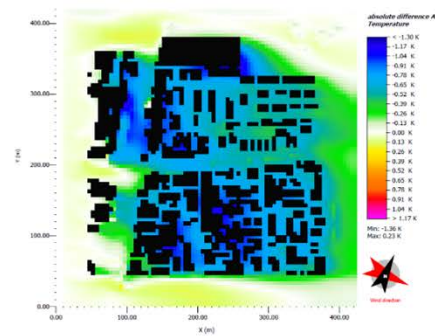
B: Januar, 16:00 Uhr



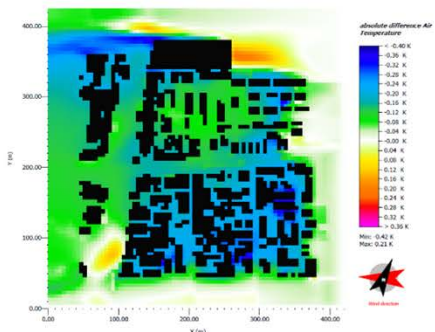
C: März, 04:00 Uhr



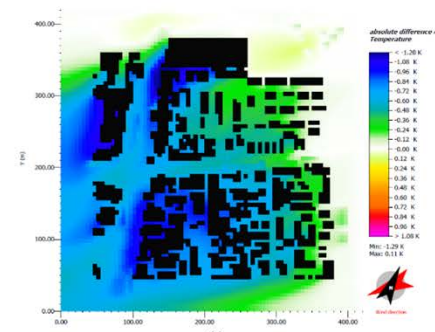
D: März, 16:00 Uhr



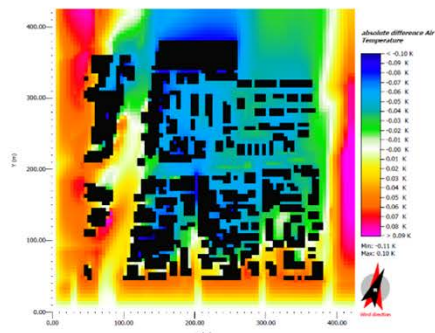
E: Juli, 04:00 Uhr



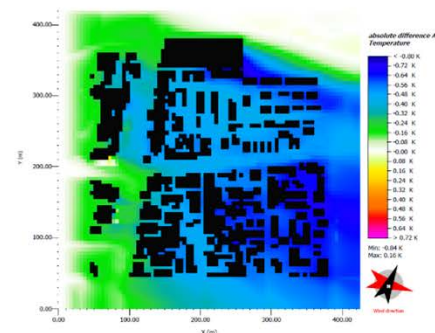
F: Juli, 16:00 Uhr



G: September, 04:00 Uhr



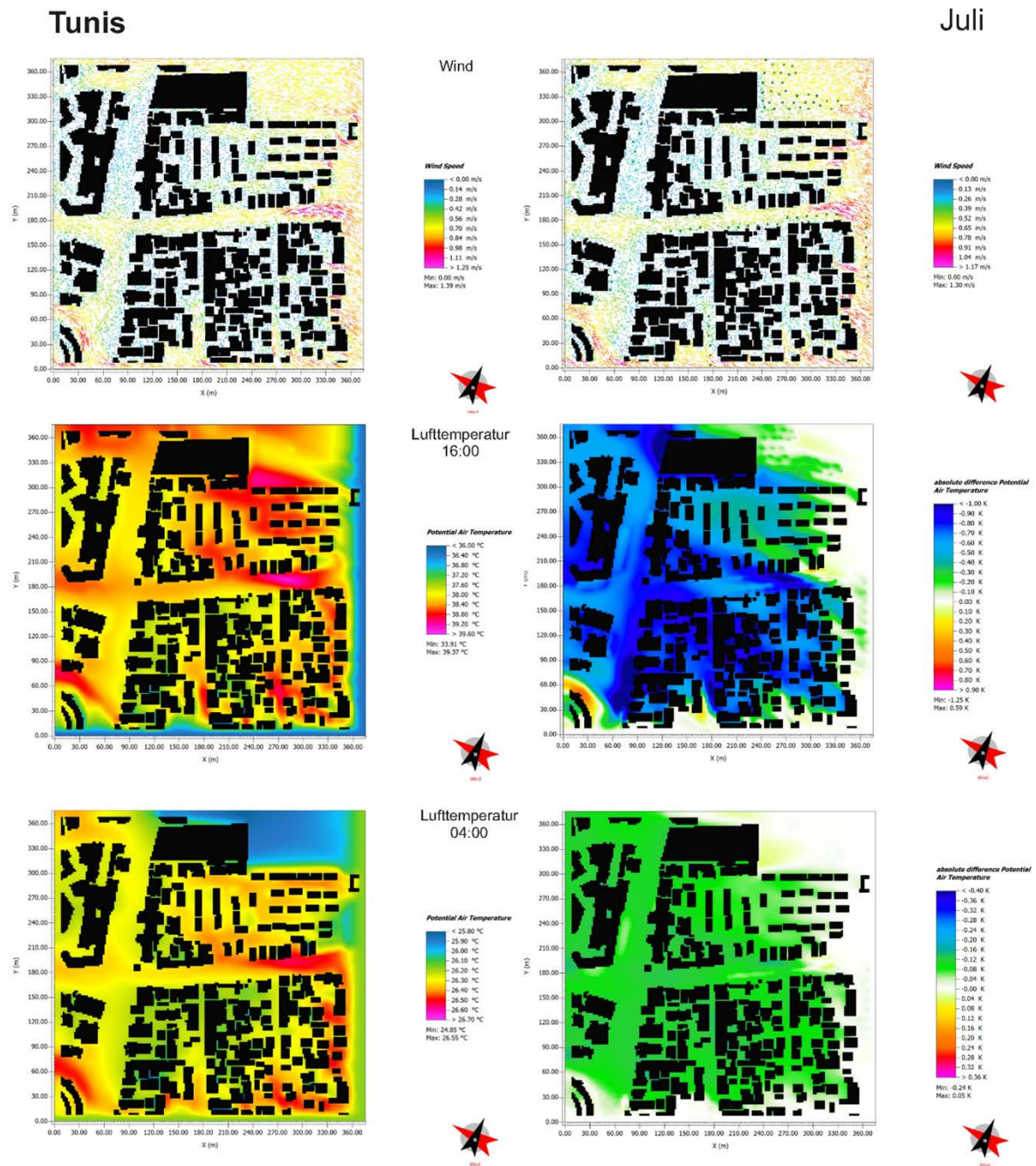
H: September, 16:00 Uhr



Tafel 1b: Jahresübersicht Tunis (Differenzen)

