

TEXTE

45/2022

Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienz- potenziale in der Glas- und Mineralfaser- industrie

TEXTE 45/2022

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

Forschungskennzahl 3715 53 311 0
FB000425

Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotenziale in der Glas- und Mineralfaserindustrie

von

Esther Platzbecker, Marcel Schwarz, Jan-Martin Rhiemeier
Guidehouse Energy Germany GmbH, Köln

Bernhard Fleischmann
Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V.,
Offenbach am Main

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Guidehouse Energy Germany GmbH
Am Wassermann 36
50829 Köln

Abschlussdatum:

November 2019

Redaktion:

Fachgebiet III 2.2 - Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe,
Mineral- und Metallindustrie
Sandra Leuthold

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2022

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

Kurzbeschreibung

Die deutsche Bundesregierung hat in ihrem Energiekonzept beschlossen, den Primärenergieverbrauch gegenüber 2008 bis zum Jahre 2050 auf 50 % zu reduzieren. Dies erfordert u. a. zwingend eine strukturelle Implementierung geeigneter Energieeffizienzmaßnahmen in allen Sektoren, insbesondere in den (energieintensiven) Industrien.

In diesem Zusammenhang setzt sich das Forschungsvorhaben „Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotenziale in der Glas- und Mineraldaserindustrie“ zum Ziel, unter Berücksichtigung aktueller sowie zukünftig zu erwartender Abwärmerückgewinnungstechnologien das Abwärmenutzungspotenzial für die gesamte Glas- und Mineraldaserindustrie bis zum Jahr 2050 abzuschätzen. Durch die Realisierung dieses Potenzials kann die Effizienz des Energieeinsatzes maßgeblich gesteigert werden. Gleichzeitig sollen mögliche Hemmnisse identifiziert sowie optimale Rahmenbedingungen definiert werden, die für einen breiten Einsatz der Abwärmerückgewinnungstechnologien vorliegen müssen.

Abstract

The German government has decided in its energy plan to reduce the primary energy consumption by 50% by 2050 compared to 2008. This requires, inter alia, a structural implementation of appropriate energy efficiency measures in all sectors, especially in the (energy-intensive) industry.

In this context, the research project "process chain-oriented determination of material and energy efficiency potentials in the glass and mineral wool industry" aims to estimate current and future waste heat recovery potentials for the entire glass and mineral wool industry by the year 2050. Through the realization of this potential, the energy efficiency of energy use can be increased significantly. At the same time, possible barriers are identified, and optimal conditions are defined which must be available for widespread use of waste heat recovery technologies.

Inhaltsverzeichnis

Berichtskennblatt.....	2
Report Cover Sheet	3
Kurzbeschreibung	1
Abstract.....	1
Inhaltsverzeichnis.....	2
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
Zusammenfassung	9
Summary	14
1 Einleitung	19
1.1 Ziel des Vorhabens	19
1.2 Vorgehensweise (Daten, Methodik)	19
2 Beschreibung des Glasherstellungsprozesses.....	21
2.1 Exemplarischer Glasherstellungsprozess	21
2.1.1 Prozess	22
2.1.2 Temperaturniveaus / Viskosität	23
2.2 Glasarten und Produktgruppen, Glaswendungen.....	25
2.3 Relevante technische Rahmenbedingungen.....	26
2.3.1 Stoff- und Energieströme	26
2.3.2 Schmelzaggregat.....	27
2.3.3 Schmelzprozess.....	27
2.3.4 Abgasreinigungsanlage	28
2.3.5 Säuretaupunkt	31
3 Glasindustrie in Deutschland	32
3.1 Datenerfassung und Methodik	32
3.2 Jahrestonnage	33
3.3 Detailstruktur der deutschen Glasindustrie	34
3.4 Energiebedarf.....	36
3.5 Energieeffizienz und Abwärmenutzung – Status Quo	38
3.5.1 Methodik zur Analyse des Status Quo.....	38
3.5.2 Stand der Energieeffizienz in der deutschen Glasindustrie.....	38

3.5.3	Derzeitige Nutzung und Betrachtung von Abwärmepotenzialen in der Industrie	39
3.5.4	Aktuell implementierte Konzepte zur Abwärmenutzung und zukünftige Lösungen	40
3.5.5	Identifizierte Barrieren aus Sicht der Industrie	42
4	Abwärmepotenziale	43
4.1	Grundlagen	43
4.1.1	Bestehende Wärmerückgewinnung mit Regenerator und Rekuperator	43
4.1.2	Definition des Abwärmebegriffs	44
4.2	Methodik zur Analyse von Abwärmepotenzialen	46
4.2.1	Anmerkungen zu Zahlenwerten, Dimensionen und Bezugsgrößen	46
4.2.2	Vorgehensweise	46
4.2.3	Datenermittlung	47
4.3	Abschätzung je Branche	48
4.3.1	Hohlglas	48
4.3.1.1	Schmelzaggregat	49
4.3.1.2	Formgebung und Kühlung	50
4.3.1.3	Abgas aus Verbrennung hinter Schmelzaggregat/Abgasreinigung	51
4.3.1.4	Abwärmepotenzial in der Hohlglasindustrie	51
4.3.2	Flachglas	55
4.3.2.1	Schmelzaggregat	56
4.3.2.2	Formgebung und Kühlung	57
4.3.2.3	Abgas aus Verbrennung/Wanne hinter dem Schmelzaggregat	57
4.3.2.4	Abwärmepotenzial in der Flachglasindustrie	58
4.3.3	Spezialglas	62
4.3.3.1	Schmelzaggregat und Formgebung	62
4.3.3.2	Abgasreinigung	63
4.3.3.3	Abwärmepotenzial in der Spezialglasindustrie	64
4.3.4	Glaswolle/-faser	68
4.3.4.1	Abwärmepotenziale in der Glaswolle/-faserindustrie	69
4.3.5	Steinwolle	70
4.3.6	Vollelektrische Schmelzwannen und Abwärmenutzung	70
4.4	Zusammenfassung des Abwärmepotenzials	70
5	Abwärmetechnologien	74
5.1	Wichtigste Technologien im derzeitigen Einsatz	74
5.1.1	Abhitzeessel	74

5.1.2	Wärmetauscher	76
5.1.3	Wärmeverschiebesysteme	77
5.1.4	Gemengevorwärmung.....	79
5.1.5	ORC-Anlagen.....	81
5.2	Aktueller Stand – Einsatz von Abwärmerückgewinnungstechnologien.....	83
5.3	Zukünftige Entwicklungen.....	83
6	Barrieren	85
6.1	Wirtschaftliche Barrieren	85
6.2	Regulatorische Barrieren.....	86
6.3	Technologische Barrieren.....	86
6.4	Strukturelle Barrieren.....	87
7	Empfehlungen	88
7.1	Status quo der regulatorischen Rahmenbedingungen	88
7.2	Ideale Rahmenbedingungen und der Weg dorthin.....	89
7.2.1	Überwinden wirtschaftlicher Barrieren.....	90
7.2.2	Überwinden regulatorischer Barrieren	91
7.2.3	Überwinden technologischer Barrieren	91
8	Literaturverzeichnis.....	92
A.	Anhang	97
A.1	Methodik zur Bestimmung der Abwärmeströme	97
	Spezifische Wärmekapazität von Abgasen	97
	Spezifische Wärmekapazität von Glas	98
A.2	Methodik zur Bestimmung der Abwärmepotenziale.....	99

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Glasherstellungsprozesses	22
Abbildung 2: Viskositäts-Temperatur-Verlauf einer Glasschmelze am Beispiel von Natron-Kalk-Silicatglas [10]	24
Abbildung 3: Viskositäts-Temperatur-Verhalten bei unterschiedlicher Glaschemie (1: Kieselglas; 2: Erdalkali-Alumino-Silicat; 3: Borosilicatglas 2; 4: Borosilicatglas 2; 5: Kalk-Natron-Silicatglas; 6: Bleiglas; 7: Lotglas)	25
Abbildung 4: Stoffströme im Produktionsprozess der Glasherstellung.....	27
Abbildung 5: Abgasreinigung mittels Elektrofilter [12]	28
Abbildung 6: Elektrofilter [13]	29
Abbildung 7: Gewebefilter [15].....	30
Abbildung 8: Jahresproduktionsmengen der Glasindustrie in Deutschland seit 1997 [19]	33
Abbildung 9: Jahresproduktionsmenge der einzelnen Glasbranchen in den Jahren 2010 – 2017 [19]	34
Abbildung 10: Meilensteine der Technologieentwicklung zur Verminderung des Endenergieverbrauchs [21]	36
Abbildung 11: Geschichtliche Entwicklung des Endenergiebedarfs zur Herstellung von Glasprodukten in Deutschland [19] [22]	37
Abbildung 12: Endenergiebedarf der schmelzenden Glasindustrie für das Jahr 2017 [22]	37
Abbildung 13: Entwicklung des Endenergiebedarfs zur Schmelze und Veredelung von Glas in Deutschland [22]	38
Abbildung 14: Bilanzierung des Endenergiebedarfs einer typischen Glasschmelzwanne [7]	43
Abbildung 15: Abwärmepotenzialbegriffe unter Berücksichtigung von Energie- und Stoffströmen und Wärmerückgewinnungstechnologien.....	45
Abbildung 16: Sankey-Diagramm Hohlglasbranche.....	49
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Abwärmeströme am Schmelzaggregat der Hohlglasindustrie	50
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Abwärmeströme in der Formgebung der Hohlglasindustrie	51
Abbildung 19: Abwärmepotenziale der Hohlglasindustrie	52
Abbildung 20: Heutige und zukünftige Abwärmenutzung in der Hohlglasindustrie	54
Abbildung 21: Sankey-Diagramm in der Flachglasbranche	56
Abbildung 22: Schematische Darstellung der Abwärmeströme am Schmelzaggregat der Flachglasindustrie.....	56
Abbildung 23: Schematische Darstellung der Abwärmeströme in der Formgebung der Flachglasindustrie.....	57
Abbildung 24: Schematische Darstellung der Abwärmeströme in der Abgasreinigung der Flachglasindustrie.....	58

Abbildung 25: Abwärmepotenziale der Flachglasindustrie	58
Abbildung 26: Heutige und zukünftige Abwärmenutzung in der Flachglasindustrie	61
Abbildung 27: Sankey-Diagramm Spezialglas	62
Abbildung 28: Schematische Darstellung der Abwärmeströme am Schmelzaggregat der Spezialglasindustrie.....	63
Abbildung 29: Schematische Darstellung der Abwärmeströme in der Formgebung der Spezialglasindustrie.....	63
Abbildung 30: Schematische Darstellung der Abgasführung in der Spezialglasindustrie	64
Abbildung 31: Abwärmepotenziale in der Spezialglasindustrie	65
Abbildung 32: Heutige und zukünftige Abwärmenutzung in der Spezialglasindustrie	67
Abbildung 33: Sankey-Diagramm in der Glaswolle/-faserbranche.....	69
Abbildung 34: Abwärmepotenzial der deutschen Glasindustrie in MJ pro Tonne verkaufsfähiges Glas.....	71
Abbildung 35: Absolutes Abwärmepotenzial der deutschen Glasindustrie in PJ/a.....	72
Abbildung 36: Nutzbare Abwärme heute und in Zukunft in PJ/a	73
Abbildung 37: Schematische Darstellung eines Abhitzekeessels [32]	74
Abbildung 38: Funktionsprinzip Wärmetauscher (eigene Darstellung).....	76
Abbildung 39: Funktionsprinzip Wärmeverschiebesystem (eigene Darstellung).....	78
Abbildung 40: Funktionsprinzip Gemengevorwärmer (eigene Darstellung)	79
Abbildung 41: Funktionsprinzip ORC-Anlage (eigene Darstellung)	82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispielprozesse zur Branchenbeschreibung und typische Prozessketten.....	21
Tabelle 2: Typische Glasarten für verschiedene Glasanwendungen	26
Tabelle 3: In Deutschland eingesetzte Schmelzaggregate zur Herstellung von Glasprodukten und Steinwolle.....	35
Tabelle 4: Berechneter spezifischer Endenergieverbrauch für verschiedene Glasbranchen (2015)	48
Tabelle 5: Abwärmeströme im Herstellungsprozess von Hohlglas.....	52
Tabelle 6: Abwärmeströme im Herstellungsprozess von Flachglas.....	59
Tabelle 7: Abwärmeströme im Herstellungsprozess von Spezialglas	65
Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung von Glas- und Mineraldasern	68
Tabelle 9: Steckbrief Abhitzekeessel.....	75
Tabelle 10: Steckbrief Wärmetauscher.....	76
Tabelle 11: Steckbrief Wärmeverschiebesystem.....	78
Tabelle 12: Steckbrief Gemengevorwärmung	80
Tabelle 13: Steckbrief ORC-Anlage	82
Tabelle 14: Bereits genutzte Technologien der Wärmerückgewinnung	83
Tabelle 15: Barrieren für eine verstärkte Abwärmenutzung in der Glas- und Mineraldaserindustrie.....	85
Tabelle 16: Auswahl direkter und indirekter Maßnahmen zur Unterstützung der Abwärmevermeidung und -nutzung	88
Tabelle 17: Barrieren bei der Abwärmenutzung und mögliche Lösungsansätze	90
Tabelle 18: Variation der Abgaszusammensetzung und -temperaturen.....	98

Abkürzungsverzeichnis

AR-Glas	Alkali resistentes (Faser-)Glas
BAT	Best Available Techniques
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BS	Borosilicatglas
BV Glas	Bundesverband Glasindustrie e.V.
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
DGG	Deutsche Glastechnische Gesellschaft e.V.
EGB	Electromagnetic Bandgap
EnM	Energiemanagement
EZH	Elektrische Zusatzheizung
FF-Steine	Feuerfeste Steine
GHG	Greenhouse gases
HVG	Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V.
IS-Maschine	Individual-Section-Maschine zur Formgebung von Hohlglas
ISI (Fraunhofer)	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
MJ	Megajoule
ORC	Organic rankine cycle
KNS	Kalk-Natron-Silicatglas
PTFE	Teflon
STEP	STromEffizienzPotentiale
TCR	Thermo-Chemical Regenerator
TEG	Thermoelektrischer Generation
VES (Wanne)	Vollelektrische Schmelzwannen
WZ	Wirtschaftszweige

Zusammenfassung

Um das Ziel der deutschen Bundesregierung zu erreichen, den Primärenergieverbrauch bis zum Jahr 2050 um 50% im Vergleich zu 2008 zu senken, bedarf es deutlicher Effizienzsteigerungen im Endenergieverbrauch [1]. Dies gilt vor allem für die energieintensive Industrie. In der Glasindustrie kann eine solche Effizienzsteigerung u.a. durch die Abwärmerückgewinnung erzielt werden.

Heute wird in der deutschen Glasproduktion insgesamt ca. 60,3 PJ Endenergie pro Jahr zur Schmelze und Formgebung von Glas benötigt. Der wichtigste Energieträger in der deutschen Glasindustrie ist mit einem Anteil von 75% Erdgas gefolgt von Strom (ca. 20%). Die restlichen 5% entfallen auf Mineralöl, sonstige Brennstoffe und Fernwärme. Aufgrund des hohen Energiebedarfs spielt Energieeffizienz und insbesondere die Nutzung von Abwärme in der Glasindustrie seit jeher eine wichtige Rolle. Schon der erste Glasschmelz-Wannenofen in Deutschland vor über 150 Jahren setzte das Prinzip der Wärmerückgewinnung der im Abgas enthaltenen Restwärme zur Vorwärmung der Verbrennungsluft und des Brenngases um. Seit über 150 Jahren ist der Regenerator bei den meisten Glasschmelzwannen integrativer Bestandteil der Schmelzanlage und hilft, die benötigten Verbrennungstemperaturen zu erreichen und Brennstoff einzusparen. Somit müssen nur etwa 60 bis 65 % der benötigten Schmelzenergie durch Brennstoffe aufgebracht werden. Der restliche Anteil der eingebrachten Energie stammt aus dem wiedergewonnenen Wärmeinhalt des Abgases.

Das Forschungsvorhaben „Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotenziale in der Glas- und Mineralfaserindustrie“ setzt sich zum Ziel, unter Berücksichtigung aktueller sowie zukünftig zu erwartender Abwärmerückgewinnungstechnologien, das Abwärmenutzungspotenzial für die gesamte Glas- und Mineralfaserindustrie bis zum Jahr 2050 zu ermitteln. Es werden mögliche Hemmnisse identifiziert sowie optimale Rahmenbedingungen definiert, die für einen breiten Einsatz der Abwärmerückgewinnungstechnologien vorliegen müssen. Mithilfe der Abwärmerückgewinnungstechnologien kann das identifizierte Potenzial größtenteils realisiert und somit die Energieeffizienz des Energieeinsatzes maßgeblich gesteigert werden.