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

Abbildung 121: Tafel_1_c_Tunis_Detail

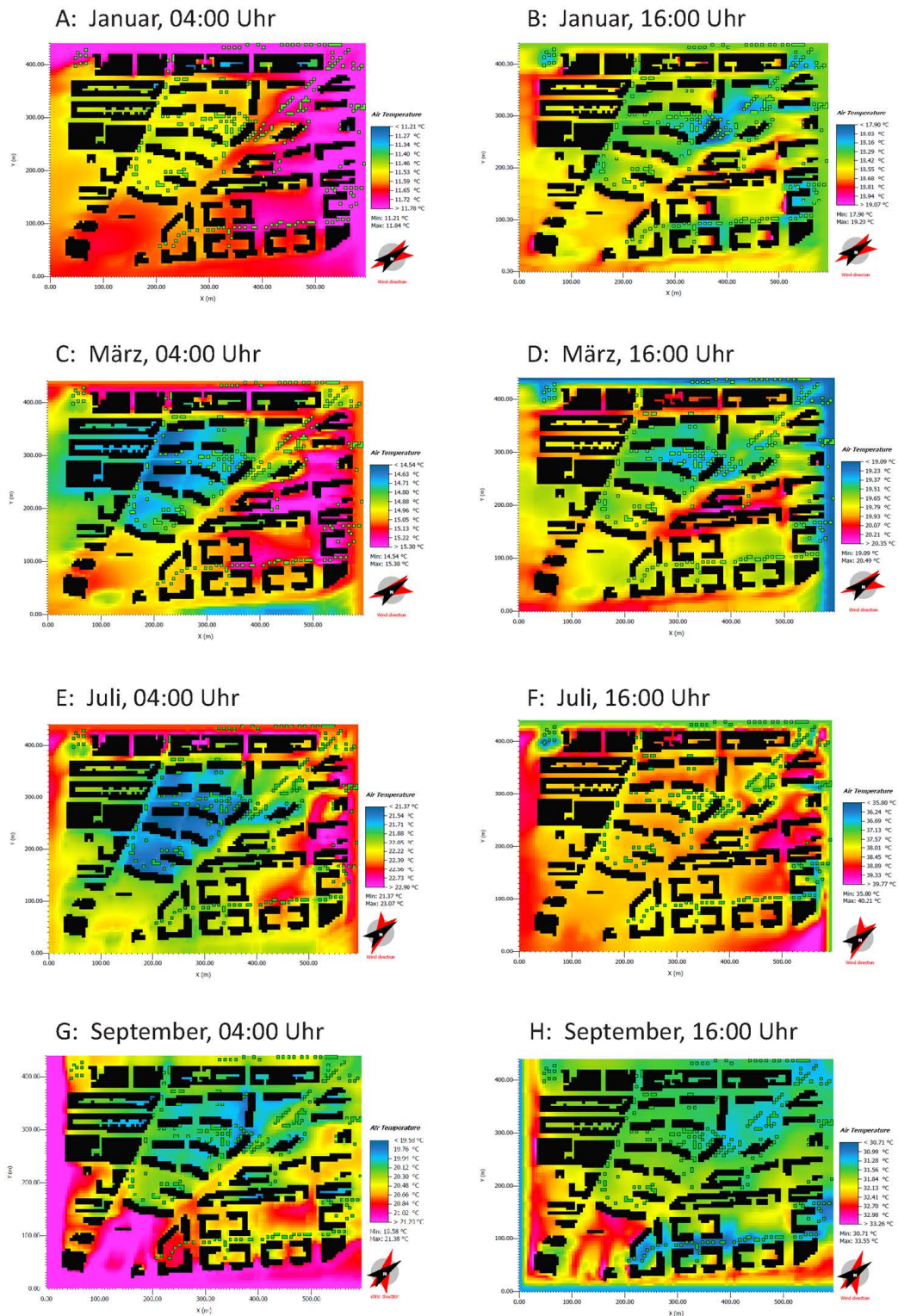


Tafel 1 c: Detailsimulationen Juli

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

Abbildung 122: Tafel_2_a_Madrid_SQ

Madrid - Status Quo



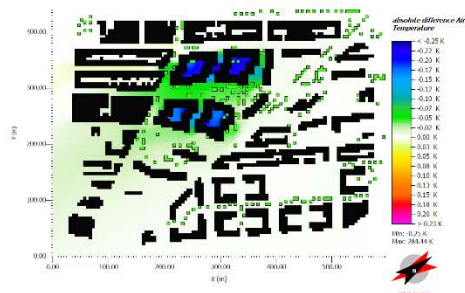
Tafel 2a: Jahresübersicht Madrid

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

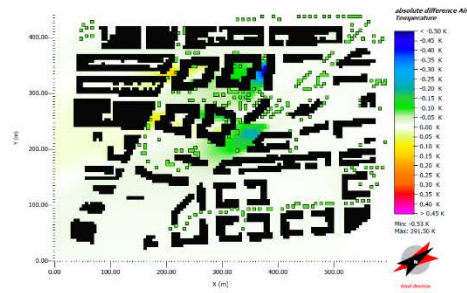
Abbildung 123: Tafel_2_b_Madrid_OPT

Madrid - Vergleich: Optimiert und Status Quo

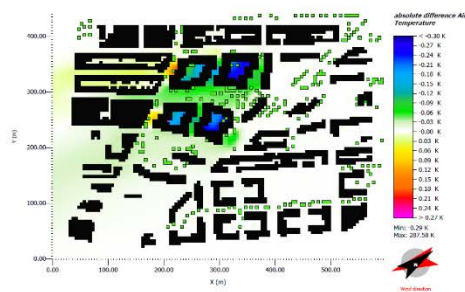
A: Januar, 04:00 Uhr



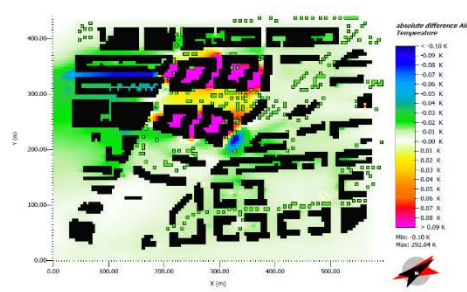
B: Januar, 16:00 Uhr



C: März, 04:00 Uhr



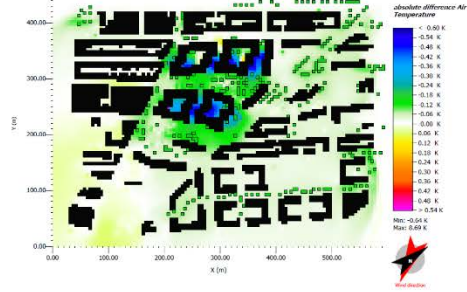
D: März, 16:00 Uhr



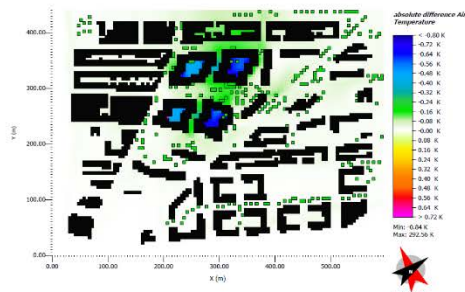
E: Juli, 04:00 Uhr



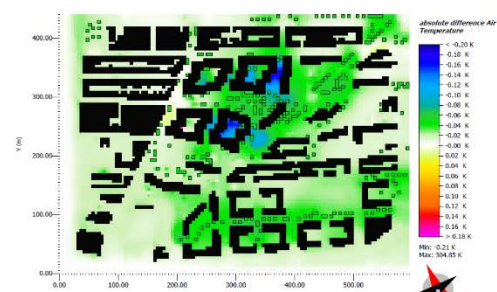
F: Juli, 16:00 Uhr



G: September, 04:00 Uhr



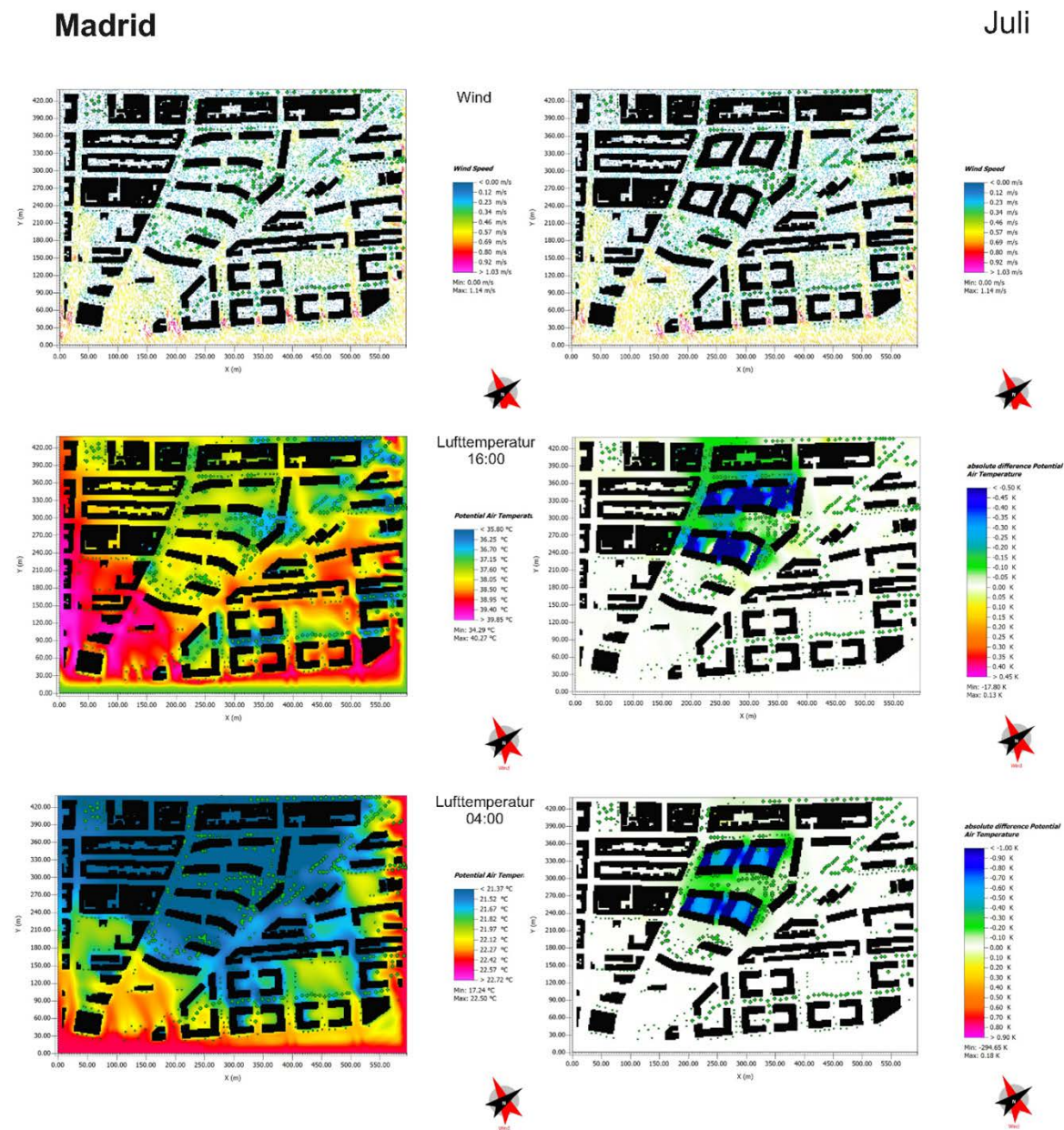
H: September, 16:00 Uhr



Tafel 2b: Jahresübersicht Madrid (Differenzen)

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

Abbildung 124: Tafel_2_c_Madrid_Detail



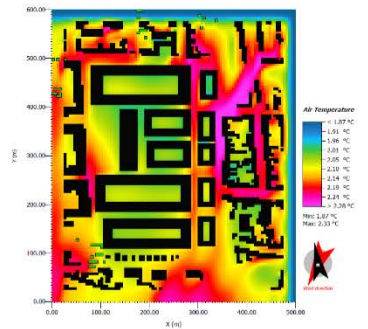
Tafel 2 c: Detailsimulationen Juli

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

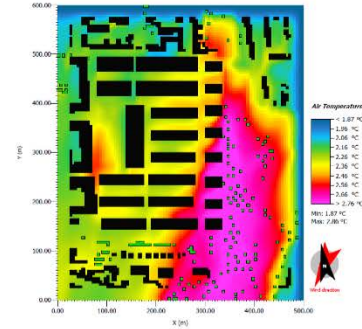
Abbildung 125: Tafel_3_a_Koeln_04h

Köln - 04:00 Uhr

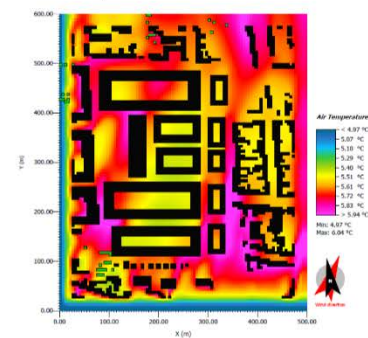
A: Januar, Status Quo



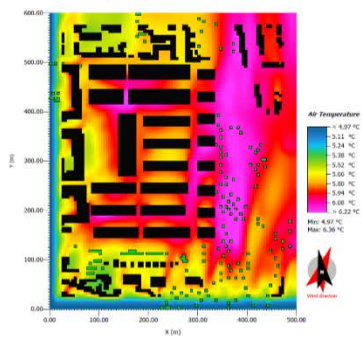
B: Januar, Optimiert



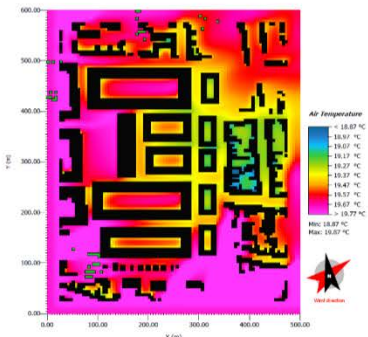
C: März, Status Quo



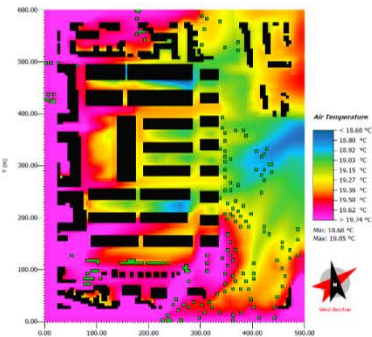
D: März, Optimiert



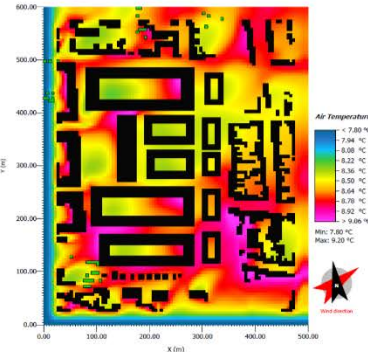
E: Juli, Status Quo



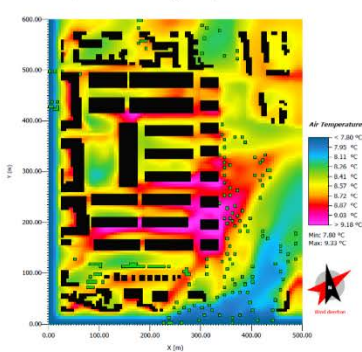
F: Juli, Optimiert



G: September, Status Quo



H: September, Optimiert



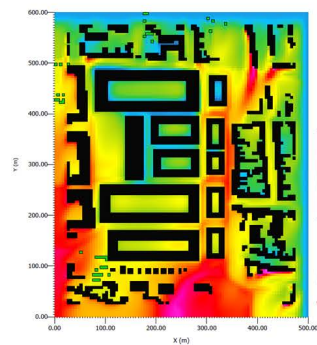
Tafel 3a: Jahresübersicht Köln, 04:00 Uhr

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

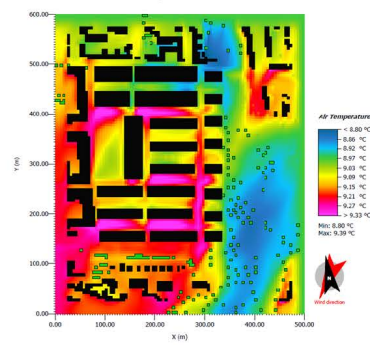
Abbildung 126: Tafel_3_b_Koeln_16h

Köln - 16:00 Uhr

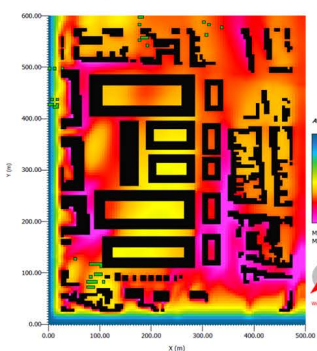
A: Januar, Status Quo



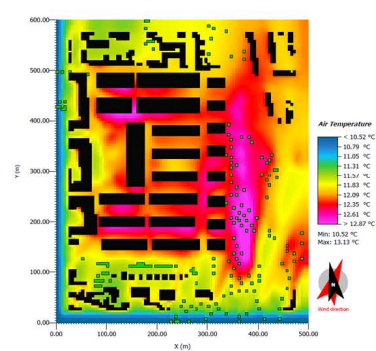
B: Januar, Optimiert



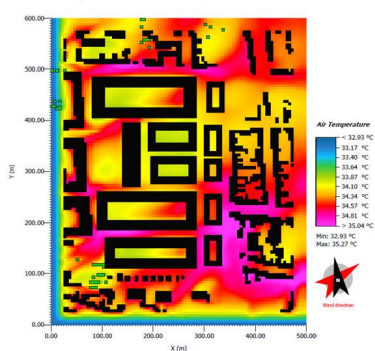
C: März, Status Quo



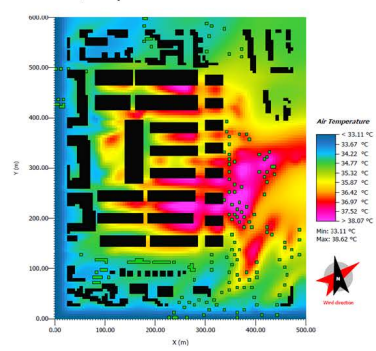
D: März, Optimiert



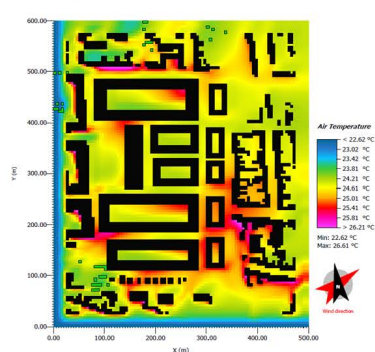
E: Juli, Status Quo



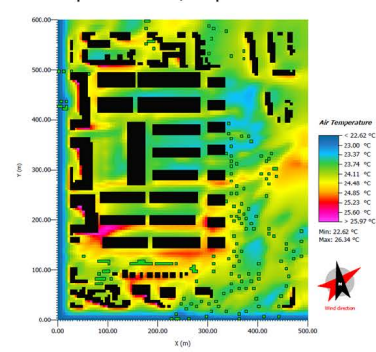
F: Juli, Optimiert



G: September, Status Quo



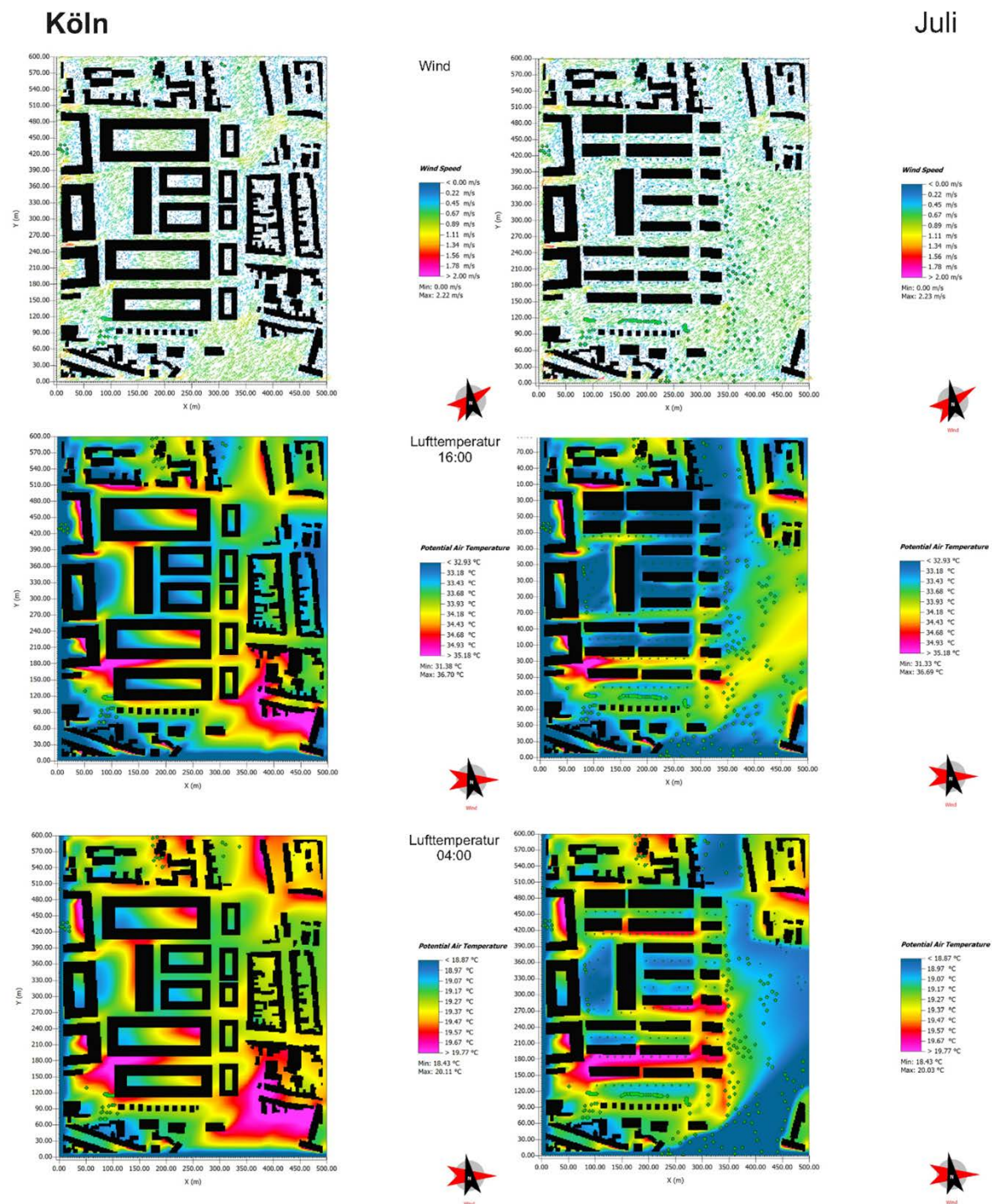
H: September, Optimiert



Tafel 3b: Jahresübersicht Köln, 16:00 Uhr

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

Abbildung 127: Tafel_3_c_Koeln_Detail



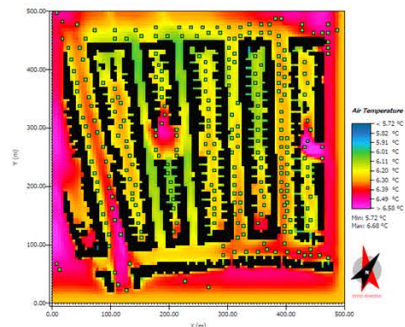
Tafel 3 c: Detailsimulationen Juli

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

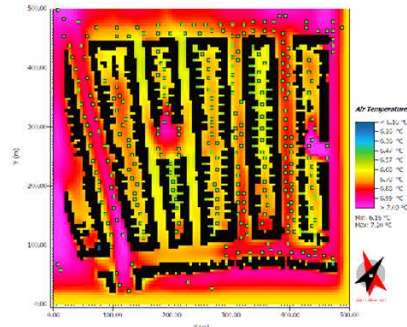
Abbildung 128: Tafel_4_a_Hamburg_SQ

Hamburg - Status Quo

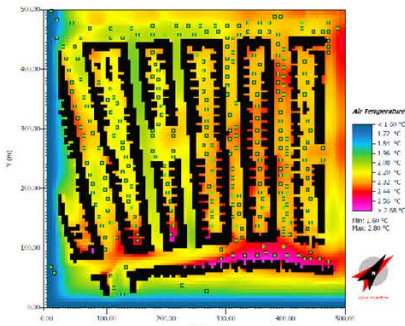
A: Januar, 04:00 Uhr



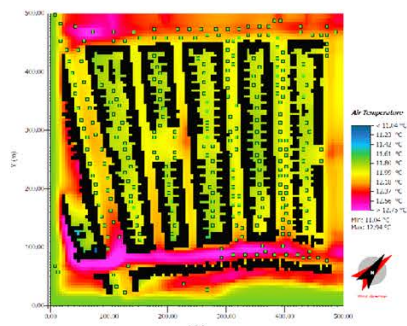