Auf dem Weg dahin, müssen zunächst die Zusammenhänge zwischen Energieeinsätzen, Temperaturniveaus und Abwärmemengen der verschiedenen Fertigungsprozessschritte erarbeitet und analysiert werden. Dazu werden sowohl die spezifischen Energieverbräuche, die prozess- und branchenspezifischen Temperaturniveaus der Arbeitsmedien (z. B. Verbrennungsluft, Brennstoffe, Abgase, Fertig- und Halbfertigerzeugnisse) sowie deren spezifischen Massenströme ermittelt. Die Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Prozess- und Wärmemengen und Temperaturen sowie zwischen Temperaturen und Abwärmemengen sind dabei auch auf andere energieintensive Industrien übertragbar.

In einem ersten Schritt des Forschungsvorhabens wird die deutsche Glasindustrie in Bezug auf ihre Struktur in Branchen, die wesentlichen Prozessschritte, sowie die technischen Rahmenbedingungen vorgestellt (Kapitel 2 & 3). Als Grundlage für die technologische Beschreibung der Prozessketten dienen vor allem Mess- und Forschungsberichte der HVG. Für jede Branche werden die eingesetzten Wannentypen, die verwendeten Energieträger, die Jahrestonnage sowie der Energieverbrauch beschrieben. Auf Prozessebene werden anschließend für jede Branche die Abwärmeströme auf Basis der Temperaturniveaus und Massenströme ermittelt (Kapitel 4). Für die Berechnung der Abwärmeströme werden zum einen die Temperaturniveaus an den Prozessschrittübergängen, der Massenstrom, die spezifische Wärmekapazität sowie der Energieinput im Gesamtprozess benötigt. Für die Ermittlung der Temperaturniveaus und des Massenstroms wird auf langjährigen Messungen der HVG und der Betriebe selbst zurückgegriffen. Die Berechnung der spezifischen Wärmekapazitäten basiert auf wissenschaftlichen Methoden, wohingegen der Energieinput für jede Branche jährlich vom Statistischen Bundesamt und die Tonnagen an verkaufsfähigem Glas von der BV Glas veröffentlicht werden.

Die so ermittelten Abwärmeströme werden in einem zweiten Schritt auf ihre Nutzbarkeit untersucht. Die Studie unterscheidet bei der Erhebung des Abwärmepotenzials zwischen gefassten und diffusen

Abwärmeströmen. Gefasste Abwärmeströme sind an einen Medienstrom gebunden. Dies können Kühlflüssigkeit, Abluft- oder Abgasströme oder auch ein im Produkt gefasster Wärmestrom sein. Diffuse Abwärmeströme entstehen hingegen großflächig und vorwiegend durch Strahlung. Um die enthaltene Wärme zu nutzen, müssen sie zunächst gefasst werden, zumindest aus heutiger technologischer Sicht. Zudem wird das Abwärmepotenzial in die drei folgenden Kategorien unterteilt: das theoretische Potenzial, das technische Potenzial und die technische Perspektive. Das *theoretische Abwärmepotenzial* umfasst sämtliche Wärmeinhalte und Wärmeabgaben im Herstellungsprozess. Das *technische Potenzial*, als Teilmenge des theoretischen, bezeichnet die mit heutigen Technologien nutzbare und bereits genutzte Abwärme. Die *technische Perspektive* beschreibt alle Abwärmeströme, die bereits im technischen Potenzial enthalten sind, sowie solche Abwärmeströme, die in Zukunft mithilfe neuer Technologien nutzbar sein werden.

Nach heutigem technologischem Stand können ausschließlich gefasste Wärmeströme industriell genutzt werden, nicht aber diffuse Abwärme, die beispielsweise bei der Abkühlung des Glases nach außen strömt. Die Bewertung der Nutzbarkeit dient der Zuordnung der Abwärmeströme zu den verschiedenen Abwärmepotenzialen. In der technischen Perspektive ist davon auszugehen, dass zusätzliche Technologien neu oder weiterentwickelt sind, die diffuse Abwärme fassen können und somit nutzbar machen. Die Abwärmepotenzialanalyse berücksichtigt zudem die heute bereits genutzte Abwärme und die dazu eingesetzten Technologien. Die noch nutzbare Abwärmemenge wird schließlich in Berücksichtigung von Umwandlungseffizienzen ausgewiesen.

In einem dritten Schritt werden die derzeit verfügbaren sowie zukünftigen Technologien zur Abwärmerückgewinnung und -nutzung anhand einer umfassenden Literaturrecherche ermittelt und dargestellt (Kapitel 5). Die Literaturrecherche beinhaltet u. a. aktuelle Forschungsberichte über die Technologieentwicklung in der Glasindustrie, Berichte aktueller Fachmessen sowie hausinterne Berichte der HVG. Für jede identifizierte Technologie wird in Form eines Steckbriefes der Zweck, der Einsatzort, das zugeordnete Temperaturband, der Verbreitungsgrad, die technischen Vor- und Nachteile, sowie die Kosten und Perspektiven dargestellt. Als Basis für die Steckbriefe werden die Technologien hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten in den einzelnen Fertigungsschritten und Branchen bewertet und mit den speziellen Anforderungen und unterschiedlichen technologischen Erfordernissen der einzelnen Branchen verglichen. Im Anschluss daran werden die technischen sowie regulatorischen Randbedingungen und Grenzen für die Technologien zur Abwärmerückgewinnung durch Fachgespräche und Interviews mit Energiemanagern und Anlagenbetreibern validiert (Kapitel 6).

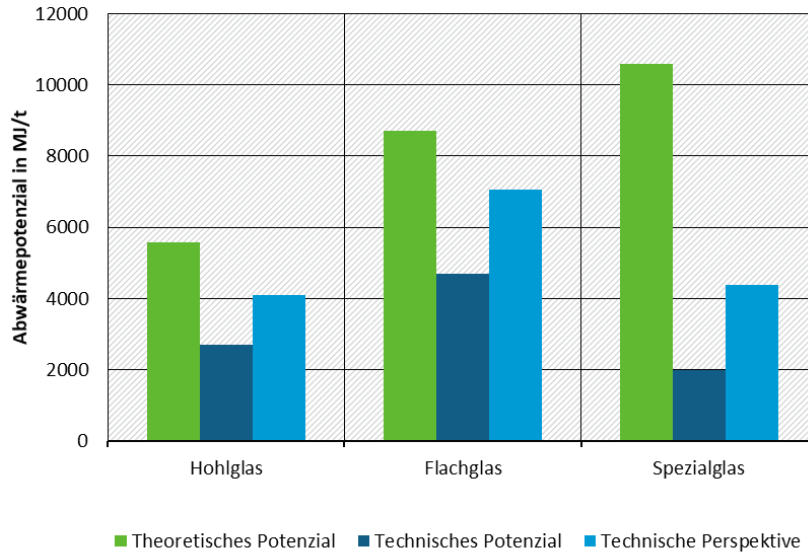
In einem letzten Schritt werden auf Basis des Status quo der regulatorischen Rahmenbedingungen im Bereich Abwärmenutzung die bestehenden direkten und indirekten Maßnahmen zusammengefasst und näher beleuchtet (Kapitel 7). Dabei werden mögliche Ansätze diskutiert, die den Barrieren entgegenwirken und so die vollständige Hebung der ermittelten Abwärmenutzungspotenziale ermöglichen können.

Die Ergebnisse der Abwärmepotenzialanalyse zeigen, dass perspektivisch insgesamt 32,5PJ/a und damit etwa die Hälfte des heutigen Energiebedarfs durch Abwärmenutzungstechnologien wiederverwertet werden können. Die hebbaren Abwärmepotenziale in der deutschen Glasindustrie unterscheiden sich sowohl über Branchen hinweg als auch in der Betrachtung auf Basis von relativen und absoluten Abwärmepotenzialen. Ein direkter Vergleich über Branchen hinweg ist jedoch aufgrund verschiedener Qualitätsanforderungen und dem damit verbundenen Energiebedarf nicht möglich.

Wie die folgenden Abbildung der Abwärmepotenziale pro Tonne verkaufsfähiges Glas zeigt, könnte in der Hohlglasindustrie mit heute bereits verfügbaren Technologien knapp die Hälfte des theoretischen Potenzials gehoben werden, in der technischen Perspektive sogar rund 74 %. In der Flachglasindustrie ist das Verhältnis der hebbaren Potenziale in Bezug auf das theoretische Potenzial ähnlich. Während heute bereits etwa 54 % des theoretischen Potenzials gehoben werden könnten, könnten zukünftige Technologien rund 81 % des theoretischen Potenzials heben. In der Spezialglasindustrie kann anteilig

deutlich weniger Abwärme zurückgewonnen und genutzt werden, mit heute verfügbaren Technologien etwa 19 % und perspektivisch ca. 41 % des theoretischen Potenzials.

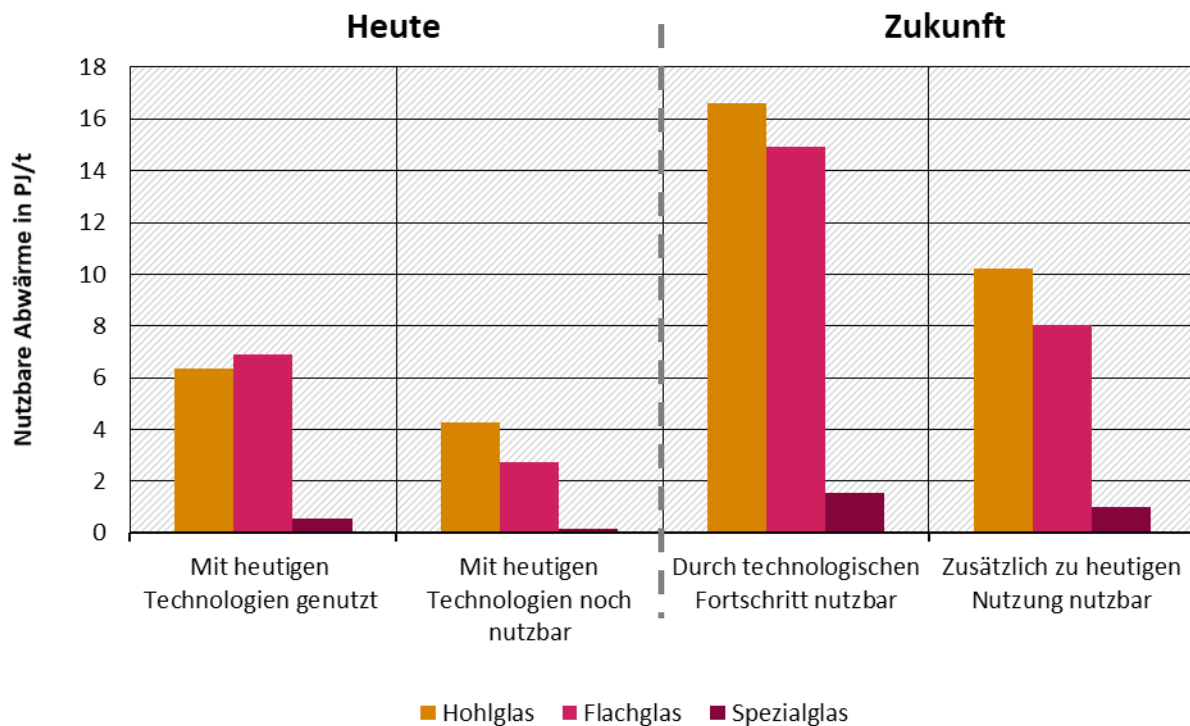
Abwärmepotenzial der deutschen Glasindustrie in MJ pro Tonne verkaufsfähiges Glas (siehe auch S. 71)



Berücksichtigt man die Jahrestonnagen der einzelnen Branchen, ergeben sich die größten hebbaren Potenziale, sowohl mit heutigen als auch zukünftigen Technologien sind, in der Hohlglas- (16,6 PJ) und der Flachglasindustrie (14,9 PJ). Die Hohlglasindustrie ist dabei mit einer Jahrestonnage von rund 4 Mio. Tonnen (2017) die mit Abstand größte Branche. Dementsprechend fallen auch die Potenziale größer aus. Die absoluten Abwärmepotenziale der Spezialglasindustrie sind deutlich geringer. Dies liegt vor allem an der geringen Jahrestonnage von weniger als 400.000 Tonnen (2017), aber auch an einem hohen Anteil an nicht nutzbaren diffusen Abwärmeströmen.

Die folgende Abbildung stellt die mit heutigen Abwärmetechnologien bereits genutzte und noch nutzbare Abwärme dar. Ferner bildet die Grafik die zukünftige technische Perspektive ab. Diese beinhaltet die Abwärmemenge je Branche, die durch technologischen Fortschritt insgesamt nutzbar sein wird und setzt diese in Beziehung zur heutigen Nutzung.

Nutzbare Abwärme heute und in Zukunft in PJ/a (siehe auch S. 72)



Aus heutiger Sicht nutzen die Hohlglas- und die Flachglasindustrie ähnlich große absolute Abwärmemengen. Im Gegensatz dazu wird in der Spezialglasindustrie bislang kaum Abwärme zurückgeführt und genutzt. In allen drei Branchen könnte mit heutigen Technologien zusätzlich Abwärme genutzt werden. Das größte noch heute hebbare Potenzial kann dabei in der Hohlglasindustrie mit knapp 4,3 PJ gehoben werden. Das durch technologischen Fortschritt nutzbare Abwärmepotenzial entspricht der Abwärme aus der technischen Perspektive und ist, wie zuvor beschrieben, für die Hohlglas- und Flachglasindustrie absolut gesehen deutlich größer als für die Spezialglasindustrie. Vergleicht man die nutzbare Abwärmemenge in der technischen Perspektive mit der heutigen realen Nutzung, ist der größte Unterschied für die Hohlglasindustrie und die Flachglasindustrie zu erkennen. So können in der Hohlglasindustrie rund 10,2 PJ zusätzlich zu der heutigen Nutzung genutzt werden und in der Flachglasindustrie knapp 8,1 PJ. In der Spezialglasindustrie kann hingegen nur knapp 1,0 PJ in der Zukunft zusätzlich zur heutigen Nutzung genutzt werden. Betrachtet man durchschnittliche Umwandlungseffizienzen, wird deutlich, dass nur etwa 30 % der Abwärmemenge nutzbar gemacht werden kann. Das sind in Zukunft zusätzlich etwa 3,1 PJ der Abwärme in der Hohlglasindustrie, 2,4 PJ in der Flachglasindustrie und etwa 0,3 PJ in der Spezialglasindustrie.

Die wichtigsten heute genutzten Abwärmetechnologien in der deutschen Glasindustrie erzeugen entweder thermische Energie oder elektrische Energie. Sie umfassen Abhitzeessel, Wärmetauscher, Wärmeverschiebesysteme, Gemenge- bzw. Scherbenvorwärmer und Organic Rankine Cycle (ORC) Motoren. Zukünftig sollte zum einen eine weitere Verbreitung heutiger Technologien in der Industrie angestrebt werden. Ferner können neue Verfahren wie etwa das OPTIMELT™ Verfahren zu einer verstärkten Abwärmennutzung beitragen. Das OPTIMELT™ Verfahren nutzt ähnliche Regeneratoren, die herkömmlich an einer regenerativen Wanne zum Einsatz kommen. Die verwendete Wärmerückgewinnungstechnologie OPTIMELT™ Thermo-Chemical Regenerator (TCR) wandelt ein Gemisch aus Erdgas und dem rückgeführten Rauchgas mithilfe der gespeicherten Abwärme in ein heißes Synthesegas um, welches wieder zur Erzeugung von Energie verwendet werden kann.

Einem verstärkter Nutzung der bestehenden Abwärmepotenzialen stehen unterschiedliche Barrieren gegenüber, die sich in folgende Kategorien unterteilen lassen: wirtschaftlich, regulatorisch, technisch und strukturell. Bereits heute gibt es eine Reihe von regulatorischen Maßnahmen, die zum Abbau der Barrieren beitragen. Die zentrale Maßnahme für die Implementierung von Abwärmenutzung ist etwa das Förderprogramm „Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft“, in das u. a. die frühere separate Förderung der Abwärmerichtlinie integriert wurde. Das vorliegende Forschungsvorhaben analysiert den bestehenden regulatorischen Rahmen und bietet Handlungsempfehlungen zur Überwindung von wirtschaftlichen, regulatorischer und technologischer Barrieren.

Die folgende Tabelle fasst die aus Expertengesprächen und Interviews identifizierten Barrieren sowie mögliche Lösungsansätze zusammen.