B: Januar, 16:00 Uhr



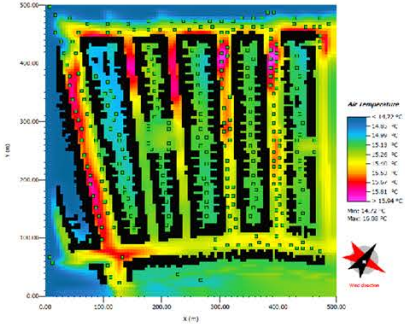
C: März, 04:00 Uhr



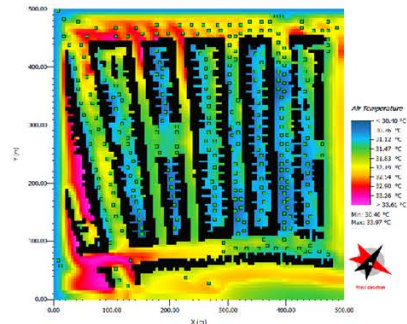
D: März, 16:00 Uhr



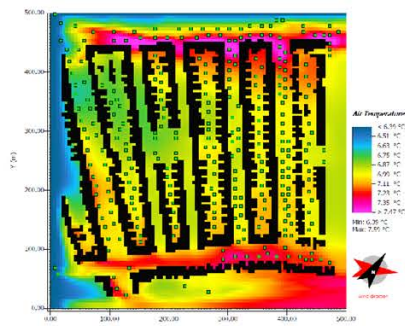
E: Juli, 04:00 Uhr



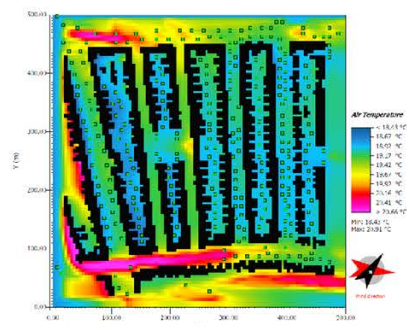
F: Juli, 16:00 Uhr



G: September, 04:00 Uhr



H: September, 16:00 Uhr



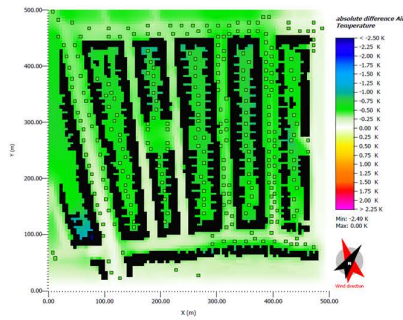
Tafel 4a: Jahresübersicht Hamburg

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

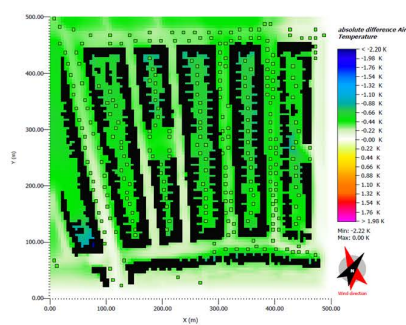
Abbildung 129: Tafel_4_b_Hamburg_OPT

Hamburg - Vergleich: Optimiert mit Status Quo

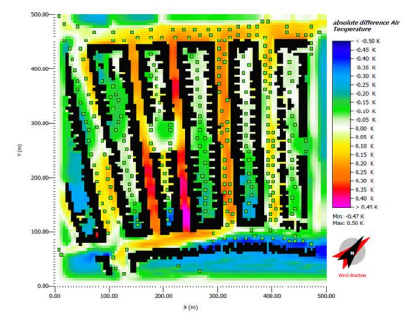
A: Januar, 04:00 Uhr



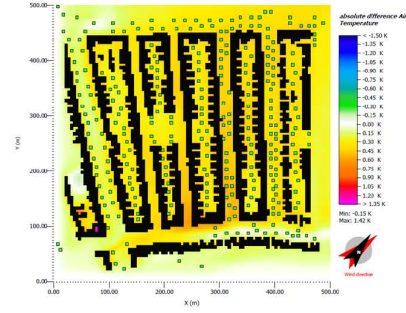
B: Januar, 16:00 Uhr



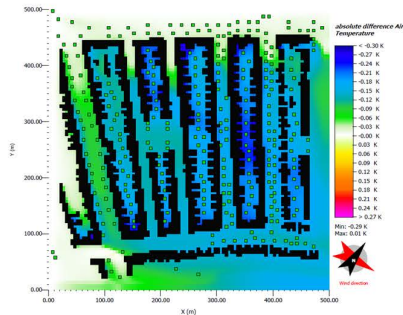
C: März, 04:00 Uhr



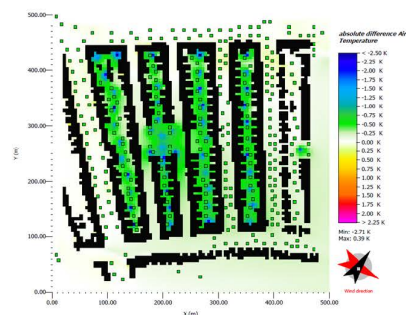
D: März, 16:00 Uhr



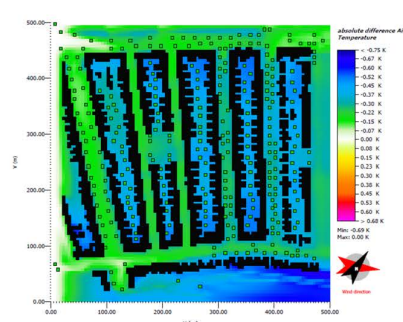
E: Juli, 04:00 Uhr



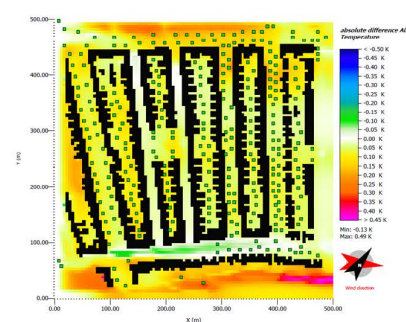
F: Juli, 16:00 Uhr



G: September, 04:00 Uhr



H: September, 16:00 Uhr



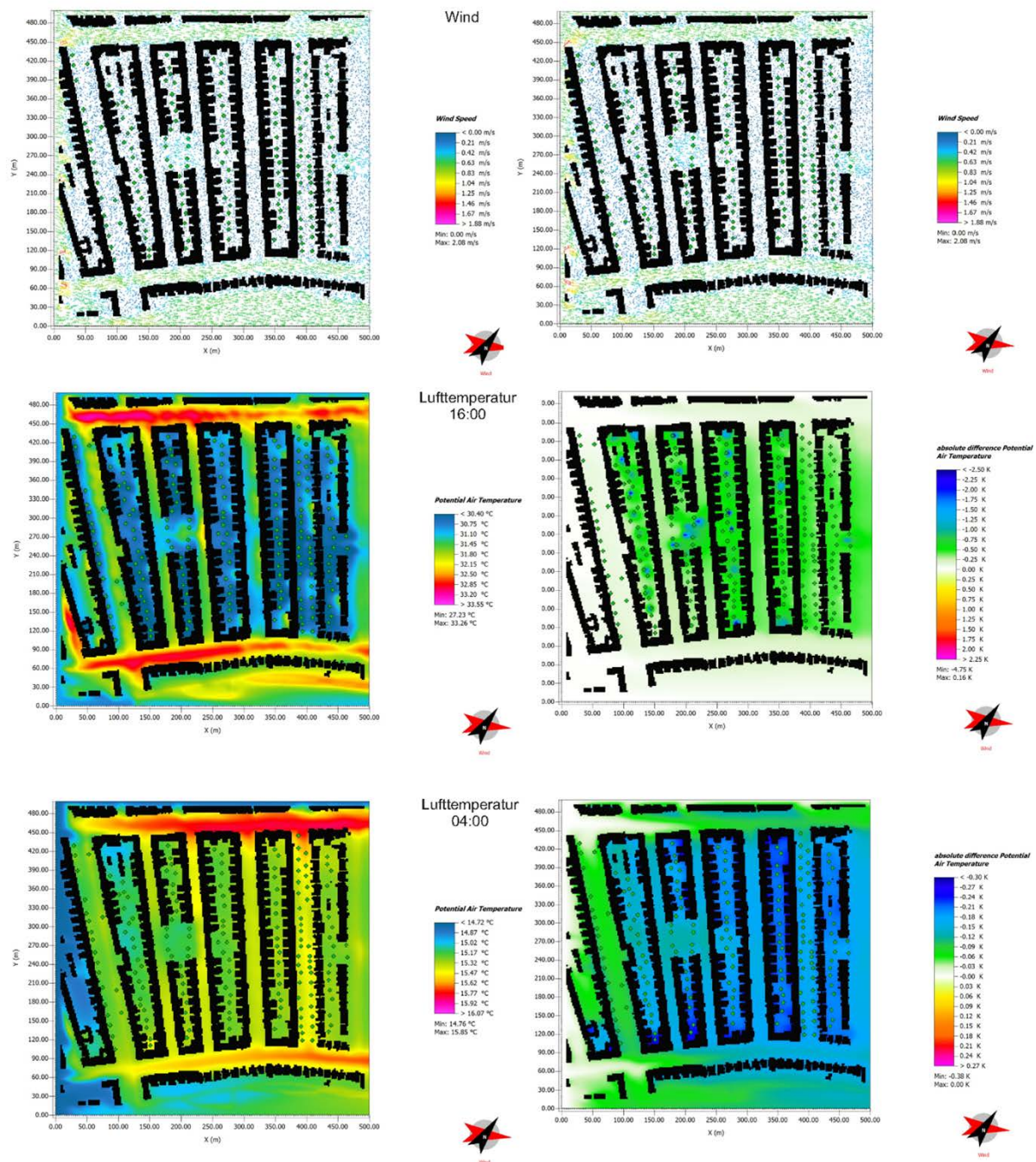
Tafel 4b: Jahresübersicht Hamburg (Differenzen)

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

Abbildung 130: Tafel_4_c_Hamburg_Detail

Hamburg

Juli



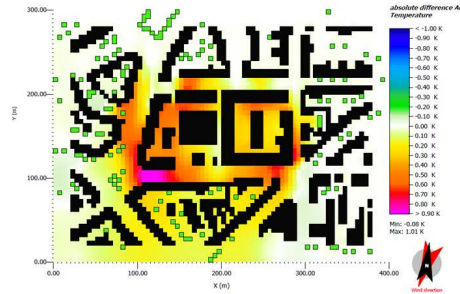
Tafel 4 c: Detailsimulationen Juli

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

Abbildung 132: Tafel_5_b_Frankfurt_OPT

Frankfurt am Main - Vergleich: Optimiert mit Status Quo

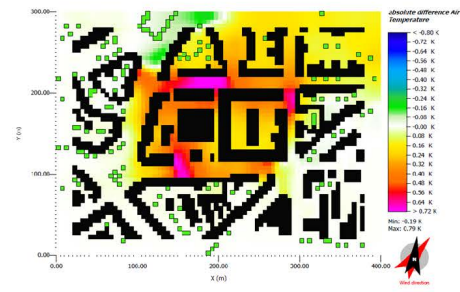
A: Januar, 04:00 Uhr



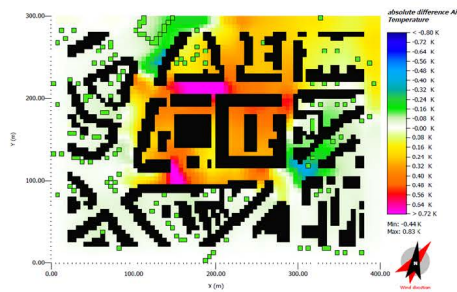
B: Januar, 16:00 Uhr



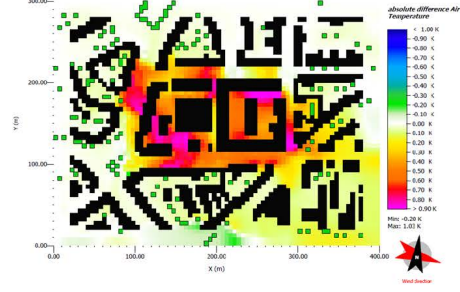
C: März, 04:00 Uhr



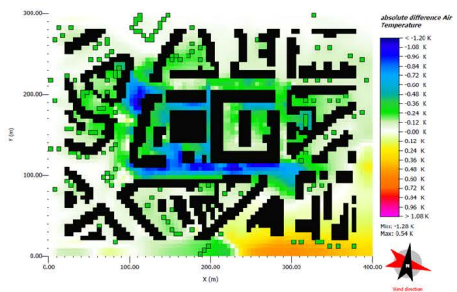
D: März, 16:00 Uhr



E: Juli, 04:00 Uhr



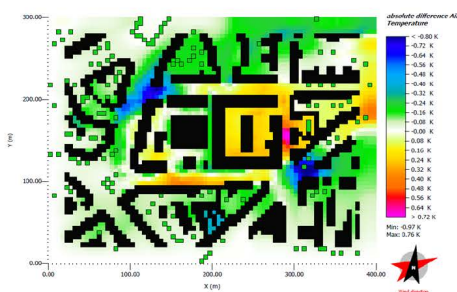
F: Juli, 16:00 Uhr



G: September, 04:00 Uhr



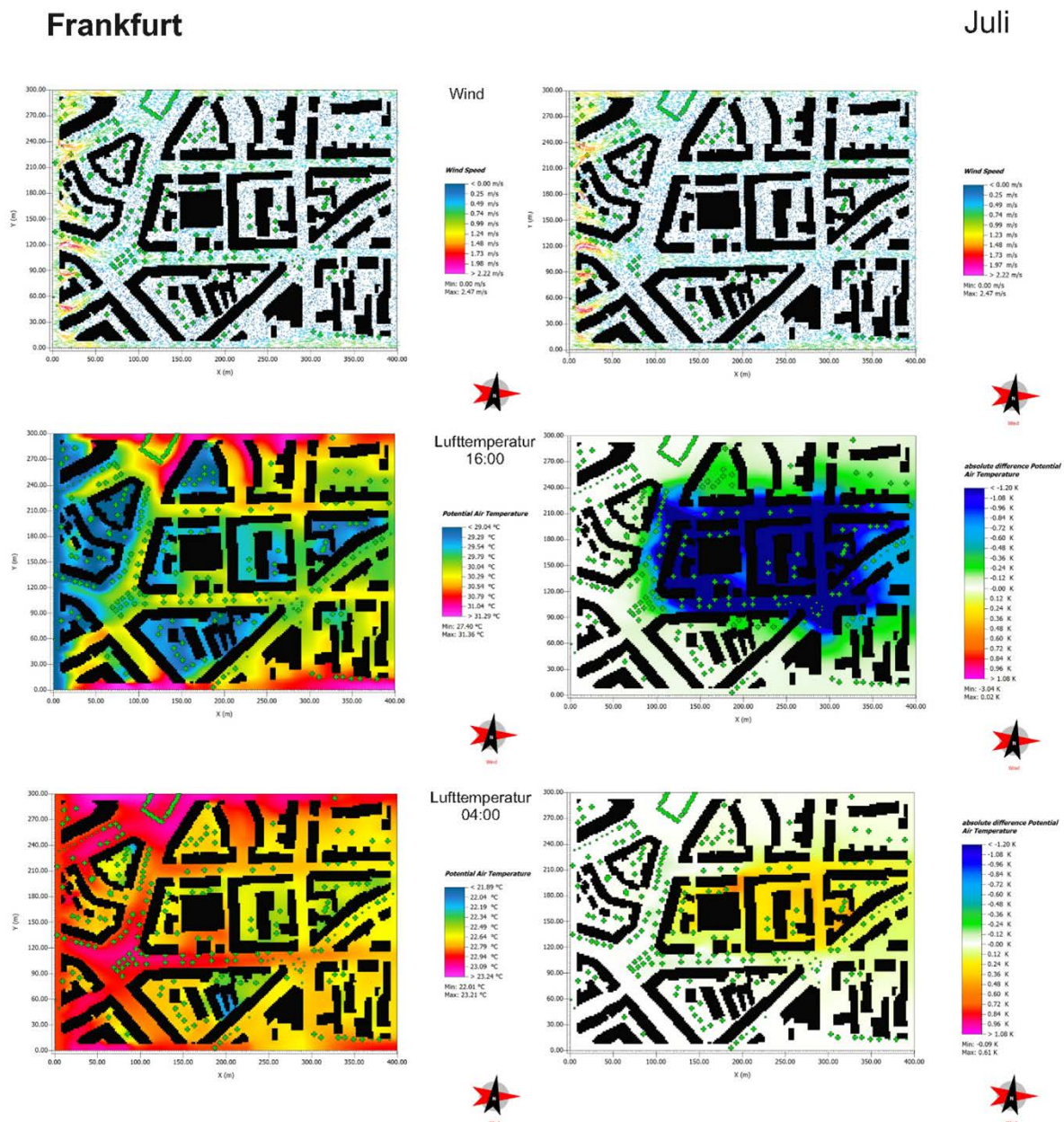
H: September, 16:00 Uhr



Tafel 5b: Jahresübersicht Frankfurt am Main (Differenzen)

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

Abbildung 133: Tafel_5_c_Frankfurt_Detail



Tafel 5 c: Detailsimulationen Juli

Quelle: Eigene Darstellung, ENVI-MET

Literaturverzeichnis

42! (2017): Apartments. 42! – das ökologische Studentenwohnheim in Bonn. 42! Wachtberg. Online verfügbar unter <https://www.42-bonn.de/apartments/>.

ABG Frankfurt Holding (2021): Willkommen bei der ABG FRANKFURT HOLDING. ABG Frankfurt Holding. Online verfügbar unter <https://www.abg.de/>.

Abgeordnetenhaus Berlin (2020): Charta für das Berliner Stadtgrün und das Handlungsprogramm Berliner Stadtgrün 2030. Vorlage - zur Beschlussfassung. Abgeordnetenhaus Berlin. Online verfügbar unter <https://www.parlament-berlin.de/ados/18/IIIPlen/vorgang/d18-2810.pdf>.

Agadi, Meryem (2019): African Development Bank (BMCE). Construction21 International. Online verfügbar unter <https://www.construction21.org/case-studies/ma/african-development-bank-bmce.html>.

Agoumi, Sakina (2016): Eco-Cité Zenata. Construction21 International. Online verfügbar unter <https://www.construction21.org/city/ma/eco-cite-zenata.html>.

Amtsblatt der Europäischen Union (2009): RICHTLINIE 2009/28/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. (Text von Bedeutung für den EWR) L 140/16.

Amtsblatt der Europäischen Union (2018): RICHTLINIE (EU) 2018/2001 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES. zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung) (L 328/82).

Aoun, Sandra (2015): Maison Notre Dame du Mont. Construction21 International. Online verfügbar unter <https://www.construction21.org/case-studies/h/maison-notre-dame-du-mont.html>.

Arboristik.de (2018): „Dicke Luft“ in Städten. Helle Fassaden und Bäume gegen Hitze und Smog. Arboristik.de. Online verfügbar unter https://www.arboristik.de/baumpflege_wissen_18052015_kit.html.

AS+P: Campo am Bornheimer Depot. Konversion des ehemaligen Straßenbahndepots Bornheim-Frankfurt zu einem Wohnquartier im Passivhausstandard. AS+P. Online verfügbar unter <https://www.as-p.de/projekte/project/campo-am-bornheimer-depot-35/show/>.

Baukultur Baden-Württemberg (2016): STICHWORT ENTSIEGELUNG. Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://www.baukultur-bw.de/index.php?id=492>.

Bayerischer Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG): Alternativen zum Projekt "Stadtgrün 2021" und ihre Eignung zur Anzucht in Baumschulen. Bayerischer Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG). Online verfügbar unter <https://www.lwg.bayern.de/gartenbau/baumschule/101381/index.php>.

Behringer, David; Heydel, Felix; Gschey, Barbara; Osterheld, Steffi; Schwarz, Winfried; Warncke, Kristina et al. (2021): Persistente Abbauprodukte halogenierter Kälte- und Treibmittel in der Umwelt: Art, Umweltkonzentrationen und Verbleib unter besonderer Berücksichtigung neuer halogenierter Ersatzstoffe mit kleinem Treibhauspotenzial. UBA (3717 41 305 0). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/persistente-abbauprodukte-halogenierter-kaelte>.

Brandenburg, Christiane; Damyanovic, Doris; Reindwald, Florian; Alex, Brigit; Gantner, Brigitte; Czachs, Christina (2015): Urban Heat Islands. Strategieplan Wien. Unter Mitarbeit von Ulrich Morawetz, Dieter Kömle und Martin Kniepert. Wiener Umweltschutzabteilung. Wien. Online verfügbar unter <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/uhi-strategieplan.html>.

Braungardt, Sibylle; Bürger, Veit; Zieger, Jana; Bosselaar, Lex: How to include cooling in the EU Renewable Energy Directive? Strategies and policy implications. In: *Energy Policy* 129, 260–267.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAfA): Bundesförderung für effiziente Gebäude. Förderprogramm im Überblick. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAfA). Eschborn. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaeude/Foerderprogramm_im_Ueberblick/foerderprogramm_im_ueberblick_node.html.