Barrieren bei der Abwärmenutzung und mögliche Lösungsansätze

Kategorie	Barrieren	Lösungsansätze
Wirtschaftlich	Hohe Amortisationszeiten der Abwärmenutzungstechnologien	Information und Beratung der Unternehmen Nutzung bestehender Förderprogramme Kostensenkung durch Weiterentwicklung & Etablierung der Technologien CO ₂ -Bepreisung oder andere verpflichtende Maßnahmen
Regulatorisch	Fehlende (Förder-)Anreize (Aussage mehrerer Interviewpartner)	Information und Beratung der Unternehmen zu bestehenden Förderprogrammen und Vorteilen der Abwärmenutzung
	Belastung von Abwärmeverstromung durch EEG-Umlage und Steuern	EEG-Umlagenbefreiung beim Eigenverbrauch von Strom aus sekundären Stromerzeugungsanlagen
	Lärmschutzbestimmungen (Einzelfall)	Weiterentwicklung der Technologie
Technisch	Komplexität der technischen Umsetzung (es muss der ganze Prozess betrachtet werden)	Beratung und Betreuung durch externe Experten, bspw. Energieberater Fort- und Weiterbildung des Personals Modulare Umsetzung, soweit möglich
	Nachträgliche Anpassungen des Abwärmenutzungskonzepts sind nur bedingt möglich	Modulare Umsetzung, soweit möglich
	Mangel an Technologien zur Nutzung von diffuser Abwärme	Entwicklung und Erprobung von geeigneten Technologien im Rahmen von geförderten Forschungsprojekten
	Unzulängliche Technologiereife, bspw. bei ORC-Anlagen	Weiterentwicklung der Technologie unterstützt durch Forschungsförderung
Strukturell	Limitierte Abnahmepotenziale	Ausweitung von Wärmenetzen Abwärmeverstromung

Summary

To achieve the German government's goal of reducing primary energy consumption by 50% by 2050 compared to 2008, significant efficiency improvements in final energy consumption are required [1]. This applies above all to the energy-intensive industry. In the glass industry, such an increase in efficiency can be achieved, among other things, through waste heat recovery.

Today, a total of approx. 60.3 PJ final energy per year is required in German glass production for melting and shaping glass. The most important source of energy in the German glass industry is natural gas with a share of 75% followed by electricity (approx. 20%). Mineral oil, other fuels and district heating account for the remaining 5%. Due to the high energy demand, energy efficiency and especially the use of waste heat has always played an important role in the glass industry. Even the first glass melting furnace in Germany more than 150 years ago implemented the principle of heat recovery of the residual heat contained in the exhaust gas to preheat the combustion air and the fuel gas. For more than 150 years, the regenerator has been an integral part of the melting plant in most glass melting tanks and helps to achieve the required combustion temperatures and save fuel. Thus, only about 60 to 65 % of the required melting energy must be provided by fuel. The remaining part of the energy input comes from the heat content of the exhaust gas.

The research project "Process chain-oriented determination of material and energy efficiency potentials in the glass and mineral fibre industry" aims at determining the waste heat recovery potential for the entire glass and mineral fibre industry until the year 2050, taking into account current and future waste heat recovery technologies. Potential obstacles are identified, and optimal basic conditions are defined, which must be available for a broad application of waste heat recovery technologies. With the help of the waste heat recovery technologies the identified potential can be realized to a large extent and thus the energy efficiency of the energy input can be increased significantly.

On the way to this goal, the interrelations between energy input, temperature levels and waste heat quantities of the different production process steps have to be worked out and analysed. For this purpose, the specific energy consumption, the process- and industry-specific temperature levels of the working media (e.g. combustion air, fuels, waste gases, finished and semi-finished products) as well as their specific mass flows are determined. The findings on the relationships between process and heat quantities and temperatures as well as between temperatures and waste heat quantities are also transferable to other energy-intensive industries.

In a first step of the research project, the German glass industry will be introduced with regard to its structure in branches, the essential process steps, as well as the technical framework conditions (Chapters 2 & 3). The basis for the technological description of the process chains are mainly measurement and research reports of the HVG. For each industry, the types of furnace and energy sources used, the annual tonnage and the energy consumption are described. At the process level, the waste heat flows are then determined for each industry on the basis of the temperature level and mass flows (Chapter 4). For the calculation of the waste heat flows, the temperature levels at the process step transitions, the mass flow, the specific heat capacity and the energy input in the overall process are required. The temperature levels and mass flow are determined on the basis of long-term measurements by the HVG and the companies themselves. The calculation of the specific heat capacities is based on scientific methods, whereas the energy input for each industry is published annually by the Federal Statistical Office of Germany and the tonnages of saleable glass by BV Glas.

In a second step, the waste heat flows determined in this way are examined for their usability. The study distinguishes between captured and diffuse waste heat flows in the survey of the waste heat potential. Captured waste heat flows are bound to a media flow. These can be coolant, exhaust air or waste gas flows or a heat flow contained in the product. Diffuse waste heat flows, on the other hand, are generated over a large area and mainly by radiation. In order to use the contained heat, they must

first be captured, at least from today's technological point of view. In addition, the waste heat potential is divided into the following three categories: theoretical potential, technical potential and technical perspective. The theoretical waste heat potential includes all heat contents and heat emissions in the production process. The technical potential, as a subset of the theoretical potential, refers to the waste heat that can be used and is already being used with current technologies. The technical perspective describes all waste heat flows that are already contained in the technical potential as well as those waste heat flows that will be usable in the future with new technologies.

According to the current state of technology, only captured heat flows can be used industrially, but not diffuse waste heat, which for example flows outwards when the glass cools down. The evaluation of the usability serves to assign the waste heat flows to the different waste heat potentials. From a technical perspective, it can be assumed that additional technologies are new or further developed that can capture diffuse waste heat and thus make it usable. The waste heat potential analysis also considers the waste heat already used today and the technologies used for this. Finally, the amount of waste heat still usable is shown in consideration of conversion efficiencies.

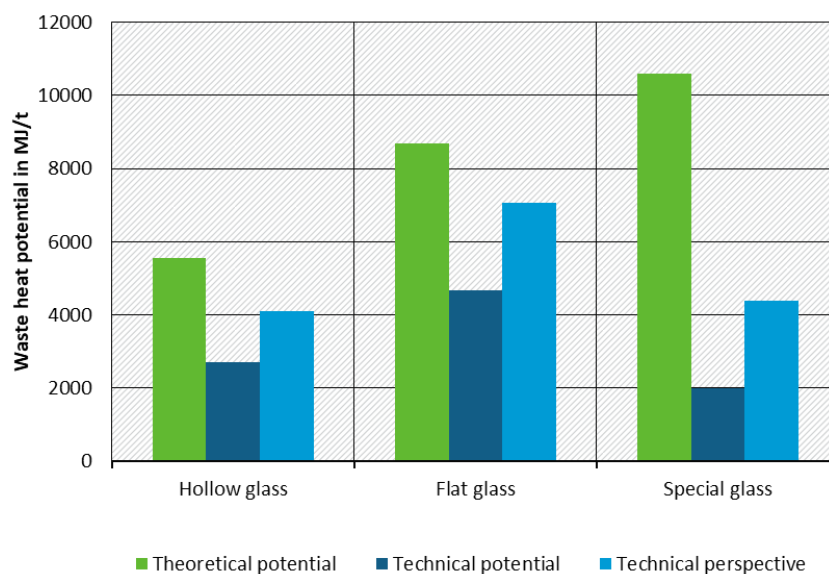
In a third step, the currently available and future technologies for waste heat recovery and utilization are determined and presented on the basis of a comprehensive literature search (Chapter 5). The literature research includes, among other things, current research reports on the development of technology in the glass industry, reports on current trade fairs and in-house reports from the HVG. For each identified technology, the purpose, the place of use, the assigned temperature range, the degree of diffusion, the technical advantages and disadvantages, as well as the costs and perspectives are presented in the form of a profile. As a basis for the fact sheets, the technologies are evaluated with regard to their possible applications in the individual production steps and industries and compared with the special requirements and different technological needs of the individual industries. Subsequently, the technical as well as regulatory constraints and limits for the technologies for waste heat recovery are validated by expert discussions and interviews with energy managers and plant operators (Chapter 6).

In a final step, based on the status quo of the regulatory framework in the field of waste heat recovery, the existing direct and indirect measures are summarized and examined in more detail (Chapter 7). Possible approaches are discussed which can counteract the barriers and thus make it possible to fully exploit the identified waste heat utilization potentials.

The results of the waste heat potential analysis show that in the long term a total of 32.5PJ/a and thus about half of today's energy demand can be recycled by waste heat recovery technologies. The recoverable waste heat potentials in the German glass industry differ both across sectors and in the consideration based on relative and absolute waste heat potentials. However, a direct comparison across sectors is not possible due to different quality requirements and the associated energy demand.

As the following illustration of waste heat potentials per ton of saleable glass shows, almost half of the theoretical potential could be raised in the hollow glass industry with technologies already available today, in the technical perspective even around 74 %. In the flat glass industry, the ratio of leveraging potential to theoretical potential is similar. While today about 54 % of the theoretical potential could already be exploited, future technologies could exploit about 81 % of the theoretical potential. In the special glass industry, proportionately much less waste heat can be recovered and used, with currently available technologies about 19 % and perspectively about 41 % of the theoretical potential.

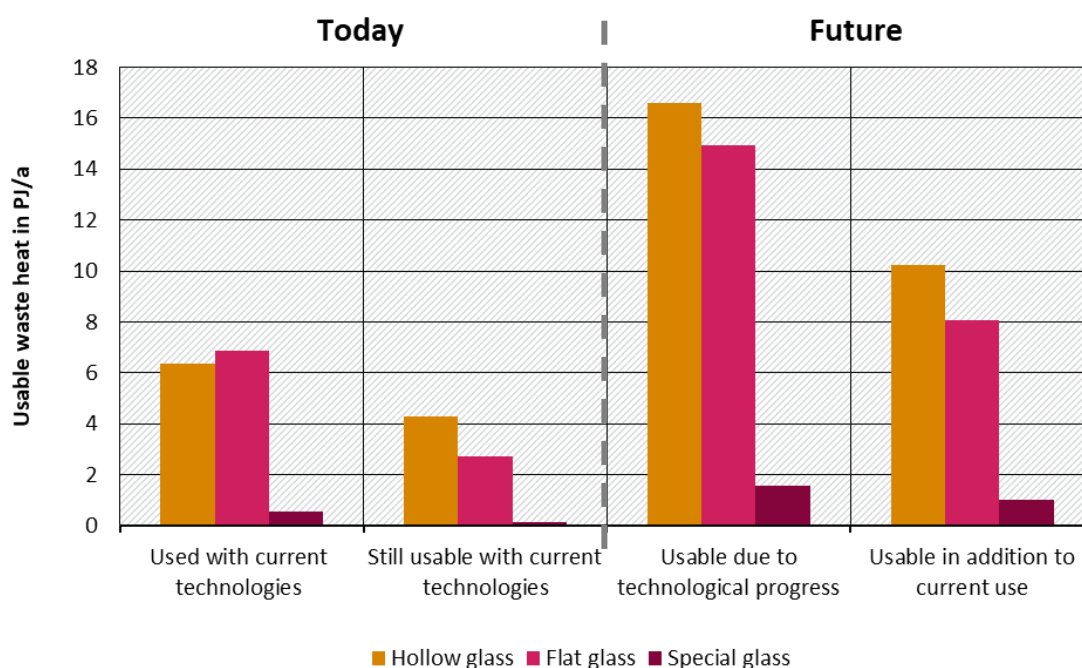
Waste heat potential of the German glass industry in MJ per ton of saleable glass (see page 71)



If the annual tonnages of the individual sectors are taken into account, the greatest exploitable potential, both with current and future technologies, is found in the hollow glass (16.6 PJ) and flat glass (14.9 PJ) industries. With an annual tonnage of around 4 million tons (2017), the hollow glass industry is by far the largest sector. The potential is correspondingly greater. The absolute waste heat potential of the special glass industry is significantly lower. This is mainly due to the low annual tonnage of less than 400,000 tons (2017), but also to a high proportion of unusable diffuse waste heat flows.

The following figure shows the waste heat already used and still usable with today's waste heat technologies. Furthermore, the figure illustrates the future technical perspective. This includes the amount of waste heat per sector that will be usable overall as a result of technological progress and relates this to its current use.

Usable waste heat today and in the future in PJ/a (see page 72)



From today's perspective, the hollow glass and flat glass industries use similarly large absolute quantities of waste heat. In contrast, hardly any waste heat has been recovered and used in the special glass industry so far. In all three sectors, additional waste heat could be used with current technologies. The greatest potential that can still be exploited today can be found in the hollow glass industry with just under 4.3 PJ. The waste heat potential that can be utilized through technological progress corresponds to the waste heat from a technical perspective and, as described above, is significantly greater in absolute terms for the hollow and flat glass industry than for the special glass industry. If one compares the usable waste heat quantity in the technical perspective with the current real use, the biggest difference for the hollow glass industry and the flat glass industry can be seen. In the hollow glass industry, for example, around 10.2 PJ can be used in addition to today's use and in the flat glass industry just under 8.1 PJ. In the special glass industry, on the other hand, only just under 1.0 PJ can be used in the future in addition to today's use. Looking at average conversion efficiencies, only about 30 % of the waste heat can be utilized. In the future, this will be an additional 3.1 PJ of waste heat in the hollow glass industry, 2.4 PJ in the flat glass industry and about 0.3 PJ in the special glass industry.

The most important waste heat technologies used today in the German glass industry generate either thermal energy or electrical energy. They include waste heat boilers, heat exchangers, heat transfer systems, batch or cullet preheaters and Organic Rankine Cycle (ORC) engines. In the future, a further spread of current technologies in the industry should be aimed at. Furthermore, new processes such as the OPTIMELT™ process can contribute to an increased waste heat utilization. The OPTIMELT™ process uses similar regenerators that are conventionally applied to a regenerative tank. The OPTIMELT™ Thermo-Chemical Regenerator (TCR) heat recovery technology converts a mixture of natural gas and the recycled flue gas using the stored waste heat into a hot synthesis gas, which can be re-used to generate energy.

Increased use of existing waste heat potentials is faced with various barriers that can be divided into the following categories: economic, regulatory, technical and structural. There are already a number of regulatory measures in place today that contribute to reducing the barriers. The central measure for the implementation of waste heat utilization is, for example, the support program "Energy Efficiency and Process Heat from Renewable Energies in the Economy", into which, among other things, the former separate support of the Waste Heat Directive was integrated. The present research project analyses the existing regulatory framework and offers recommendations for action to overcome economic, regulatory and technological barriers.

The following table summarizes the barriers identified from expert discussions and interviews as well as as possible approaches to solutions.

Barriers in waste heat recovery and possible solutions

Category	Barriers	Possible solutions
Economic	High payback periods for waste heat recovery technologies	Information and advice to companies Use of existing support programs Cost reduction through further development & establishment of the technologies CO ₂ pricing or other mandatory measures
Regulatory	Lack of (funding) incentives (Statement of several interview partners)	Information and advice for companies on existing subsidy programs and advantages of waste heat utilization
	Burden on waste heat generation through "EEG" levy and taxes	"EEG" levy exemption for own consumption of electricity from secondary power generation plants

Category	Barriers	Possible solutions
Technical	Noise regulations (Individual case)	Further development of the technology
	Complexity of the technical implementation (the whole process must be considered)	Consulting and support by external experts, e.g. energy consultants Further training and education of staff Modular implementation, as far as possible
	Subsequent adjustments of the waste heat utilization concept are only possible to a limited extent	Modular implementation, as far as possible
	Lack of technologies for using diffuse waste heat	Development and testing of suitable technologies within the framework of funded research projects
Structural	Insufficient technological maturity, e.g. for ORC systems	Further development of the technology supported by research funding
	Limited waste heat potentials	Expansion of heating networks Waste heat generation

1 Einleitung

Um irreversible Schäden an unserem Klimasystem zu verhindern, muss die durchschnittliche globale Temperaturerhöhung, im Vergleich zum Niveau vor Beginn der Industrialisierung, auf 1,5 °C limitiert werden. Auf diese Marke haben sich auch die mehr als 190 Mitgliedsstaaten der UN auf der Klimakonferenz in Paris im Jahr 2015 geeinigt.

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen insbesondere die führenden Industriestaaten, aber auch die Schwellen- und Entwicklungsländer, ihre Treibhausgasemissionen in den kommenden Jahren deutlich reduzieren. Neben der Umstellung auf CO₂-neutrale Energieträger kommt der signifikanten Reduzierung des Primärenergiebedarfs dabei große Bedeutung zu. Diese Reduzierung kann unter anderem durch eine Effizienzsteigerung im Endenergieverbrauch erreicht werden. Dabei spielen insbesondere große Energieverbraucher wie z. B. Produktionsanlagen in der energieintensiven Industrie eine tragende Rolle. Im Jahr 2016 emittierte der deutsche Industriesektor rund 188 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente [2]. Dies entspricht knapp 21 % der Gesamtemissionen. Damit ist der Sektor die zweitgrößte Emissionsquelle Deutschlands [3].

Vor diesem Hintergrund hat die deutsche Bundesregierung in ihrem Energiekonzept 2010 beschlossen, den Primärenergieverbrauch gegenüber 2008 bis zum Jahre 2050 auf 50 % zu reduzieren [1]. Dies erfordert u. a. eine strukturelle Implementierung geeigneter Energieeffizienzmaßnahmen in allen Sektoren.