Bundesgesetzblatt (2020): Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze, Gebäudeenergiegesetz (GEG). GEG. Online verfügbar unter http://www.geg-info.de/geg/2020.08.13._bundesgesetzblatt_geg_2020_verkundung.pdf.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2016): Anpassung an den Klimawandel in Stadt und Region. Forschungserkenntnisse und Werkzeuge zur Unterstützung von Kommunen und Regionen. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Bonn (ISBN 978-3-87994-176-6). Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2016/anpassung-klimawandel-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2017): Was Stadtgrün für Mensch und Umwelt leistet. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Online verfügbar unter <https://www.umwelt-im-unterricht.de/hintergrund/was-stadtgruen-fuer-mensch-und-umwelt-leistet/>.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2020): Ihr Wegweiser zu Klimavorsorgediensten in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Bonn. Online verfügbar unter https://www.klivoportal.de/DE/Home/home_node.html.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Technische Mindestanforderungen zum Programm „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ – Einzelmaßnahmen. BEG EM TMA unveröffentlicht.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (17.12.2020): Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen. BEG EM. In: *Bundesanzeiger* BAnz AT 30.12.2020 B2.

Bundesverband Garten-, Landschafts und Sportplatzbau e. V. (2006): Entsiegelung von Flächen - eine Aufgabe für die Betriebe des Garten-, Landschafts- und Sportplatzbaus. Bundesverband Garten-, Landschafts und Sportplatzbau e. V. Bad Honnef. Online verfügbar unter <https://www.odendahl-partner.de/Downloads/Entsiegelung.pdf>.

CEN/TS 17607:2021, 30.06.2021: CEN/TS 17607:2021 Technische Spezifikation: Betrieb, Wartung, Instandhaltung, Reparatur und Außerbetriebnahme von Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen, die brennbare Kältemittel enthalten, zur Ergänzung bestehender Normen.

CEN/TS 17606:2021, 17.03.2021: EN/TS 17606:2021 Technische Spezifikation: Installation von Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen, die brennbare Kältemittel enthalten, zur Ergänzung bestehender Normen.

Cleaner Production Germany (2021): Neuste Technologien für Pilotgebäude in New Town Hashtgerd (Iran). Cleaner Production Germany. Online verfügbar unter <https://www.cleaner-production.de/index.php/de/themen/energie-und-materialeffizienz/bauen-gebaeude/waermedaemmung-fassaden/1909-neuste-technologien-fuer-pilotgebaeude-in-new-town-hashtgerd-iran#zusammenfassung>.

Colbourne, Daniel; LIFE FRONT (2020): Recommendations for the revision of safety standards for RACHP equipment. LIFE FRONT (WP 4.4, 5.1 & 5.2). Online verfügbar unter <http://lifefront.eu/wp-content/uploads/2020/05/recommendations-for-the-revision-of-safety-standards-for-rachp-equipment-25052020-min-for-upload.pdf>.

Dambeck, Holger (2010): Weiße Dächer können Sommerhitze mildern. Spiegel Wissenschaft. Online verfügbar unter <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/stadtklima-weisse-daecher-koennen-sommerhitze-mildern-a-675259.html>.

Deutschen Akademie für Städtebau und Landesplanung (2010): Deutscher Städtebaupreis 2010. Frankfurt am Main - Campo am Bornheimer Depot, Hamm- Stadtumbau West im Bahnhofsquartier. Deutschen Akademie für Städtebau und Landesplanung. Online verfügbar unter https://staedtebaupreis.de/wp-content/uploads/2017/08/07-DSBP-B_FHAM.pdf.

Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2012): Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. DIN EN 15251:2012.

Di Giuseppe, E. (2021): Numerical modelling and experimental validation of the microclimatic impacts of water mist cooling in urban areas, Energy and Buildings 231 (ISSN 0378-7788).

DIN 1946-6, Dez 2019: Raumlufttechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung.

DIN EN 378-1:2021-06, 06.2021: DIN EN 378-1:2021-06 Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 1: Grundlegende Anforderungen, Begriffe, Klassifikationen und Auswahlkriterien.

DIN EN 378-2:2018-04, 04.2018: DIN EN 378-2:2018-04 Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 2: Konstruktion, Herstellung, Prüfung, Kennzeichnung und Dokumentation.

DIN EN 378-3:2020-12, 12.2020: DIN EN 378-3:2020-12 Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 3: Aufstellungsort und Schutz von Personen.

DIN EN 378-4:2019-12, 12.2019: DIN EN 378-4:2019-12 Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 4: Betrieb, Instandhaltung, Instandsetzung und Rückgewinnung.

DIN 4108 Beiblatt 2, March 2006: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden.

DIN EN 60335-2-24 VDE 0700-24:2019-11, 11.2019: DIN EN 60335-2-24 VDE 0700-24:2019-11 - Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke - Teil 2-24: Besondere Anforderungen für Kühl-/Gefriergeräte und Speiseeis- und Eisbereiter.

Dirk Hessel, Johann; Roos, Marita; Buchholz, Saskia; Koßmann, Meinolf; Gassdorf, Thomas; Hoffmann, Kristin; Tanner, Petra (2017): Urbane Räume nachhaltig gestalten. Entscheidungshilfe für eine klimagerechte Stadtentwicklung. Deutscher Wetterdienst (DWD). Offenbach. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/klima/urbane_raeume_nachhaltig_gestalten.pdf?__blob=publicationFile&v=5.

Donn, Michael; Garde, Francois (2014): Solution Sets and Net Zero Energy Buildings: A review of 30 Net ZEBs case studies worldwide. A report of Subtask C - IEA Task 40/Annex 52 Towards Net Zero Energy Solar Buildings. International Energy Agency (IEA). Reunion.

E DIN EN IEC 60335-2-40/A11 VDE 0700-40/A11:2021-10, 10.09.2021: E DIN EN IEC 60335-2-40/A11 VDE 0700-40/A11:2021-10 Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke Teil 2-40: Besondere Anforderungen für elektrisch betriebene Wärmepumpen, Klimageräte und Raumluft-Entfeuchter.

E DIN IEC 60335-2-89 VDE 0700-89:2019-04, 15.03.2019: E DIN IEC 60335-2-89 VDE 0700-89:2019-04 Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke Teil 2-89: Besondere Anforderungen für gewerbliche Kühl-/Gefriergeräte mit eingebautem oder getrenntem Verflüssigersatz oder Motorverdichter (IEC 61C/732/CDV:2018).

Energieagentur NRW: Klimaschutzsiedlung Münster, Dieckmannstraße. Energieagentur NRW. Online verfügbar unter <https://broschuerenservice.nrw.de/files/f/a/fa4f7e82928f495b9ee5e75db0403a5e.pdf>.

Energieagentur NRW: Projektinfo: Solarsiedlung Düsseldorf-Medienhafen. Energieagentur NRW.

Energie-Experten.org (2021): Propan als Kältemittel in Wärmepumpen, Klima- und Kälteanlagen. Online verfügbar unter <https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/technik/kaeltemittel/propan>

ENGIE (2013): District heating and cooling systems. ENGIE. Online verfügbar unter <https://www.engie.com/en/businesses/district-heating-cooling-systems/>.

EU (20.05.2014.): Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG). F-Gas-Verordnung.

European Commission (DG Energy) (2018): Tender N° ENER/C1/2018-493: Renewable Cooling under the Revised Renewable Energy Directive. European Commission (DG Energy). Online verfügbar unter <https://etendering.ted.europa.eu/cft/cft-display.html?cftId=4201>.

European Commission (EC) (14.07.2021): Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EU) 2018/842 on binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030 contributing to climate action to meet commitments under the Paris Agreement. COM(2021) 555 final proposal effort sharing regulation plus annexes. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/proposal-amendment-effort-sharing-regulation-with-annexes_en.pdf

Faustmann, Christine; Hollauf, Benrd (2014): 13. Symposium Energieinnovation. Fernkälte als Möglichkeit zur Effizienzsteigerung bei Abfallverbrennungsanlagen. Verbund AG. Graz. Online verfügbar unter https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2014/files/pr/PR_Faustmann.pdf.

Gebäudeenergiegesetz (GEG) (2020): Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-Internet.de/geg/>.

Giacomello, Elena; Valagussa, Massimo (2015): Vertical Greenery - Evaluating the High-rise vegetation of the Bosco Verticale, Milan. ARUP; Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Online verfügbar unter https://store.ctbuh.org/index.php?controller=attachment&id_attachment=32.

Greciano, Josecarlos (2014): PILOT SCHEME COMPLETE ENERGY REFURBISHMENT IN A RESIDENTIAL BUILDING IN MADRID. Construction21 International. Online verfügbar unter <https://www.construction21.org/case-studies/es/pilot-scheme-complete-energy-refurbishment-in-a-residential-building-in-madrid.html>.

HAUTEC Wärmepumpen: Carno HCS Premium. Online verfügbar unter <https://hautec.eu/loesungen/sole-wasser-waermepumpe/carno-hcs-premium/>

Heidelberg, Stadt (2018): Die Bahnstadt - Ihr Platz am Wissenschaftsstandort Heidelberg. Online verfügbar unter https://www.heidelberg-bahnstadt.de/site/HD_Satelliten/get/documents_E-189662638/heidelberg/Objektdatenbank/Bahnstadt/heidelberg-bahnstadt.de/Pdf/pdf_broschuere_bahnstadt_1801009.pdf.

Hessisches Ministerium für Soziales und Integration (2017): Richtlinie des Landes Hessen zur Förderung der nachhaltigen Stadtentwicklung - RiLiSE. Staatsanzeiger für das Land Hessen. Hessisches Ministerium für Soziales und Integration. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://nachhaltige-stadtentwicklung-hessen.de/media/rilise_2017_2.pdf.

HHS Hegger Hegger Schleiff Architekten (2015): Aktiv-Stadthaus. Frankfurt am Main. HHS Hegger Hegger Schleiff Architekten. Online verfügbar unter https://www.hhs.ag/img/projekte/1116-FABG/1116-Aktiv-Stadthaus_Frankfurt.pdf.

Hollauf, Bernd; Faustmann, Christine (2014): Fernkälte als Möglichkeit zur Effizienzsteigerung bei Abfallverbrennungsanlagen. 13. Symposium Energieinnovation, 12.-14.2.2014, Graz/Austria. VERBUND Umwelttechnik GmbH. Online verfügbar unter https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2014/files/lf/LF_Faustmann.pdf.

Irena (2021): Energy Profile Tunesia. Online verfügbar unter https://www.irena.org/IRENADocuments/Statistical_Profiles/Africa/Tunisia_Africa_RE_SP.pdf

ISO 817 Tables_E4_E5_E6 - 2021-08. Online verfügbar unter <https://standards.iso.org/iso/817/ed-3/en/>.

Jakob, Anton (2010): Der Biotopflächenfaktor als städtebauliche Kennzahl. Vergleich der Anwendung in Berlin, Malmö und Seattle sowie Erläuterung einer möglichen Anwendung in Wien. Technische Universität Wien (TU Wien). Wien. Online verfügbar unter <https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/11654/2/Jakob%20Anton%20Mathias%20-%202010%20-%20Der%20Biotopflaechenfaktor%20als%20staedtebauliche...pdf>.

Jay, Marion; Selter, Andy; Schraml, Ulrich; Wurster, Matthias (2015): Urbaner Wald: Urbane Lebensqualität. Die vielfältigen Ökosystemleistungen urbaner Wälder sichtbar machen. Handlungsleitfaden. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Online verfügbar unter https://media.essen.de/media/wwwessende/aemter/67/674waldungenundbaumpflege/Urbane_Waelder_in_NRW_Handlungsleitfaden.pdf.

Jendrischik, Martin (2020): Wäschetrockner im Test: Miele und Beko überzeugen besonders. Online verfügbar unter <https://www.cleantinking.de/waeschetrockner-waermepumpe-2020-testsieger-miele-beko/>.

Jolk, Anna-Kristen; Peters, Marco; Willen, Luise (2017a): Praxisratgeber Klimagerechtes Bauen. Mehr Sicherheit und Wohnqualität bei Neubau und Sanierung. im Auftrag der Schwäbisch Hall-Stiftung bauen-wohnen-leben. Hg. v. Sigrid Künzel. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (Difu). Köln. Online verfügbar unter <https://difu.de/publikationen/2017/praxisratgeber-klimagerechtes-bauen.html>.

Jolk, Anna-Kristen; Pichl, Josefine; Balthussen, Andrea; Gunkel, Andreas; Ahlemann, Denis; Schröter, Steffen et al. (2017b): Klimaangepasste Planung im Quartier am Beispiel des Ostparks in Bochum. Plan 4 Change - Neue Wege zu einer klimaangepassten Stadtplanung. Stadt Bochum, Amt für Stadtplanung und Wohnen; Deutsches Institut für Urbanistik; Ruhr-Universität Bochum. Berlin/Köln.

Jührich, Kristina (2016): CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. 27/2016. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau (Climate Change, ISSN 1862-4359).

Khasawneh, J. (2011): AREE - Aqaba Residence Energy Efficiency

Klauß, Swen; Kirchhof, Wiebke; Gissel, Johanna (2009): Katalog regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten (2. berichtigte Version). Germany. Hg. v. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB). Kassel.

Kölner Wochenspiegel (2018): Von Grau zu Grün Das Clouth-Quartier erhält mit dem Luftschiffplatz eine grüne Mitte. Kölner Wochenspiegel. Online verfügbar unter <https://www.rheinische-anzeigenblaetter.de/mein-blatt/koelner-wochenspiegel/nippes/von-grau-zu-gruen-das-clouth-quartier-erhaelt-mit-dem-luftschiffplatz-eine-gruene-mitte-31520076>.

Kopetzki, Sabine; HafenCity Universität Hamburg (HCU) (2017): Berlin - Grüne Innenstadt: Biotopflächenfaktor. Online verfügbar unter https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Professoren_und_Mitarbeiter/Projektentwicklung_-_management/Forschung/Urbane_Freiraeume_Steckbrief_Berlin_Biotopflaechenfaktor.pdf.

Kükrekol, Feliz (2020): Hitzewelle - Das gescheiterte Modell Heidelberg-Bahnstadt. Deutschlandfunk Kultur. Online verfügbar unter <https://www.deutschlandfunkkultur.de/hitzewelle-das-gescheiterte-modell-heidelberg-bahnstadt-100.html>.

Landeshauptstadt Hannover; Grundlaco Bau und Immobilien GmbH & Co. KG; Sustainify GmbH (2019): Abschlussbericht Klimawohl - Klimaangepasstes nachhaltiges Wohnen und Leben im Quartier. Förderprogramm „Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels“. Hannover.

Laudy, Sander (2016): District Heating & Cooling network in Olot. Construction21 International. Online verfügbar unter <https://www.construction21.org/city/es/district-heating--cooling-network-in-olot.html>.

Mauritz, Andreas: „Schrauben los“ im „Campo am Bornheimer Depot“. 150 neue Wohnungen in Passivhausbauweise. Online verfügbar unter https://www.abg.de/PDF/Schelleklobbe_Juli06_BornheimerDepot.pdf.

Meteonorm Software: Meteonorm 7. Weltweite Einstrahlungsdaten. Version.

Miljöbyggprogram SYD: Grönnytefaktor. Miljöbyggprogram SYD. Online verfügbar unter <https://malmo.se/download/18.492e6d8f17575ea6e89262b6/1611055801804/Gr%C3%B6nnytefaktor%20MBP%20ver%202.webb.pdf>.

Monteiro, Madalena Vaz; Doick, Kieron, J.; Handley, Philipp; Peace, Andrew (2016): The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 16, S. 160–169. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1618866716000285?via%3Dihub>.

Nationale Stadtentwicklungspolitik (2015): Frankfurt a.M. "Campo Bornheim". Nationale Stadtentwicklungspolitik. Online verfügbar unter https://www.nationale-stadtentwicklungspolitik.de/NSP/SharedDocs/Projekte/WSProjekte_DE/Frankfurt_aM_Campo_Bornheim.html

Naturkapital Deutschland – TEEB DE (2017): NATURKAPITAL DEUTSCHLAND – TEEB DE. HITZESTRESS UND LUFTSCHADSTOFFE: STADTNATUR REDUZIERT GESUNDHEITSKOSTEN. Naturkapital Deutschland – TEEB DE. Online verfügbar unter https://www.ufz.de/export/data/462/191161_Fallstudie_Stadtklima_Web.pdf.

Nusser, Tobias; Dietel, K. (2016): Das Aktivhaus in Betrieb.

Offermann, Markus; von Manteuffel, Bernhard; Blume, Julia; Kühler, Daniel (2016): Klimaschonende Klimatisierung (Heizen und Kühlen) mit natürlichen Kältemitteln – Konzepte für Nichtwohngebäude mit Serverräumen/Rechenzentren. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschonende-klimatisierung-heizen-kuehlen>

Pannicke-Prochnow, Nadine; Krohn, Christopher Krohn; Albrecht, Juliane; Thinius, Karin; Ferber, Uwe; Eckert, Karl (2021): Bessere Nutzung von Entsigelungspotenzialen zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen und zur Klimaanpassung. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bessere-nutzung-von-entsiegelungspotenzialen-zur>.

Passive House Institute (PHI): ID - 10310 Jakarta (Jakarta). ID: 4340. Passive House Institute (PHI). Online verfügbar unter https://passivehouse-database.org/#d_4340.

Passivhaus Institut (PHI): AR - 21183 Dubai, Al Khawaneej (Dubai). ID: 5065. Passivhaus Institut GmbH. Online verfügbar unter https://passivehouse-database.org/#d_5065.

Passivhaus Institut (PHI): E - 25198 Lleida (Cataluña). ID: 2116. Passive House Institute (PHI). Online verfügbar unter https://passivehouse-database.org/index.php#d_2116.

Persch, Robert (2018): Die Bahnstadt - ein klimaneutraler Stadtteil in Heidelberg. Berliner Energietage 2018. Heidelberg. Online verfügbar unter https://www.energietage.de/fileadmin/user_upload/2018/Vortraege/1.03_Persch_Bahnstadt_Heidelberg.pdf.

Preuß, Thomas; Bunzel, Arno; Hanke, Stefanie; Michalski, Daniela; Pichl, Josefine; Steinrücke, Elena; Janßen, Antje; Riemer, Evelyn (2020): Gute Praxisbeispiele kompakter und zugleich lärmarmen städtischer Quartiere. Texte 195/2020. ISSN 1862-4804. Umweltbundesamt (UBA). Dessau Roßlau. Online verfügbar unter

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_11_02_texte_195_2020_bmu_projektabschluss_abschlussbericht.pdf

Raasch, Ulrike (2015): VIVAWEST- Mehrgenerationenquartier „Johanniskirchgärten“ Essen-Altenessen. Beispielsammlung zur Zukunftsinitiative „Wasser in der Stadt von morgen“. VIVAWEST.

Rahman, Mohammad Asrafur (2016): Bäume schwitzen für eine kühle Stadt. Winterlinden können städtische Plätze wie Klimaanlage kühlen. Technische Universität München. Online verfügbar unter <https://www.tum.de/die-tum/aktuelles/pressemitteilungen/detail/33393/>.

Rasch, Ute (2015): Eine Insel mitten in Oberbilk. RP Online. Online verfügbar unter https://rp-online.de/nrw/staedte/duesseldorf/so-wohnt-duesseldorf-eine-insel-mitten-in-oberbilk_aid-22037609.

Reinwald, F.; Brandenburg, C.; Hinterkörner, P.; Hollosi, B.; Huber, C.; Kainz, A. et al. (2020): Grüne und resiliente Stadt. Steuerungs- und Planungsinstrumente für eine klimasensible Stadtentwicklung. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Wien. Online verfügbar unter https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2021-13-gruene-resiliente-stadt.pdf.

RESIN (2016): City Assessment Report Bilbao. RESIN. Online verfügbar unter http://www.resin-cities.eu/fileadmin/user_upload/D4.1__City_Assessment_Report_Bilbao_ICLEI_2016-02-29.pdf.

Rhein Exclusiv (2017): En unserem Veedel. seromedia GmbH.

Robert Koch Institut (2019): Schätzung der Zahl hitzebedingter Sterbefälle und Betrachtung der Exzess-Mortalität; Berlin und Hessen, Sommer 2018. Epidemiologisches Bulletin. Aktuelle daten und informationen zu infektionskrankheiten und public health (Nr. 23/2019), S. 193–206. Online verfügbar unter https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Archiv/2019/Ausgaben/23_19.pdf?__blob=publicationFile.

Roby, Christin (2017): An inside look into Africa's first eco-city: Zenata, Morocco. Devex. Online verfügbar unter <https://www.devex.com/news/an-inside-look-into-africa-s-first-eco-city-zenata-morocco-89741>.

Sadik, Zakaria (2015): Hanaa EL ALF - Rte Unit, Ain Sbaa, Casablanca. Construction21 International. Online verfügbar unter <https://www.construction21.org/luxembourg/case-studies/ma/hanaa-el-alf---rte-unit-ain-sbaa-casablanca.html>.

Scherer, D.; Fehrenbach, U.; Lakes, T.; Lauf, S.; Meier, F.; Schuster, C. (2013): Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany. In: *DIE ERDE* 144 (3-4), S. 238–259. Online verfügbar unter https://www.die-erde.org/index.php/die-erde/article/view/49/pdf_3.