1.1 Ziel des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben „Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotenziale in der Glas- und Mineralfaserindustrie“ setzt sich zum Ziel, unter Berücksichtigung aktueller sowie zukünftig zu erwartender Abwärmerückgewinnungstechnologien, das Abwärmenutzungspotenzial für die gesamte Glas- und Mineralfaserindustrie bis zum Jahr 2050 zu ermitteln. Es werden mögliche Hemmnisse identifiziert sowie optimale Rahmenbedingungen definiert, die für einen breiten Einsatz der Abwärmerückgewinnungstechnologien vorliegen müssen. Mithilfe der Abwärmerückgewinnungstechnologien kann das identifizierte Potenzial größtenteils realisiert und somit die Energieeffizienz des Energieeinsatzes maßgeblich gesteigert werden.

Auf dem Weg dahin, müssen zunächst die Zusammenhänge zwischen Energieeinsätzen, Temperaturniveaus und Abwärmemengen der verschiedenen Fertigungsprozessschritte erarbeitet und analysiert werden. Dazu werden sowohl die spezifischen Energieverbräuche, die prozess- und branchenspezifischen Temperaturniveaus der Arbeitsmedien (z. B. Verbrennungsluft, Brennstoffe, Abgase, Fertig- und Halbfertigerzeugnisse) sowie deren spezifischen Massenströme ermittelt. Die Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Prozess- und Wärmemengen und Temperaturen sowie zwischen Temperaturen und Abwärmemengen sind dabei auch auf andere energieintensive Industrien übertragbar. Denn kennt man den Zusammenhang, können frühzeitig die notwendigen Abwärmetechnologien und geeignete politische Maßnahmen identifiziert und entwickelt werden.

1.2 Vorgehensweise (Daten, Methodik)

In einem ersten Schritt wird die deutsche Glasindustrie in Bezug auf ihre Struktur in Branchen, die wesentlichen Prozessschritte, sowie die technischen Rahmenbedingungen vorgestellt. Als Grundlage für die technologische Beschreibung der Prozessketten dienen vor allem Mess- und Forschungsberichte der HVG. Für jede Branche werden die eingesetzten Wannentypen, die verwendeten Energieträger, die Jahrestonnage sowie der Energieverbrauch beschrieben. Auf Prozessebene werden anschließend für jede Branche die Abwärmeströme auf Basis der Temperaturniveaus und Massenströme ermittelt. Für die Berechnung der Abwärmeströme werden zum einen die Temperaturniveaus an den Prozessschritzübergängen, der Massenstrom, die spezifische Wärmekapazität sowie der Energieinput im Gesamtprozess benötigt. Für die Ermittlung der Temperaturniveaus und des Massenstroms wird auf

langjährigen Messungen der HVG und der Betriebe selbst zurückgegriffen. Die Berechnung der spezifischen Wärmekapazitäten basiert auf wissenschaftlichen Methoden, wohingegen der Energieinput für jede Branche jährlich von DESTATIS und die Tonnagen an verkaufsfähigem Glas von der BV Glas bekannt gegeben werden.

Die so ermittelten Abwärmeströme werden in einem zweiten Schritt auf ihre Nutzbarkeit untersucht. Nach heutigem technologischem Stand können ausschließlich gefasste Wärmeströme industriell genutzt werden, nicht aber diffuse Abwärme, die beispielsweise bei der Abkühlung des Glases nach außen strömt. Die Bewertung der Nutzbarkeit dient der Zuordnung der Abwärmeströme zu den verschiedenen Abwärmepotenzialen. Während das theoretische Potenzial sämtliche eingesetzte Energieeinsätze im Herstellungsprozess beschreibt, umfasst das technische Potenzial Abwärmeströme, die mit den heute verfügbaren Technologien nutzbar sind. In der technischen Perspektive ist davon auszugehen, dass zusätzliche Technologien neu oder weiterentwickelt sind, die diffuse Abwärme fassen können und somit nutzbar machen. Im Rahmen der Abwärmepotenzialanalyse wird zudem berücksichtigt, wieviel Abwärme heute bereits in deutschen Anlagen genutzt wird und welche Technologien dazu eingesetzt werden. Die noch nutzbare Abwärmemenge wird schließlich in Berücksichtigung von Umwandlungseffizienzen ausgewiesen.

In einem dritten Schritt werden die derzeit verfügbaren sowie zukünftigen Technologien zur Abwärmerückgewinnung und -nutzung anhand einer umfassenden Literaturrecherche ermittelt und dargestellt. Die Literaturrecherche beinhaltet u. a. aktuelle Forschungsberichte über die Technologieentwicklung in der Glasindustrie, Berichte aktueller Fachmessen sowie hausinterne Berichte der HVG. Für jede identifizierte Technologie wird in Form eines Steckbriefes der Zweck, der Einsatzort, das zugeordnete Temperaturband, der Verbreitungsgrad über die Branchen hinweg, die technischen Vor- und Nachteile, sowie die Kosten und Perspektiven dargestellt. Als Basis für die Steckbriefe werden die Technologien hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten in den einzelnen Fertigungsschritten und Branchen bewertet und mit den speziellen Anforderungen und unterschiedlichen technologischen Erfordernissen der einzelnen Branchen verglichen. Im Anschluss daran werden die technischen sowie regulatorischen Randbedingungen und Grenzen für die Technologien zur Abwärmerückgewinnung durch Fachgespräche und Interviews mit Energiemanagern und Anlagenbetreibern validiert.

In einem letzten Schritt werden auf Basis des Status quo der regulatorischen Rahmenbedingungen im Bereich Abwärmenutzung die bestehenden direkten und indirekten Maßnahmen zusammengefasst und näher beleuchtet. Dabei werden mögliche Ansätze diskutiert, die den Barrieren entgegenwirken und so die vollständige Hebung der ermittelten Abwärmenutzungspotenziale ermöglichen können.

2 Beschreibung des Glasherstellungsprozesses

Der Inhalt dieses Kapitels 2 entspricht in wesentlichen Teilen den Quellen [[4], [5], [6]].

2.1 Exemplarischer Glasherstellungsprozess

Um die im Projekt geplante Vorgehensweise zur Hochrechnung der Wärmerückgewinnungspotenziale zu erläutern und verständlicher zu machen, wird der Glasherstellungsprozess zunächst in seinen relevanten Punkten vorgestellt. Zunächst wird der Herstellungsprozess anhand seiner Prozessschritte erklärt. Zudem werden die in den einzelnen Prozessschritten benötigten Temperaturniveaus hergeleitet und die wichtigsten technischen Rahmenbedingungen erläutert. Die technischen Rahmenbedingungen beziehen sich dabei auf die Stoff- und Energieströme, das Schmelzaggregat und den Schmelzprozess sowie die Abgasreinigung.

Die hier näher beschriebenen Prozessschritte spiegeln sich auf Grund der mit ihnen verbundenen unterschiedlichen Temperaturbereiche in der Berechnung der Potenziale zur Wärmerückgewinnung später wider.

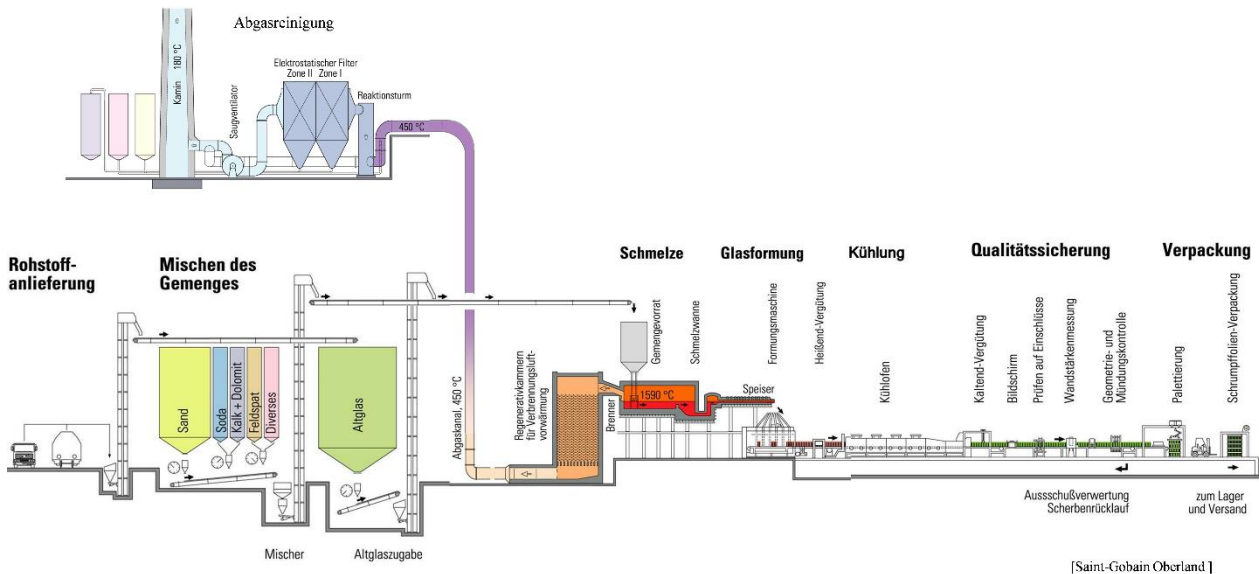
Bei der später folgenden Betrachtung von Abwärmepotenzialen in dieser Studie, muss diese Vielfalt der Glasindustrie auf eine praktikable und realitätsnahe Anzahl reduziert werden. Daher werden sechs repräsentative Produktionsabläufe zur Herstellung von Glasprodukten betrachtet (siehe Tabelle 1), die unterschiedlichen Glasarten berücksichtigen und für die genannten Glasarten typisch sind. Die verschiedenen Schmelzaggregate werden in Kapitel 1 detaillierter beschrieben.

Tabelle 1: Beispielprozesse zur Branchenbeschreibung und typische Prozessketten

Nr.	Schmelzaggregat	Formgebungsprozess	Glasart	Glasprodukt
1	Regenerativ beheizte U-Flammenwanne	Blas-Blas- bzw. Press-Blass-Prozess mit Hilfe von sog. IS-Maschinen	KNS (Kalk-Natron-Silicatglas)	Behälter
2	Regenerativ beheizte Querbrennerwanne	Floatprozess	KNS	Bauglas, Fahrzeugverglasung
3	Seitenbeheizte Oxy-Fuel-Wanne	Rohrzug	BS (Borosilicatglas)	Spezialglas
4	Rekuperativ beheizte Wanne	Zerfaserung mit an das Produkt angepasster Nachbearbeitung	Je nach gefragten Produkteigenschaften	Faserprodukte
5	VES-Wanne	Je nach Produkt	Je nach gefragten Produkteigenschaften	Wirtschaftsglas, Flaconagen, Fasern
6	Kupolofen	Zerfaserung mit Nachbearbeitung	Mineralfaser	Steinwolle

2.1.1 Prozess

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Glasherstellungsprozesses



Der Glasherstellungsprozess ist ein Produktionsprozess, der nach dem Anfahren (Aufheizen, Erwärmen) der Wanne und der Zugabe von Scherben zur ersten Füllung des Glasbades meist kontinuierlich und ohne Unterbrechung in Betrieb gehalten werden muss: 24/7, 52 Wochen im Jahr, über bis zu 15 oder im Extremfall 20 Jahre. Die Lebensdauer (ununterbrochene Laufzeit) des Schmelzaggregates hängt dabei von der Art des Schmelzaggregates, der Glaschemie, den Anforderungen an die Produktqualität, der Fahrweise des Schmelzaggregats und des eingesetzten Feuerfestmaterials ab. Ein Stillstand und Abkühlen des Schmelzaggregates kann je nach Aggregat (siehe Kapitel 2.3.2) zu dessen Zerstörung und zwangsweise damit auch zum Zusammenbruch der Produktionskette führen. Ein solcher Stillstand wäre somit mit hohen Kosten verbunden.

Der Produktionsablauf zur Herstellung von Glasprodukten kann in fünf Prozessschritte unterteilt werden:

- Gemengebereitung
- Schmelze
- Formgebung
- Kühlen/Tempern
- Qualitätsprüfung und Verpackung

Diese Prozessschritte und ihre Reihenfolge gelten für alle Glasprodukte (Behälterglas, Flachglas, Faserglas, Spezial- und Gebrauchsglas).

Bei der Gemengebereitung werden die mineralischen und chemischen Rohstoffe sowie Recycling- und Eigenscherven verwogen, gemischt und bei Bedarf gemahlen, so dass nach dem Schmelzprozess die benötigte chemische Zusammensetzung an Oxidverbindungen in der Schmelze vorliegt.

Bei der Schmelze wird in einem Schmelzaggregat das Gemenge mit Hilfe geeigneter Energieträger (Brennstoffe und/oder elektrische Energie) erschmolzen und eine von Schmelzrelikten sowie Blasen befreite, chemisch homogene Schmelze erzeugt. Diese wird bei der Zuführung zu den Formgebungsmaschinen in entsprechenden „Kanälen“ thermisch homogenisiert und auf das für die Formgebung benötigte Temperaturniveau eingestellt.

Als Schmelzaggregate kommen in Deutschland vor allem mit Erdgas beheizte Wannenöfen mit regenerativer Luftvorwärmung zum Einsatz, die bei prozesstechnischem Bedarf auch mit elektrischer Zusatzheizung (EZH) betrieben werden. Bei alleinigem Einsatz von elektrischer Energie zum Schmelzen von Glas werden sog. vollelektrische Schmelzwannen (VES-Wannen) eingesetzt. Außerdem wird „reiner“ Sauerstoff als Oxidatormedium für Brennstoffe (Oxy-Fuel-Wannen) an Stelle von Luft verwendet und in wenigen Fällen alternative Konzepte wie Drehrohröfen oder Kupolöfen zum Schmelzen von Glas genutzt.

Die Formgebungsmethode ist über das Glasprodukt vorgegeben. Behälterglas wird zum größten Teil mit Hilfe von Individual-Section-Maschinen (IS-Maschinen: in Reihe geschaltete Formgebungseinheiten) nach der Portionierung, die mit Hilfe eines Tropfenschnittes geschieht, ausgeformt. Flachglas wird überwiegend als sog. Floatglas in einer Floatkammer gezogen. Bei Faserwerkstoffen (Glaswolle und –schnüre sowie –gewebe oder Isolierglasfaser) werden nach einem Zerkleinerungsprozess die Fasern weiterverarbeitet. Für die Herstellung von Rohren und anderen Produkten werden spezielle Formgebungsverfahren verwendet.

Auf die Formgebung folgt eine Temperaturbehandlung in entsprechenden Kühl- bzw. Temperöfen, um die bei der Formgebung erzeugten mechanischen Spannungen und Verletzungen in der Oberfläche abzubauen bzw. auszuheilen oder eine Nachbehandlung vorzunehmen.

Nach einer Qualitätsprüfung der Glasprodukte auf Fehler aus der Schmelze oder Formgebung werden diese entweder verpackt und an den Kunden ausgeliefert oder veredelt oder als Halbzeug weiteren Verarbeitungsschritten zugeführt.

2.1.2 Temperaturniveaus / Viskosität

Ein zentraler Aspekt bei der späteren Betrachtung von Abwärmepotenzialen sind die benötigten Temperaturen entlang des Herstellungsprozesses. Auf Basis der Ein- und Ausgangstemperaturen eines bestimmten Prozessschrittes kann die Differenz der Wärmeinhalte berechnet werden, die als diffuse Abwärme verloren gehen. Daneben ist das Verhältnis zwischen Temperatur und Viskosität relevant, wenn man gefasste und nutzbare Abwärmeströme aus der Schmelze ermitteln möchte. Nur wenn trotz der Abwärmenutzung das benötigte Temperaturniveau erreicht werden kann, handelt es sich um ein nutzbares Abwärmepotenzial.

Die Temperaturen, die bei den einzelnen Prozessteilschritten erreicht werden müssen, um ein verkaufsfähiges Glasprodukt zu erzeugen, sind in erster Linie durch die Chemie des Glases, den Formgebungsprozess und die Qualitätsanforderungen an das Produkt gegeben. Je höher die zu erreichenden Temperaturen sind, desto höher ist der Bedarf an Energie. Bei thermodynamischen Betrachtungen (wie z. B. Energiebilanzen) stimmen die dabei beachteten und erfassten Temperaturen an den Bilanzgrenzen (= „Übergabestellen“ zwischen den einzelnen betrachteten Prozessteilschritten) so gut wie nie mit den prozessbedingten Maximaltemperaturen überein, die meist deutlich höher liegen. Eine neue bzw. angepasste Vorgehensweise schlägt daher vor, die Viskosität der Schmelze in den Mittelpunkt zu stellen und sich so an den Temperatureckpunkten des industriellen Produktionsprozesses zu orientieren [7].

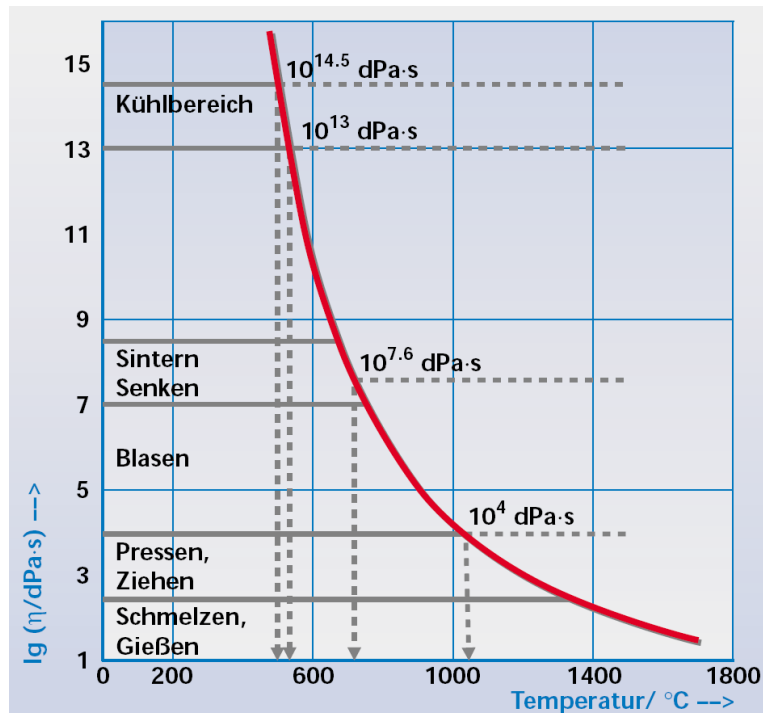
Die von der Glaschemie abhängige Viskosität der Glasschmelze gibt so Auskunft über die zu erreichenden (Prozess-)Temperaturen. Der Zusammenhang zwischen der Viskosität η einer Schmelze und der Temperatur T ist in Abbildung 2 dargestellt. Dem liegt folgende Gesetzmäßigkeit zu Grunde:

$$\log(\eta \text{ in Pa} \cdot \text{s}) = A + \frac{B}{(T - T_0)} \quad (1)$$

Mit der Viskosität η (in $\text{Pa} \cdot \text{s}$ bzw. $\text{dPa} \cdot \text{s}$ =Poise), der Temperatur T der Schmelze in $^{\circ}\text{C}$, der Konstanten A (je nach Einheit der Viskosität, muss sie u. U. angepasst werden durch Addition oder Subtraktion von 1), der Konstanten B und der fiktiven Temperatur T_0 in $^{\circ}\text{C}$. Die Formel (1) hat sich in der industriellen Praxis zur Beschreibung der Viskosität als Funktion der Temperatur zw. 10^1 bis 10^{14} $\text{dPa} \cdot \text{s}$ bewährt

und überstreicht alle Viskositätsbereiche der Glasherstellung. Die drei Konstanten werden von der Glaschemie bzw. Glaszusammensetzung beeinflusst und müssen für jede Glasrezeptur ermittelt werden. In erster Näherung kann das Viskositäts-Temperatur-Verhalten für typische Gläser durch eine mittlere / typische Glaszusammensetzung beschrieben werden [8] [9].

Abbildung 2: Viskositäts-Temperatur-Verlauf einer Glasschmelze am Beispiel von Natron-Kalk-Silicatglas [10]



Folgende wichtige Viskositätseckpunkte und die damit verbundenen Temperaturen bei gegebener Glaszusammensetzung müssen bei den einzelnen Produktionsteilschritten erreicht werden. Nur so kann die Herstellung verkaufsfähiger Produkte in möglichst kurzer Zeit und mit so geringem Energieaufwand wie möglich sichergestellt werden:

- Schmelze:** Temperatur der Glasbadoberfläche am Hot-Spot von $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 1,5$, um in möglichst kurzer Zeit eine blasenfreie und homogene Glasschmelze zu erhalten. Die mittlere Viskosität zur Erreichung der gewünschten Qualität bei Behälter- und Flachglas am „Quellpunkt“ liegt bei $\log(\eta \text{ in dPa}\cdot\text{s}) = 2,1$. Für Spezialglas wird auf Grund der höheren Anforderungen an die Qualität $\log(\eta \text{ in dPa}\cdot\text{s}) = 1,8$ angenommen [7]. Die längere Aufstiegszeit kleinerer Blasen, die nötig ist, um ein fehlerfreies Produkt zu erhalten, bedingt, dass die Viskosität erniedrigt werden muss, um akzeptable Prozesszeiten zu ermöglichen.
- Formgebung:** Je nach Formgebungsprozess:
 Tropfenschnitt bei Behälterglas bei der Temperatur von $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 3$;
 Übergabe der Schmelze ans Floatbad bei Temperatur von $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 3$ bis 3,5;
 Glasguss beim Walzprozess: Temperatur von $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 3,2$;
- Tempern:** Je nach Vorgehensweise beim Tempern bzw. Kühlen (Geschwindigkeit bzw. Dauer des Kühlprozesses) und je nach effektiver Produktdicke sowie abhängig von den zulässigen Restspannungen im Produkt müssen Temperaturen von $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 13$ bis 14,5 gezielt angefahren und in einem engen Zeit-Temperatur-Regime durchfahren werden.

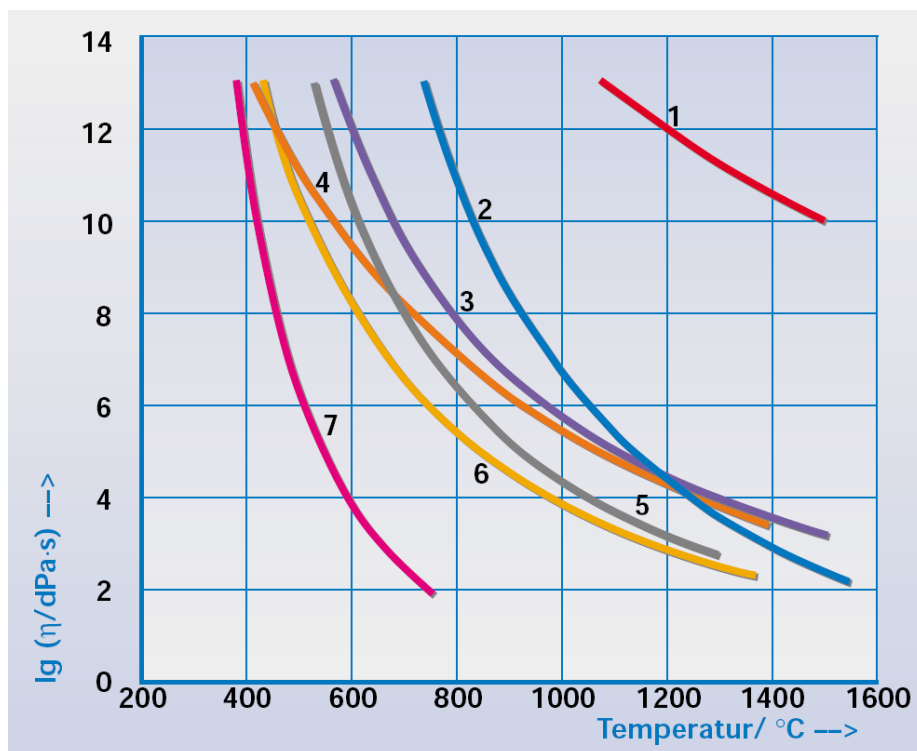
Bei bekannten Konstanten A, B und T_0 aus der Formel (1) kann aus der zu erreichbaren Viskosität der Schmelze die dafür nötige Temperatur der Glasschmelze errechnet werden.

$$T_{\text{Prozessschritt}} = \frac{B}{\log(\eta \text{ in Pa}\cdot\text{s}) - A} + T_0 \quad (2)$$

2.2 Glasarten und Produktgruppen, Glaswendungen

Die Chemie des Glases bzw. der Glasschmelze ergibt sich vor allem aus den Anforderungen an den Gebrauchsgegenstand, das Glasprodukt. Eine wichtige Rolle spielen dabei chemische Beständigkeit, physikalische Eigenschaften wie mechanische Festigkeit, elektrische Eigenschaften u. a. und die Erfordernisse des Formgebungsprozesses. Hierbei steht die Frage wie die Anforderungen an die Abkühlgeschwindigkeit beim Formgebungsprozess und das Viskositäts-Temperatur-Verhalten der Schmelze aufeinander abgestimmt werden können im Mittelpunkt. Abbildung 3 zeigt die Variation der Viskositäts-Temperaturverläufe unterschiedlicher Glasarten im Vergleich.

Abbildung 3: Viskositäts-Temperatur-Verhalten bei unterschiedlicher Glaschemie (1: Kieselglas; 2: Erdalkali-Alumino-Silicat; 3: Borosilicatglas 2; 4: Borosilicatglas 2; 5: Kalk-Natron-Silicatglas; 6: Bleiglas; 7: Lotglas)



Aus diesen beiden Hauptanforderungen haben sich für unterschiedliche Anwendungen folgende typische Glasarten etabliert (Tabelle 2):

Tabelle 2: Typische Glasarten für verschiedene Glasanwendungen

Glasanwendung	Glasart/Glaschemie
Verpackungsglas	Kalk-Natron-Silicatglas
Wirtschaftsglas	Kalk-Natron-Silicatglas; Kristallglas
Flach- bzw. Floatglas (Bauglas, Fahrzeugverglasung)	Kalk-Natron-Silicatglas
Verstärkungsfasern f. Beton	AR-Glas (Alkali resistentes Glas)
Gläser für Elektronik und Elektrik	Kalk-Natron-Silicatglas, Erdalkali-Alumo-Silicatglas, Alkali-Bleiglas, E-Glasfaser,
Andere	Glaskeramik

Preise für Rohstoffe und die Verfügbarkeit, auch regionale, sowie weitere Einflussfaktoren spielen ebenfalls eine Rolle bei der Auswahl und Suche nach der passenden Glaschemie für ein Produkt und seine Eigenschaften sowie die dafür notwendigen Formgebungs- und Prozessschritte. So ergeben sich auch geringfügige Varianzen in der chemischen Zusammensetzung von gleichartigen Produkten, abhängig vom Hersteller, dem Ort der Produktion, den Randbedingungen des Formgebungsprozesses, der Fahrweise der Wanne und vielen weiteren Faktoren. Diese Schwankungen / Abweichungen der Glaschemie spiegeln sich auch in dem Viskosität-Temperatur-Zusammenhang wider. Es werden daher leicht abweichende Temperaturen für die gleichen Viskositätsdaten erhalten und bei der Glasherstellung entsprechend berücksichtigt bzw. angefahren.

2.3 Relevante technische Rahmenbedingungen

Im Forschungsvorhaben „Material- und Energieeffizienzpotenziale in der Glas- und Mineralfaserindustrie“ ist das Ziel, Abwärmepotenziale möglichst realitätsgetreu und so detailliert wie möglich zu ermitteln. Aus diesem Grund müssen vor allem die technischen Rahmenbedingungen des Glasherstellungsprozesses verstanden werden, die das Grundkriterium für die Nutzbarkeit der ermittelten Abwärme darstellen. Die technischen Rahmenbedingungen umfassen zum einen die Unterscheidung der Stoff- und Energieströme, die spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Schmelzaggregate sowie die technischen Anforderungen innerhalb des Schmelzprozesses und der Abgasreinigung. **Stoff- und Energieströme**

Um Wärmerückgewinnungspotenziale berechnen, abschätzen und hochrechnen zu können, müssen Massenströme und die damit verbundenen (Wärme-)Energieströme, d. h. deren Temperaturen, erfasst werden. Auf diese Weise lassen sich gefasste Wärmeströme direkt berechnen und ungefasste Verluste, bzw. diffuse Abwärme, indirekt ableiten.

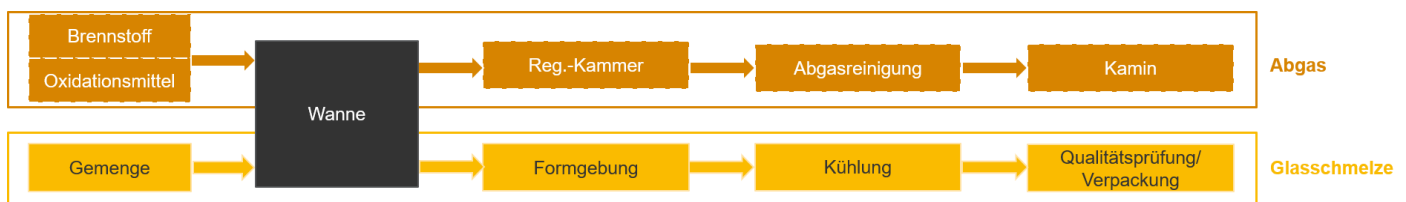
Der Glasherstellungsprozess ist durch zwei wesentliche Stoffströme und damit verbundenen Energieflüssen gekennzeichnet, die für diese Studie identifiziert und abgegrenzt wurden:

- Stoffstrom 1: Gemenge - Glasschmelze – Glasprodukt
- Stoffstrom 2: Brennstoff für Glasschmelzaggregat – Abgas

Die Verbrennungsluft stellt bezüglich der schon eingesetzten direkten Wärmerückgewinnung in den meisten Schmelzaggregaten einen dritten Stoffstrom dar, der in den Berechnungen berücksichtigt wird.

Mit den beiden (Haupt-)Stoffströmen, die in Abbildung 4 skizziert sind, sind entsprechende Energie- und Wärmeströme verbunden, die im Rahmen des Projektes genauer untersucht werden.

Abbildung 4: Stoffströme im Produktionsprozess der Glasherstellung



Zwischen den beiden Massenströmen findet aber auch ein Massenaustausch statt. Aus dem Gemenge gehen Gemengegase (Kohlendioxid und Schwefeloxid aus mineralischen Rohstoffen) in den Abgasstrom über und es findet eine Verdampfung (bei den meisten Gläsern von Alkalien, aber auch von Bor u. a.) aus der Glasschmelze statt. Außerdem werden Gase (SO_2 , O_2 , ...) bei der Läuterung der Schmelze freigesetzt, die wie die Verdampfungsprodukte ebenfalls im Abgas wiederzufinden sind.

Durch den zusätzlichen Einsatz von Brennstoffen in weiteren Produktionsschritten (z. B. im Bereich der thermischen Homogenisierung der Schmelze, beim Tempern, einzelnen Formgebungsschritten oder -technologien, ...) werden weitere kleinere Stoffströme mit entsprechend kleinen Abgasströmen initiiert, die meist frei abgehen und daher nicht gefasst sind. Die damit verbundenen Energie- und Wärmemengen werden bei den Referenzprozessen, wenn möglich, mitbetrachtet.

2.3.2 Schmelzaggreat

In der deutschen Glasindustrie kommen unterschiedliche Arten von Glasschmelzaggreaten zum Einsatz. In dieser Studie werden für sechs repräsentative Produktionsabläufe die Wannenöfen berücksichtigt, die typischerweise bei größeren Produktionsmengen verwendet werden. Lediglich bei der Fallstudie 5 und 6 werden zwei Sonderfälle betrachtet, die weniger verbreitet sind.

Grundsätzlich kann man folgende Arten von Glasschmelzaggreaten unterscheiden:

- Hafenöfen für kleine Produktionsmengen ($< 1 \text{ t/d}$) mit zyklischer diskontinuierlicher Betriebsweise. Hafenöfen werden mit fossilen Brennstoffen oder elektrisch beheizt.
- Wannenöfen mit fossilen Brennstoffen beheizt für geringe Tagestonnagen ($< 10 \text{ t/d}$), meist kontinuierlich betrieben.
- Wannenöfen für Produktionsmengen zw. 10 und 1.000 t/d, mit Brennstoffen (in Deutschland vor allem Erdgas) beheizt, mit Luft als Oxidator und einer regenerativen oder rekuperativen Luftvorwärmung im kontinuierlichen Betrieb. Bei Wannen mit fast reinem Sauerstoff als Oxidator ist dessen Vorwärmung aktuell nicht üblich.
- Vollelektrische Schmelzwannen, bei denen die elektrische Energie direkt in der Glasschmelze durch Ohm'sche Widerstandserwärmung freigesetzt wird und die im kontinuierlichen Betrieb gefahren werden.

2.3.3 Schmelzprozess

Ziel des Schmelzprozesses ist eine thermisch und chemisch homogene Schmelze herzustellen. Diese ist insbesondere für den Formgebungsprozess von großer Bedeutung. So sollte die Schmelze weder kristalline oder gasförmige Einschlüsse bzw. Fremdkörper enthalten und eine geeignete Viskosität und somit Temperatur haben.