Schlitzberger, Stefan (2013): Thermisches und energetisches Verhalten von Gebäuden im Lichte des Klimawandels - Anforderungen und Lösungen für den Sonnenschutz. Abschlussbericht. im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“. Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Kassel.

Schröder, Franz Peter (2019): Hitze frei in deutschen Wohnungen,. Entwicklung deutscher Wohnraumtemperaturen mit intensiveren sommerlichen Hitzewellen. In: *HLH - Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik* 9; 70, 20-25; 71-75.

Schulz, Bernhard (2017): Auf der Sonnenseite der Moderne. Was wurde aus der Zukunftsstadt Masdar City? Der Tagesspiegel. Online verfügbar unter <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/immobilien/was-wurde-aus-der-zukunftsstadt-masdar-city-auf-der-sonnenseite-der-moderne/20658020.html>.

Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin (2020): Straßen- und Parkbäume. Übersichten der Bestandsdaten. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin. Online verfügbar unter <https://www.berlin.de/sen/uvk/natur-und-gruen/stadtgruen/daten-und-fakten/stadtbaeume/>.

Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin (2021): Der Biotopflächenfaktor. Ihr ökologisches Planungsinstrument. Berlin. Online verfügbar unter https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/natur-gruen/landschaftsplanung/bff-biotopflaechenfaktor/broschuere_bff_als_oekologisches_planungsinstrument.pdf.

Serrano, David (2016): Districlima urban network of heat and cold in Barcelona and Sant Adria de Besos. Construction21 International. Online verfügbar unter <https://www.construction21.org/city/es/districtlima-urban-network-of-heat-and-cold-in-barcelona-and-sant-adria-de-besos.html>.

Sieker, Heiko; Steyer, Ruth; Büter, Björn; Leßmann, Dominika; von Tils, Robert; Becker, Carlo; Hübner, Sven (2019): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. Texte 111/2019. ISSN 1862-4804. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-16_texte_111-2019_verdunstungskuehlung.pdf

Sodoudi, Sahar; Langer, Ines; Cubasch, Ulrich (2013): Impacts of Vegetation and Urban planning on micro climate in Hashtgerd new Town. Online verfügbar unter <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012AGUFMGC11B0993S/abstract>.

Soussan, Myriam (2015): Autonomous urban habitat. Construction21 International. Online verfügbar unter <https://www.construction21.org/case-studies/ma/autonomous-urban-habitat.html>.

Spagnoli Gabardi, Chaira (2014): BOSCO VERTICALE: MILAN GETS GREEN. ELUX Magazine. Online verfügbar unter <https://eluxemagazine.com/living/home/bosco-verticale-really-tall-forest/>.

Stadt Wien: Der Lokale Grünplan - Fachkonzept Grün- und Freiraum. Stadt Wien. Wien.

Stadt Wien: Wien lebt auf - Freiräume: grün & urban - STEP 2025. Stadt Wien. Online verfügbar unter <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/strategien/step/step2025/kurzfassung/lebt-auf.html>.

Stiftung DIE GRÜNE STADT (2010): Stadtklimatologie und Grün. Anregungen zur Anpassung an den Klimawandel. Stiftung DIE GRÜNE STADT. Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://www.die-gruene-stadt.de/stadtklimatologie.pdf>.

Sustainia (2018): Bilbao: From Degraded Peninsula To Carbon-Neutral Island. Global Opportunity Explorer. Online verfügbar unter <https://goexplorer.org/bilbao-from-degraded-peninsula-to-carbon-neutral-island/>.

Thérèse Hliwa, Marie (2015): DER GRÜNFLÄCHENFAKTOR. Eine freiraumplanerische Untersuchung qualitativer Bewertungskriterien und Kenngrößen für ein neues Instrument zur Sicherung wohnblockbezogener Grün- und Freiflächen in der wachsenden Stadt Wien und Beispielen des 2. Gemeindebezirks. Universität für Bodenkultur Wien. Online verfügbar unter <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/nachhaltigkeit/pdf/hliwa-2017.pdf>.

Thüringer Landtag (2018a): Gesetz- und Verordnungsblatt für den Freistaat Thüringen. Zweites Gesetz zur Änderung des Thüringer Gesetzes zur Entwicklung sektorenübergreifender Versorgungsstrukturen Vom 18. Dezember 2018. Thüringer Landtag. Gera. Online verfügbar unter http://www.parldok.thueringen.de/ParlDok/dokument/69487/gesetz_und_verordnungsblatt_nr_14_2018.pdf.

Thüringer Landtag (2018b): Gesetz- und Verordnungsblatt für den Freistaat Thüringen. Zweites Gesetz zur Änderung des Thüringer Gesetzes zur Entwicklung sektorenübergreifender Versorgungsstrukturen. Vom 18. Dezember 2018. Erfurt. Online verfügbar unter http://www.parldok.thueringen.de/ParlDok/dokument/69487/gesetz_und_verordnungsblatt_nr_14_2018.pdf.

Tröltzsch, Jenny; Görlach, Benjamin; Lückge, Helen; Peter, Martin; Sartorius, Christian (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

UMG Umweltbüro Grabher (2008): Versiegelung – Entsiegelung. Böden als Lebensräume erhalten. UMG Umweltbüro Grabher. Online verfügbar unter <http://www.naturtipps.com/entsiegelung.html>

Umweltbundesamt: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2008 und erste Schätzung 2009.

Umweltbundesamt (UBA) (2012): Passive Infrarot Kühlanlage (PINC). Unter Mitarbeit von Lang Hugger Rampp GmbH, Ebert Ingenieure GmbH und Siemens AG. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/passive-infrarot-kuehlanlage-pinc>.

Umweltbundesamt (UBA) (2014): Nachtlüftung unter Nutzung geregelter Fensterlüftung am Max-Planck-Gymnasium Karlsruhe. Umweltbundesamt (UBA). Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/nachtlueftung-unter-nutzung-geregelter>.

Umweltbundesamt (UBA) (2015): Fontus - Zukunftssichere Kälteversorgung der Gebäude der LVR-Zentralverwaltung (ZV) in Köln. Umweltbundesamt (UBA). Köln. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/fontus-zukunftssichere-kaelteversorgung-der>.

Umweltbundesamt (UBA) (2021): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid - Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2020. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-7>

Umweltplanung Bullermann Schneble GmbH (2015): Potenzialermittlung zur Verbesserung des Wohnumfelds und des Stadtklimas durch Entsiegelung und Begrünung von Baukörpern und Freiflächen in der Innenstadt von Mannheim. Abschlussdokumentation Phase II. Umweltplanung Bullermann Schneble GmbH. Mannheim. Online verfügbar unter https://www.mannheim.de/sites/default/files/page/69564/potenzialermittlung_dach-_und_fassadenbegrueung_zur_verbesserung_des_stadtklimas.pdf.

Universitätsstadt Siegen (2016): Gewässerbericht der Universitätsstadt Siegen. Siegen Pulsiert. Siegen. Online verfügbar unter <https://www.siegen.de/fileadmin/cms/pdf/Umwelt/Laermschutz/BroschuereGewaesserbericht2016.pdf>.

Ville de Paris (2021): Paris Pour le climat. Ville de PAris. Paris. Online verfügbar unter <https://www.paris.fr/pages/paris-pour-le-climat-2148/>

Vivre Andromede (2015): 70 hectares d'espaces verts à Andromède. Vivre Andromede. Online verfügbar unter <http://www.ecoquartier-andromede.fr/habiter/70-hectares-espaces-verts-a-andromede>.

Vogelsammer, Bernd (2021): Kühlschrank mit Gefrierfach Test - damit kühlen und gefrieren Sie in einem Gerät - Vergleich der besten Kühlschränke mit Gefrierfach 2021. ExpertenTesten. Online verfügbar unter <https://www.expertentesten.de/haushalt/kuehlschrank-gefrierfach-test/>

Vogt, J.; Böhnke, D.; Norra, S. (2018): Umsetzung der kommunalen Klimaanpassung in die Bauleitplanung im Pilotprojekt der Entwicklung des Geländes der Spinelli Barracks / Grünzug Nordost in Mannheim - KomKlim -. LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. Karlsruhe.

Walther, E.; Goestchel, Q. (2018): The PET comfort index: Questioning the model Building and Environment (ISSN 0360-1323), S. 1–10.

Wang, Lucy (2014): Bosco Verticale: World's First Vertical Forest is Finally Complete in Milan. INHABITAT. Online verfügbar unter <https://inhabitat.com/bosco-verticale-worlds-first-vertical-forest-is-finally-complete-in-milan/>.

Wetterkontor 2021: Monats und Jahreswerte für Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/monatswerte.asp>

Wikimedia Commons (2014): Bahnstadt Heidelberg. Online verfügbar unter https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heidelberg_Bahnstadt_Langer_Anger_2.JPG.

Wikipedia (2020): Haschtgerd New Town. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Haschtgerd_New_Town

Wikipedia (2021): Bosco Verticale. Wikipedia. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Bosco_Verticale

Wikipedia (2021b): Masdar City. Online verfügbar unter https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Clouth-3_und_Clouth-M.JPG

Wilhelm, Xander (2018): Fachbeitrag: Wie Grün- und Wasserflächen städtische Hitzestaus reduzieren. BBU Bundesverband Bürgerinitiativen Umweltschutz. Online verfügbar unter <https://www.recknagel-online.de/nachrichten/bauen-sanieren/445-10009-category30-05-2017-fachbeitrag-wie-effektiv-reduzieren-mehr-gruen-und-wasserflaechen-hitzestaus-in-staedten-wirklich.html>.

Wolter, Henry; Nolte, Burkhard (2018): Die Waldfunktionskarte. Der Esslinger Stadtwald und seiner Funktionen. Stadt Esslingen am Neckar. Online verfügbar unter https://www.esslingen.de/site/Esslingen-Internet-2016/get/params_E256922263/8409798/180418_Stadtwald-S.pdf.

Wortmann & Wember (2009): Solarsiedlung am Medienhafen Düsseldorf. Solarer Wohnungsbau in der Innenstadt. Wortmann & Wember. Bochum. Online verfügbar unter <https://wortmann-wember.de/projekte/solarsiedlung-am-medienhafen-duesseldorf>.

ZORROTZAURRE MANAGEMENT COMMISSION: The Zorrotzaurre Urban Regeneration Project. Online verfügbar unter <http://www.zorrotzaurre.com/en/the-zorrotzaurre-urban-regeneration-project/>.

ZORROTZAURRE MANAGEMENT COMMISSION: ZORROTZAURRE: AN ISLAND FOR LIVING, WORKING AND PLEASURE. Online verfügbar unter <https://www.zorrotzaurre.com/en/>.