Auf dem Weg von den Rohstoffen bis zur optimalen Schmelze müssen in möglichst kurzer, aber ausreichender Zeit und bei geringstmöglichen Energieaufwand folgende Prozessschritte durchlaufen werden:

- Wiegen, Mischen, ggf. Mahlen der Rohstoffe zur Erzeugung eines möglichst homogenen Gemenges

- Erwärmen und Aufschmelzen des Gemenges
- Abgabe der Gemengegase aus karbonatischen und sulfatischen sowie sulfidischen Rohstoffen
- Auflösung schwer löslicher Gemengebestandteile (Restquarzauflösung)
- Herstellung der Blasenfreiheit der Schmelze (Läuterung)
- Einstellung der thermischen und chemischen Homogenität der Schmelze zur Übergabe an den Formgebungsprozess

Dazu müssen beim Schmelzprozess zum richtigen Zeitpunkt der erste und zweite in Kapitel 2.1.2 genannten Fixpunkte der Viskosität durch Prozess- und Temperaturführung erreicht bzw. durchlaufen werden.

Wie später in Kapitel 1 ausführlicher beschrieben wird, entstehen im Schmelzprozess mehrere Abwärmeströme. Diese entstehen u. a. in Form von Wannenverluste beim Erwärmen und Aufschmelzen des Gemenges. Während der Läuterung wird durch das Abkühlen der Schmelze ebenfalls Abwärme frei. Um sicherzustellen, dass die Schmelze thermisch und chemisch homogen ist, wird zusätzliche Energie eingesetzt, die in Form von diffuser Abwärme wieder abgegeben wird.

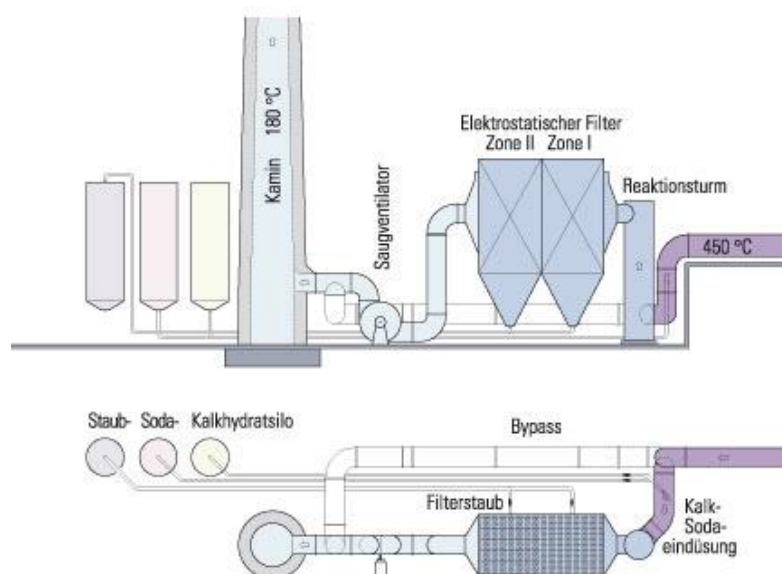
2.3.4 Abgasreinigungsanlage

Die Abgasreinigung gehört nicht zum eigentlichen Produktionsprozess, ist aber aus ökologischen Gründen sinnvoll und wichtig [11]. Ihre Hauptaufgabe ist die Staubentfernung.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Technologien, die zur Staubentfernung in der Glasherstellung eingesetzt werden. Die weitverbreitetsten Technologien ist der Elektrofilter und der Gewebefilter.

Der Elektrofilter, auch E-Filter genannt, dient der Abscheidung von Staubpartikeln aus den Abgasen der Glasschmelze. Die Abscheidung beinhaltet ein mehrstufiges Verfahren und basiert auf dem elektrostatischen Prinzip. Auf der ersten Stufe, der Sorptionsstufe, werden die im Abgas enthaltenen sauren Bestandteile zunächst durch die Eindüsung von Sorptionsmittel, wie Kalk und Soda, gebunden. Dadurch kann die Leistung des E-Filters erhöht werden.

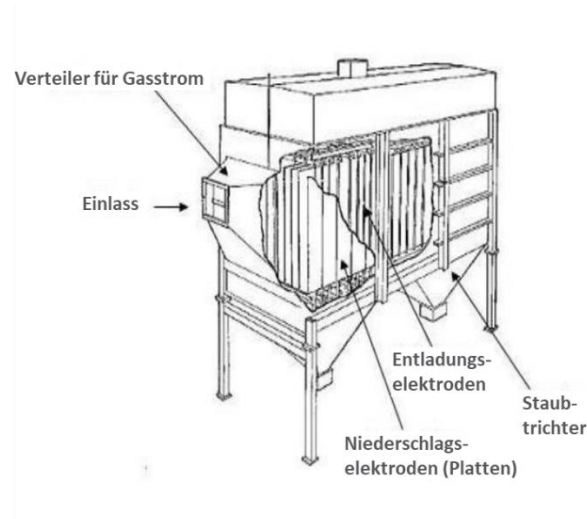
Abbildung 5: Abgasreinigung mittels Elektrofilter [12]



Der auf der nächsten Stufe folgende E-Filter besteht aus einer Reihe von Entladungshochspannungselektroden und den dazugehörigen Kollektorelektroden. Zwischen den Elektroden wird ein

elektrisches Feld erzeugt. Dazu werden eine geringe Stromstärke und eine hohe Spannung (bis zu 80 kV) benötigt. Über dieses elektrische Feld werden die Staubpartikel elektrostatisch aufgeladen und anschließend zur Niederschlags Elektrode transportiert. An der Niederschlags Elektrode haften die Staubpartikel an und können so abgeschieden werden. In den meisten Fällen wird der abgeschiedene Filterstaub als Sekundärrohstoff dem Glasgemenge zugeführt und eingeschmolzen, sodass ein geschlossener Kreislauf entsteht [13].

Abbildung 6: Elektrofilter [13]

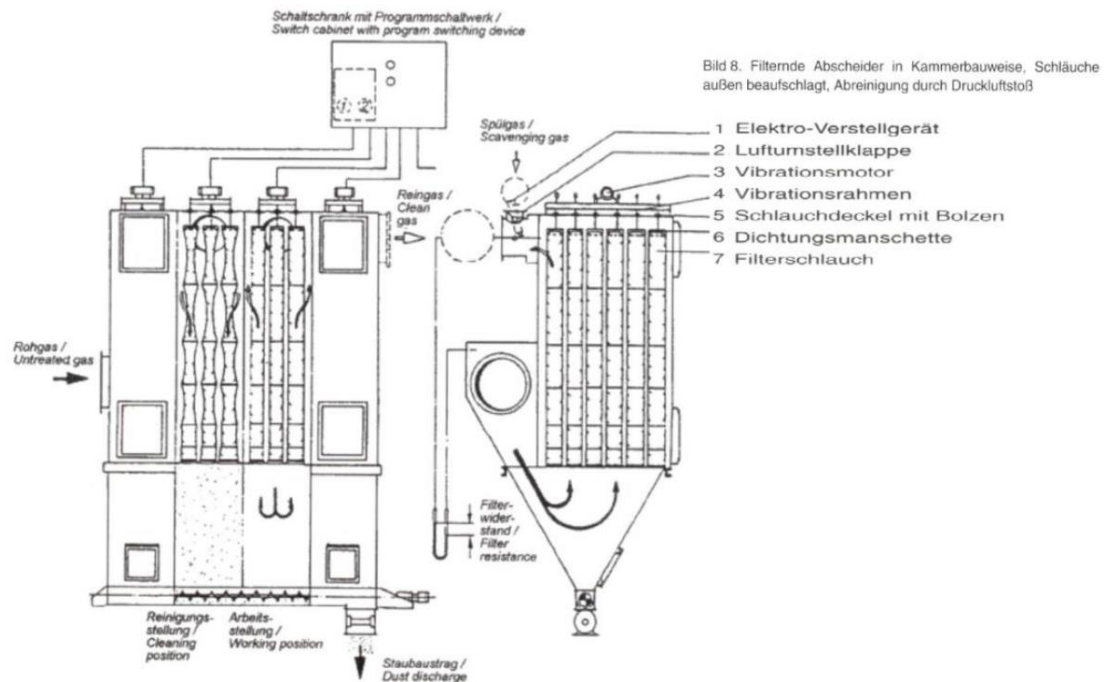


Der E-Filter kann in einer Temperaturspanne eingesetzt werden, die von verschiedenen Faktoren begrenzt wird. Die Maximaltemperatur des zu reinigenden Abgases hängt zum einen von der allgemeinen Betriebstemperatur des E-Filters und zum anderen von den enthaltenen Substanzen ab. Die maximale Betriebstemperatur liegt bei etwa 430 °C. Hinzu kommt, dass eine Partikelbildung im Abgas vermieden werden sollte. Dazu dürfen bestimmte Temperaturen nicht überschritten werden. Die genauen Temperaturen hängen dabei von den enthaltenen Substanzen im Abgas ab. Im Fall von Natron-Kalk-Silicatglas liegt die Bildungstemperatur von Natriumsulfat, dem Hauptbestandteil des Staubes, bei 800 °C. Bei Borosilikatgläsern findet jedoch eine vollständige Kondensation der Borverbindungen bereits bei 200 °C statt.

In den meisten Fällen sollte eine Temperatur von 400 °C nicht überschritten werden, da die üblicherweise verwendeten Stähle in Elektrofilteranlagen sonst starker Korrosion unterlägen. Werkstoffe, die höhere Temperaturen erlauben, sind sehr kostenintensiv [13].

Nach unten begrenzt die Reaktivität der Absorptionsmittel die Temperatur des Abgases. Am wichtigsten ist dabei die Temperatur bei Zugabe der Absorptionsmittel zur Minderung von Stickoxiden sowie der Absorptionsmittel zur Minderung von SO_x , Halogenverbindungen und Schwermetallen. Um eine optimale Reaktivität der verschiedenen Absorptionsmittel (Ca(OH)_2 , Na_2CO_3 , NaHCO_3) zu erreichen, sollten Temperaturen zwischen 500 und 400 °C zur Zugabe der Absorptionsmittel genutzt werden, mindestens jedoch 400 °C (bei etwas geringerem Abscheidegrad einzelner Komponenten: 250 °C [14] [13, pp. 190-201]. In den meisten Fällen ergibt sich dadurch eine optimale Temperatur von 400 °C beim Eintritt des Abgases in den Abgasreinigungsprozess.

Abbildung 7: Gewebefilter [15]



Neben dem Elektrofilter, kann auch der Gewebefilter zur Abgasreinigung verwendet werden. Er zeichnet sich insbesondere durch eine hohe Wirksamkeit bei der Feinstaubabscheidung aus. Allerdings besteht unter bestimmte Bedingungen eine Verstopfungsgefahr.

Filternde Abscheider, wie der Gewebefilter, bestehen aus einer (textilen) Membran, die für Gas durchlässig, jedoch für Staub undurchlässig ist. Kurz nach einer Reinigung des Gewebefilters, sammelt sich der Staub an den Fasern der Oberfläche sowie in tiefliegenden Bereichen des Filters. Nach und nach wird die Staubschicht an der Oberfläche dicker und dient selbst als Filter. Der Nachteil dabei ist der Anstieg des Filterwiderstands im Gasstrom. Somit muss der Gewebefilter regelmäßig gereinigt werden.

Der Einsatzbereich von Gewebefiltern wird, ähnlich wie beim Elektrofilter, von einem definierten Temperaturfenster des Abgases begrenzt. So muss die Temperatur des Abgases oberhalb des Taupunktes aller kondensierenden Stoffe im Abgas liegen, jedoch unterhalb der maximalen Betriebstemperatur des Filtermaterials. Die maximale Betriebstemperatur bei Gewebefiltern liegt zwischen 130 und 220 °C¹. Übersteigt die Temperatur im Abgas diese Grenze, besteht die Gefahr einer Beschädigung des Filtermaterials. Auf der anderen Seite kann es bei zu niedrigen Temperaturen zur Kondensation der im Abgas enthaltenen Verbindungen kommen, wodurch das Filtermaterial chemisch beschädigt werden kann und/oder das Gewebe verstopft. Eine Möglichkeit bei der Entstaubung höhere Temperaturen im Abgas zu fahren, sind keramische Filterkerzen, die katalytisch beschichtet auch zur NO_x-Abscheidung genutzt werden [14] [16].

Sowohl beim Elektrofilter als auch bei filternden Abscheidern (Filter mit keramischen Filterkerzen oder Gewebefiltern) muss das Abgas vor der Abgasreinigung abgekühlt werden. Je nachdem, welcher Wannentyp verwendet wird, muss bei Elektrofiltern das Abgas nur geringfügig abgekühlt werden (z. B. bei Verwendung einer regenerativen Wanne). Beim Einsatz von Gewebefiltern muss das Abgas

¹ Eine ähnliche Maximaltemperatur gilt bei filternden Abscheidern, die Teflon als Filtermedium verwenden. In dem Fall liegt die Maximaltemperatur des Abgases unter 200 °C.

stärker abgekühlt werden. Dies geschieht beispielsweise durch Wärmeaustausch, Verdünnung oder Quenschen [17, pp. 201-210, 14].

2.3.5 Säuretaupunkt

Wie bereits das vorherige Kapitel zeigt, sind im Glasherstellungsprozess bestimmte Temperaturbänder aus unterschiedlichen technischen Gründen einzuhalten. Im Stoffstrom Abgas betrifft das zum einen das Temperaturfenster, das für den Einsatz eines bestimmten Filters in der Abgasreinigung nötig ist und den Säuretaupunkt im darauffolgenden Prozessschritt, dem Kamin.

Der Säuretaupunkt bezeichnet die Kondensation des im Abgas enthaltene Wasser(-dampfes) unter Bildung einer sauren Lösung auf Grund der Reaktion mit anderen, säurebildenden Bestandteilen des Abgases wie CO_2 und SO_2 bzw. SO_3 . Der Säuretaupunkt des Abgases begrenzt die Temperatur des Abgases nach unten, die für die Wärmerückgewinnung im Stoffstrom Abgas zur Verfügung steht. Der Grund dafür ist, dass es bei Unterschreiten des Säuretaupunktes zum Ausfall von säurehaltiger Feuchtigkeit und somit zur Beschädigung bis hin zur Zerstörung des Kamines bzw. der Ausmauerung der Abgasführung kommt.

Wird Erdgas als Brennstoff verwendet, dürfen üblicherweise 90 – 120 °C nicht unterschritten werden. Bei der Befeuerung der Glasschmelzwanne mit Erdöl liegt der Säuretaupunkt dagegen bei ca. 200 °C. Um beide Brennstoffarten in den Fallstudien abzudecken, wird daher in dieser Studie eine untere Temperaturgrenze des Abgases von 200 °C verwendet. Die Temperatur des Säuretaupunktes hängt in erster Linie vom SO_3 -Gehalt des Abgases ab und damit auch vom Schwefelgehalt des Brennstoffes oder anderer Schwefelquellen (Läutermittel), die zur SO_3 -Bildung im Abgas führen.

Ein weiterer Grund, das Abgas nicht wesentlich unter 200 °C abzukühlen, ist der Erhalt des natürlichen Kaminzuges. Dabei hängt die Grenztemperatur auch von der Schornsteinhöhe ab. Ist der natürliche Kaminzug nicht mehr gegeben, muss mit Hilfe eines Ventilators bzw. Gebläse der Zug aufrecht-erhalten werden. Dies kostet zusätzliche elektrische Energie.

3 Glasindustrie in Deutschland

Die Herstellung von Glas und Glaswaren in Deutschland (WZ 23.1) umfasst sowohl die Herstellung (Schmelze und Formgebung) von Glas wie bei der Produktion von Hohlglas oder Flachglas als auch die Produktion von Glaserzeugnissen (Bearbeitung und Veredelung von Flachglas). In der Analyse des Abwärmepotenzials wird primär auf die Herstellung der verschiedenen Glasarten durch Schmelze und Formgebung eingegangen. Dies betrifft die Herstellung von Hohlglas, Flachglas, Spezialglas, Glaswolle bzw. Glasfasern sowie von Steinwolle, die nicht in der WZ23.1 erfasst wird. Wie Abbildung 9 zeigt, wird die größte Tonnage an verkaufsfähigem Glas mit deutlichem Abstand in der Hohlglas- bzw. Behälterglasindustrie produziert, gefolgt von der Flachglasindustrie. Deutlich geringere Mengen werden dagegen in den anderen Glasbranchen hergestellt.

Um die Grundlage für spätere Hochrechnungen des Abwärmenutzungspotenzials zu bilden, wird in den folgenden Unterkapiteln die Glasindustrie in Deutschland charakterisiert. Dies umfasst zum Beispiel wichtige Strukturdaten wie der Jahrestonnage oder den aktuellen Energiebedarf und seine historische Entwicklung. Außerdem wird mittels Expertengesprächen mit Energiemanagern aller Branchen der Status Quo im Bereich Energieeffizienz und Abwärmenutzung herausgearbeitet.

3.1 Datenerfassung und Methodik

Eine Schwierigkeit bei der Ermittlung von Kennzahlen ist die Auf- bzw. Verteilung der Glas schmelzenden Betriebe in die Wirtschaftszweige (WZ). Die Kennzahlen der Hohlglasindustrie (Behälterglas und Wirtschaftsglas), der Flachglasindustrie, der Glasfaserherstellung und der Spezialglasindustrie sind als Untergruppen des WZ 23.1 verfügbar. Für die Mineralwollherstellung werden vom BV Glas Jahrestonnagen ausgewiesen, Energieverbrauchsdaten sind für die Untergruppe des WZ 23.99 jedoch nicht öffentlich verfügbar. Bei der Wasserglasschmelze sind weder Tonnagen noch Energieverbrauchsdaten veröffentlicht, da Wasserglas hauptsächlich ein Grundstoff für die chemische Industrie ist und in der Statistik der Wirtschaftszweige überhaupt nicht erfasst wird. In den beiden letzten Fällen wurden daher durch Expertenschätzung entsprechende Kennzahlen ermittelt und so gut es geht mit nicht öffentlich verfügbaren Zahlen abgeglichen.

Die in WZ 23.1 erfasste deutsche Glasindustrie erwirtschaftete im Jahr 2018 ein Gesamtumsatz von rund 10,1 Mrd. Euro und wuchs dabei um rund 4 % im Vergleich zum Vorjahr. Gleichzeitig nahm die Beschäftigtenzahl im Gegensatz zum jahrelangen Trend um 4,7 % zu und betrug 2018 über 56.000 Mitarbeiter [18]. In Deutschland werden an rund 100 Hüttenstandorten (aktuell 93) industrielle Glas-schmelzaggregate betrieben². Bei der Zählung wurden industrielle Schmelzanlagen mit einer großen Bandbreite an Tagestonnagen erfasst, beginnend bei etwa 100 kg pro Tag bis maximal 1.000 t/d. Insgesamt gibt es etwas mehr als 220 Schmelzaggregate in Deutschland. Davon erschmelzen ca. 142 Schmelzaggregate mehr als 10 Tonnen pro Tag.

Neben statistischen Daten und Angaben aus Messberichten der HVG wurden Experten aus der Glasindustrie befragt. Die über 15 Interviews und Gespräche erfolgten auf einer der größten internationalen Glasmessen, der glasstec 2016 und glasstec 2018, in Düsseldorf sowie im Rahmen von Arbeitskreisen und Arbeitsgruppentreffen der HVG und des BV Glas oder am Rande von Fachausschüssen der DGG. Auch das im Internet einsehbare Register der deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) wurde zum Abgleich herangezogen. Gegenstand der Erfassung bzw. Befragung waren:

- Art des Schmelzaggregates
- Genehmigte Tagestonnage

² Stand Ende 2016

- Installierte elektrische Zusatzheizung
- Brennstoff zum Schmelzen des Glases
- Erschmolzene Glasart und erzeugtes Glasprodukt
- Nutzung von Wärmerückgewinnungstechnologien neben Regenerator oder Rekuperator: Rohstoffvorwärmer, Warmwasserbereitung, Stromerzeugung, ORC-Anlagen, etc.
- Technologie zur Abgasreinigung
- Begründungen zur oder Hindernisse gegen die Nutzung von Wärmerückgewinnungstechnologien

Diese Informationen wurden von Seiten der HVG anonymisiert und so sichergestellt, dass keine Verletzung von Betriebsgeheimnissen möglich war.

3.2 Jahrestonnage

Die in den Jahresberichten des BV Glas [19] veröffentlichten Jahresproduktionsmengen beziehen sich auf verkaufsfähiges Glas. Dies entspricht nicht der Menge an geschmolzenem Glas. Je nach Prozess, Produkt und anderen Faktoren liegt das Verhältnis von verkaufsfähigem Glas zu geschmolzenem Glas (sog. Pack-to-Melt) üblicherweise zwischen 50 und 90 %. Alle Angaben in diesem Bericht werden auf die Tonne verkaufsfähiges Glas bezogen.

Abbildung 8 zeigt die Entwicklung der Jahresproduktionsmengen an verkaufsfähigem Glas in Deutschland zwischen den Jahren 1997 und 2017. Vergleicht man die Jahrestonnage von 1997 und 2017, lässt sich lediglich ein geringes Wachstum erkennen. Über die zwanzig Jahre hinweg war die Jahrestonnage Schwankungen (zwischen 6,8 Mio. t und 7,6 Mio. t) ausgesetzt. Zwischen 2002 und 2005 nahm die Jahrestonnage zwar stark ab, erholte sich aber bis 2007 wieder. Danach folgte eine unbeständige Zeit bis 2013. Seitdem nahm die Jahrestonnage stetig zu und betrug im Jahr 2017 knapp 7,6 Mio. Tonnen.

Abbildung 8: Jahresproduktionsmengen der Glasindustrie in Deutschland seit 1997 [19]³

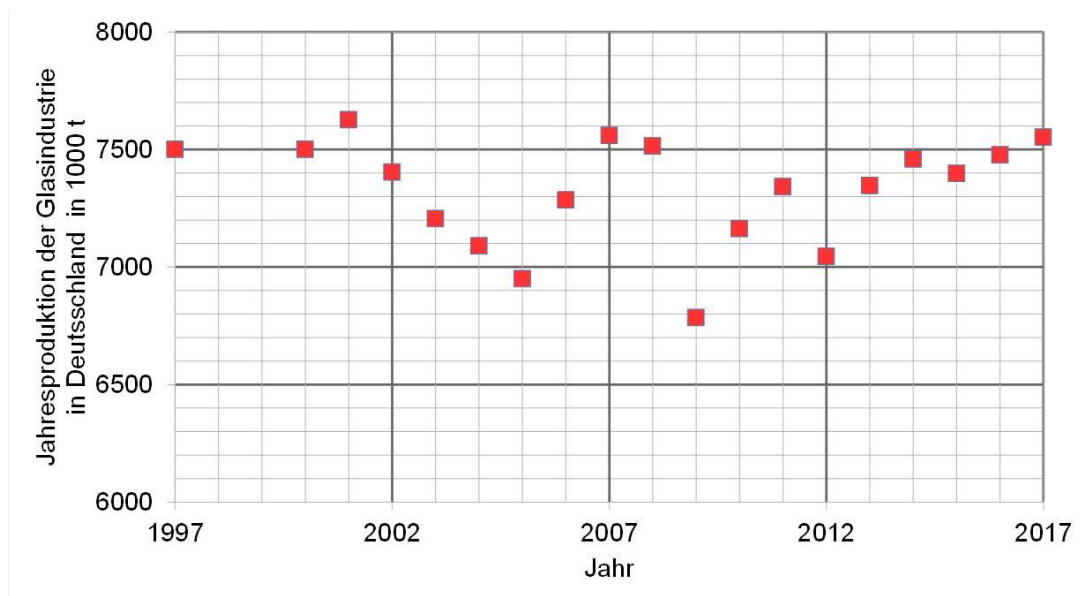
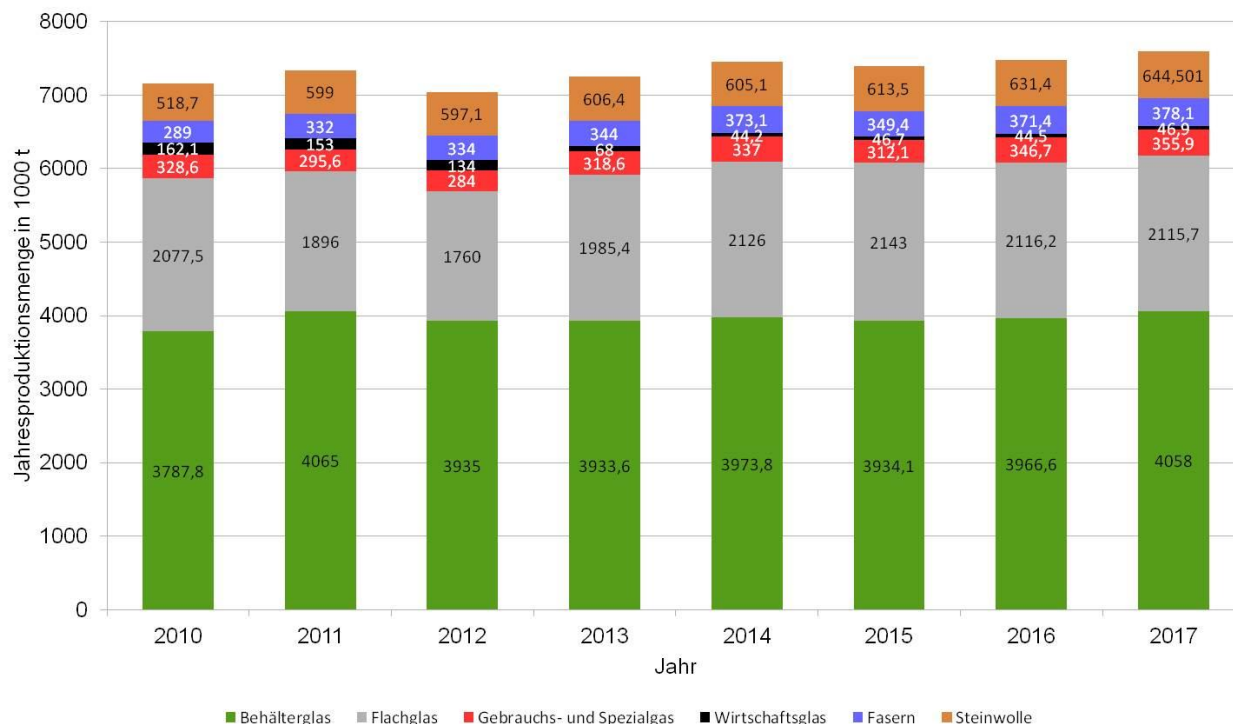


Abbildung 9 gibt für die Jahre 2010 bis 2017 einen detaillierteren Einblick über den Anteil der einzelnen Glasbranchen an der Jahrestonnage der deutschen Glasindustrie. Über alle acht Jahre hinweg

³ Aufbereitung und Aktualisierung der Zahlen aus den Jahresberichten durch die HVG.

wurde das meiste Glas mit Abstand in der Behälterglasindustrie hergestellt. Im Jahr 2017 betrug die Jahrestonnage rund 4,1 Mio. Tonnen. Die zweitgrößte Branche basierend auf der Jahrestonnage ist die Flachglasindustrie mit rund 2,1 Mio. Tonnen verkaufsfähigem Glas. Die anderen vier Branchen Steinwolle, Glasfasern, Spezialglas und Wirtschaftsglas produzieren deutlich weniger verkaufsfähiges Glas pro Jahr. Die Steinwollindustrie führt die Gruppe der kleineren Branchen mit rund 0,6 Mio. Tonnen an. Insgesamt hat sich die Verteilung der Jahrestonnage seit 2010 kaum verändert.

Abbildung 9: Jahresproduktionsmenge der einzelnen Glasbranchen in den Jahren 2010 – 2017 [19]⁴



3.3 Detailstruktur der deutschen Glasindustrie

In der später folgenden Analyse der Abwärmepotenziale werden drei der zuvor genannten sechs Branchen quantitativ untersucht. Dies sind die Branchen Behälterglas, Flachglas und Spezialglas. Mit insgesamt 6,5 Mio. t an verkaufsfähigem Glas decken die drei Fallbeispiele 87 % der Jahresproduktionsmenge in Deutschland ab (siehe Abbildung 9). Die anderen drei Branchen werden qualitativ beschrieben.

In jeder der sechs Branchen kommen unterschiedliche Schmelzaggregate zum Einsatz, wobei meist eine Technologie dominiert. Tabelle 3 zeigt die derzeit in Deutschland zum Glasschmelzen verwendeten Aggregate. Für jede Industrie (Spalten) wird angegeben, wie viele Schmelzaggregate/Wannen eines Typs (Zeilen) verwendet werden. So kommen beispielsweise sieben regenerativ beheizte Querbrennerwannen (in Tabelle 3 als Reg. Querbeh. bezeichnet) in der Hohlglasindustrie zum Einsatz, 15 in der Flachglasindustrie, drei in der Spezialglasindustrie. Rekuperative Brenn-Luftwannen (in Tabelle 3 als Rek. Brenn-Luft bezeichnet) werden nur vereinzelt in der Hohlglas-, Spezialglas- und Glaswoll- bzw. Glasfaserbranche eingesetzt, Kuppel- und Drehöfen ausschließlich in der Steinwollbranche. Auf Basis dieser Daten werden die repräsentativen Schmelzprozesse je Branche modelliert (im Fall von

⁴ Aufbereitung und Aktualisierung der Zahlen aus den Jahresberichten durch die HVG.

Flachglas z. B. anhand der regenerativ beheizten Querbrennerwanne) und die Abwärmemengen anschließend für die gesamte deutsche Glasindustrie hochgerechnet.

Tabelle 3: In Deutschland eingesetzte Schmelzaggregate zur Herstellung von Glasprodukten und Steinwolle⁵

Wannentyp	Hohlglas (davon Wirtschaftsglas)	Flachglas	Gebrauchs- u. Spezialglas	Glaswolle/ -faser	Steinwolle	Wasserglas
Reg. U-Flamm.	39 (2)	1	0	1	0	5
Reg. Querbeh.	7 (0)	15	3	0	0	3
Oxy-Fuel	5 (3)	1	8	4	2	0
Rek. Brenn-Luft	4 (2)	0	1	3	0	0
Kupol-, Drehofen	0	0	0	0	6	3
Elektrische Wanne	3 (1)	0	2	2	0	0
z. Zt. n. bekannt	10 (2)	0	0	0	3	0
sonstige	2 (0)	3	4	0	2	0
SUMME: 142	70	20	18	10	13	11

Mit Blick auf die repräsentativen Fallbeispiele (siehe auch Tabelle 1 in Kapitel 2) lassen sich mit den vorliegenden Daten für die drei relevantesten Branchen folgende Aussagen auch hinsichtlich ihrer Repräsentativität treffen:

- **Behälterglas (Hohlglas):**
Mindestens 55 % der Schmelzaggregate sind regenerative, mit Brennstoff beheizte U-Flammenwannen (in Tabelle 3 als Reg. U-Flamm. bezeichnet). Mit ca. 70 Schmelzanlagen zur Hohlglaserzeugung (davon 60 aus der Behälterglas- und 10 aus der Wirtschaftsglasbranche) werden ca. 4 Mio. t verkaufsfähiges Glas pro Jahr produziert [20]. Dies entspricht etwa 4,5 Mio. t an geschmolzenem Glas (Umrechnung PTM [13]). Im statistischen Mittel werden also mit einer Wanne ca. 180 t Glas pro Tag an Hohlglas erschmolzen und ca. 160 t verkaufsfähiges Glas hergestellt.
- **Flachglas:**
Ca. 75 % der Schmelzaggregate sind mit Brennstoff beheizte Querbrennerwannen mit regenerativer Luftvorwärmung. Bei ca. 2,1 Mio. t verkaufsfähigem Glas [20] ergibt sich bei 20 Wannen zur Erzeugung von Flachglas (davon 11 zur Herstellung von Floatglas) eine statistische Tagestonnage an erschmolzenem Glas von ca. 325 t und ca. 275 t an verkaufsfähigem Glas. Betrachtet man die Tagestonnagen von Floatwannen im Vergleich zu den restlichen Wannen, die bei der Flachglasherstellung eingesetzt werden, so lässt sich die Branche durch 12 Floatwannen mit einer imaginären Tagestonnage an verkaufsfähigem Glas von etwa 480 t beschreiben, was einer Schmelzleistung von ca. 565 t/d entspricht.
- **Spezialglas:**
Fast 50 Schmelzaggregate von wenigen kg bis über 60 t pro Tag werden zur Erzeugung von

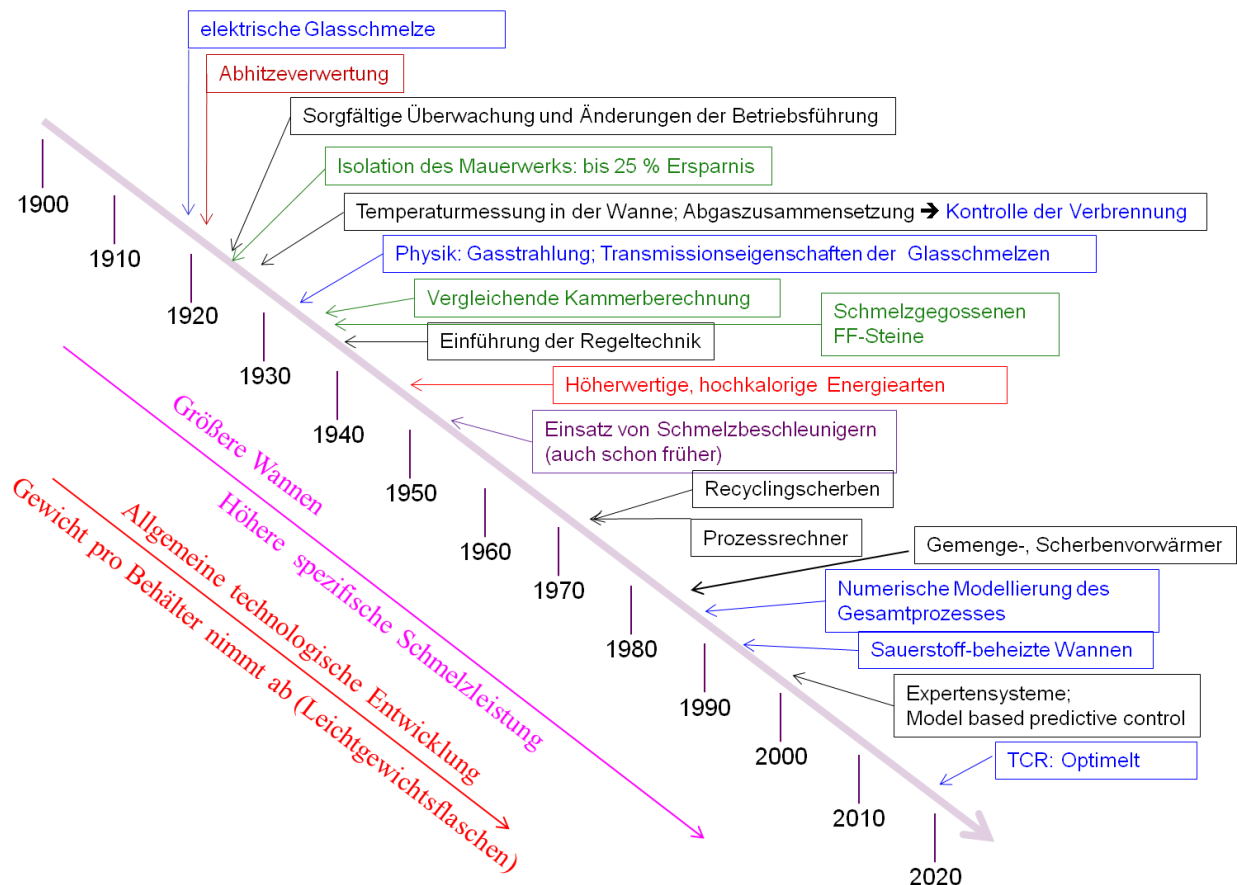
⁵ Stand: 30. September 2017

Spezialglas eingesetzt. Ca. 20 bis 25 Wannen (Tonnage nicht immer (genau) bekannt) haben dabei eine Tagestonnage von mindestens 10 t/d. Bei diesen größeren Anlagen sind viele Oxy-Fuel-Wannen im Einsatz. Als typische Schmelzwanne ergibt sich damit rechnerisch eine Oxy-Fuel-Wanne mit einer verkaufsfähigen Tonnage von etwa 40 t/d und einer Schmelzleistung von ca. 50 t/d.

3.4 Energiebedarf

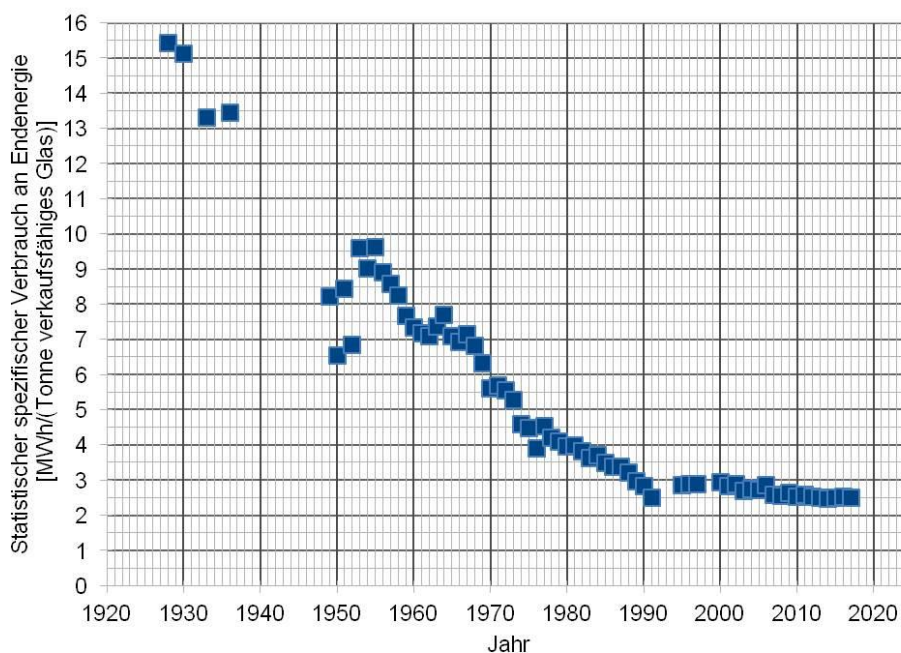
Bereits im Jahr 1920 war die Abhitzeverwertung (=Abwärmenutzung) ein wichtiges Thema. Da Versorgungsgüter für Energieträger damals nicht in allen Gebieten zur Verfügung standen (vor allem in ländlichen Gebieten, in denen viele Glashütten angesiedelt waren), war die Eigenerzeugung von Dampf und elektrischer Energie in entsprechenden Gebieten teilweise wichtiger und weiterverbreitet als es heute der Fall ist. Demzufolge wurde ein großes Augenmerk auf die Energieeffizienz in der Glasherstellung gelegt. Wie Abbildung 10 zeigt, trugen neben den Bemühungen der Glashersteller, die Kosten für Energie niedrig zu halten, auch „fachfremde“ Entwicklungen wesentlich zur Minderung des Energiebedarfs bei.

Abbildung 10: Meilensteine der Technologieentwicklung zur Verminderung des Endenergieverbrauchs [21]

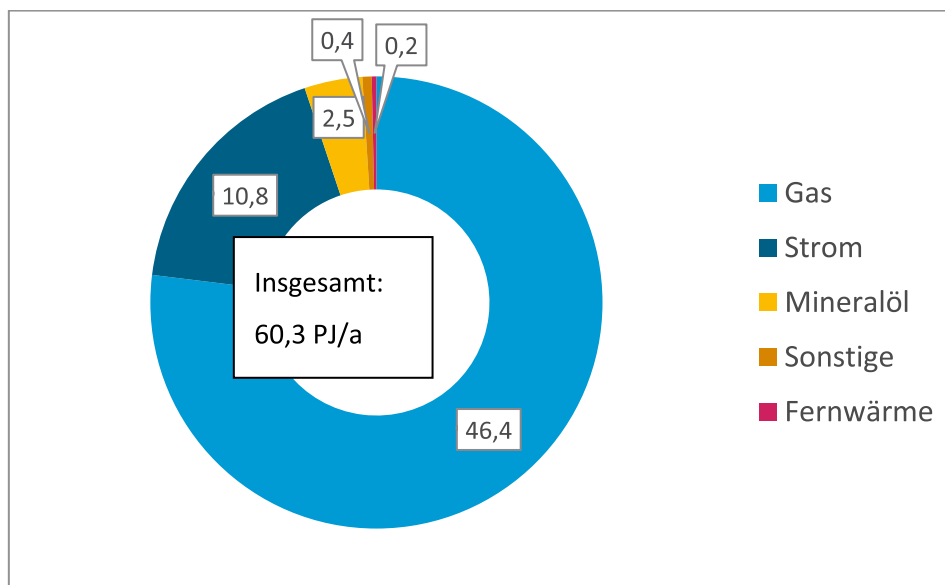


All diese technischen Errungenschaften und Entwicklungen trugen letztendlich dazu bei, dass der spezifische Energiebedarf zur Schmelze von Glas stetig verringert werden konnte. Dies verdeutlicht Abbildung 11.

Von Beginn des 20. Jahrhunderts bis in die 1990er Jahre konnte der spezifische Energiebedarf von etwa 15,5 MWh/t auf knapp 3 MWh/t reduziert werden.

Abbildung 11: Geschichtliche Entwicklung des Endenergiebedarfs zur Herstellung von Glasprodukten in Deutschland [19] [22]⁶

Heute werden in der deutschen Glasproduktion insgesamt ca. 60,3 PJ Endenergie pro Jahr zur Schmelze und Formgebung von Glas benötigt (WZ 23.11+23.13+23.14+23.19) [22]. Wie Abbildung 12 zeigt, ist dabei der Bedarf an Gas mit über 75 % des gesamten Endenergiebedarfs am größten. Danach folgt der Strombedarf mit knapp 20 % und schließlich Mineralöl, Sonstige und Fernwärme. Nicht berücksichtigt wird dabei der Energieaufwand zur Produktion von Steinwolle.

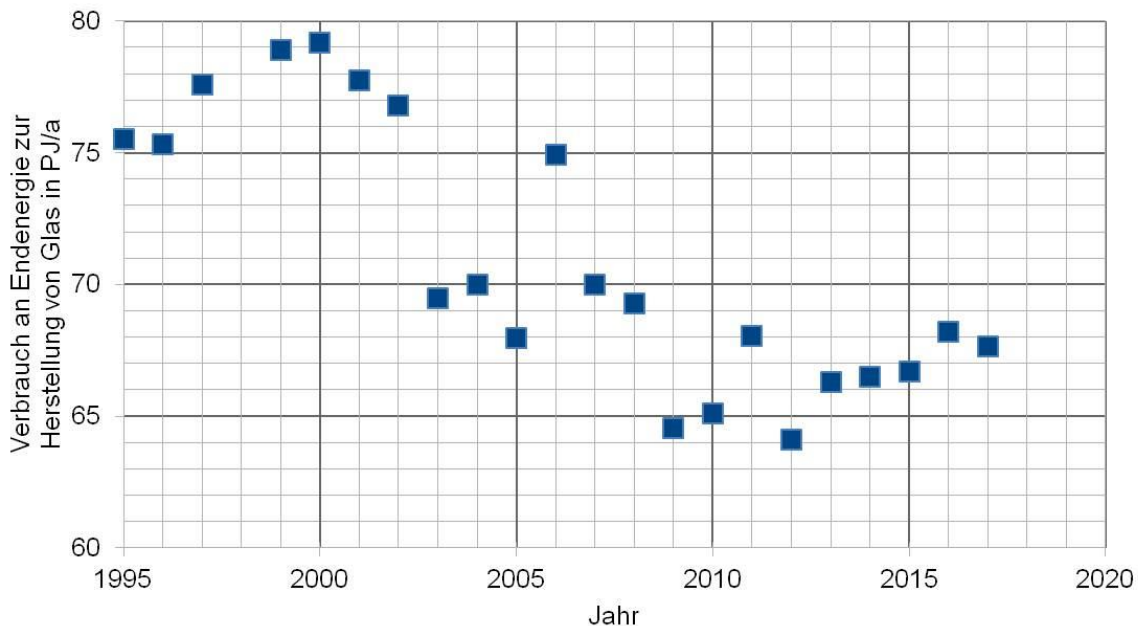
Abbildung 12: Endenergiebedarf der schmelzenden Glasindustrie für das Jahr 2017 [22]⁷

⁶ Aufbereitung und Aktualisierung der Zahlen durch HVG.

⁷ Aufbereitung und Aktualisierung der Zahlen des Statistischen Bundesamtes durch HVG.

Die Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs seit 1995 zur Herstellung (Schmelze und Veredelung) von Glasprodukten (WZ 23.1) in Deutschland ist in Abbildung 13 dargestellt. Wie man deutlich sieht, ist der Energiebedarf in der Glasindustrie seit 2000 stark gesunken. Wurden im Jahr 2000 noch knapp 80 PJ pro Jahr verwendet, werden im Jahr 2017 nur noch 67 PJ pro Jahr verwendet, trotz gestiegener Jahrestonnagen. Daraus lässt sich schließen, dass die deutsche Glasindustrie über die Zeit deutlich energieeffizienter geworden ist.

Abbildung 13: Entwicklung des Endenergiebedarfs zur Schmelze und Veredelung von Glas in Deutschland [22]



3.5 Energieeffizienz und Abwärmenutzung – Status Quo

Um die Ergebnisse aus Kapitel 4.3 zu validieren und sich einen Überblick über den derzeitigen Stand der Abwärmenutzung in der deutschen Glasindustrie zu verschaffen, wurden eine Literaturrecherche sowie mehrere Expertengespräche mit Energiemanagern über alle Glasbranchen hinweg durchgeführt. Die Literaturrecherche umfasste unter anderem Veröffentlichungen des Fraunhofer-Institutes für System- und Innovationsforschung ISI [23] und der Europäischen Kommission zu den Besten Verfügbaren Techniken in der Glasherstellung [13]

Die Gespräche sind als leitfadengesteuerte Interviews konzipiert. Die Themenblöcke betreffen Energieeffizienz im Allgemeinen (z. B. Energieeffizienz-Management), Barrieren und Lösungen, eingesetzte oder geplante Technologien und die Einschätzung und Nutzung von Abwärmepotenzialen. Auch Hersteller von Abwärmenutzungstechnologien wurden anhand eines leicht abgewandelten Leitfadens zu diesen Themen befragt.

3.5.2 Stand der Energieeffizienz in der deutschen Glasindustrie

Aus der Literaturrecherche geht hervor, dass das Interesse an Energieeffizienz aufgrund steigender Energiekosten in der gesamten Glasindustrie gegeben ist. Die meisten Anlagen in Deutschland verfügen bereits über ein etabliertes Energiemanagementsystem. Im Rahmen des Energiemanagements (EnM) wird u. a. eine Energiepolitik festgelegt, Ziele unter Einbezug der Finanzplanung definiert und umgesetzt sowie Maßnahmen zur effizienten Prozesssteuerung eingeleitet [13].

Dies wurde auch in den Experteninterviews bestätigt. Alle Interviewpartner wurden zunächst über den Aufbau des Energiemanagements im Unternehmen befragt und wie die Themen Energieeffizienz in der Praxis behandelt werden. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Implementierung der ISO 50000-1 an allen Standorten der befragten Unternehmen erfolgt ist. An einigen Standorten ist das EnM auch bereits ISO 50000-3 zertifiziert. Insgesamt kann dies bereits als ein Indikator für einen hohen Qualitätsstandard der Energiemanagementsysteme in der deutschen Glasindustrie gewertet werden.

Als typisch für die gesamte Industrie haben sich werksinterne Energieteams herauskristallisiert, die zentral durch Energiemanagementbeauftragte des Unternehmens oder der Unternehmensgruppe koordiniert werden. Häufig setzen sich diese Energieteams je Werk aus Mitarbeitern verschiedener Abteilungen zusammen, um dem Querschnittsthema „Energie“ besser gerecht zu werden.

Ein zentrales Element in den Energiemanagementsystemen der interviewten Unternehmen ist ein Vorschlagswesen, das Mitarbeiter aus allen Bereichen dazu befähigt, eigene Ideen zur Hebung von Energieeffizienzpotenzialen einzubringen.

Zielvorgaben, meist herausgegeben von der Unternehmens- oder Konzernspitze, bestimmen die Ambition und das Budget von notwendigen Effizienzmaßnahmen. Alle Maßnahmen werden vor einer Implementierung zudem finanziell bewertet, sodass in der Regel nur wirtschaftliche Lösungen mit Amortisationszeiten von 2 – 5 Jahren umgesetzt werden. Bei der wirtschaftlichen Bewertung von Maßnahmen gehen die Energiekosten als wichtigster Parameter in die Betrachtung mit ein. CO₂-Preise wurden, mit Ausnahme weniger Beispiele, noch vernachlässigt. Mit den aktuell gestiegenen Preisen von 20 bis 27 € pro t CO₂ nimmt die Betrachtung der CO₂-Preise jedoch einen höheren Stellenwert ein. Nur in einem der interviewten Unternehmen werden mögliche Investitionen auch schon vorher mit Schattenpreisen für CO₂ bewertet.

Das Ergebnis der Experteninterviews bezüglich der Investitionsbewertung bestätigt die vom Fraunhofer-Institut ISI ermittelten Hemmnisse zur Effizienzsteigerung in der Glasindustrie. Demnach legen die Unternehmen ein besonderes Augenmerk auf die Kundenbewertung einer Investition. Viele Kunden rechnen jedoch anstelle der dynamischen Amortisationszeiten der Technologiehersteller, mit statischen Amortisationszeiten von 2 – 3 Jahren. Die Unternehmensspitze passt ihre Investitionsentscheidungen diesen Zeiten an, da die Entwicklungen andernfalls nicht von den Kunden akzeptiert werden würden. Als Folge werden viele Investitionen zur Energieeffizienzsteigerung nicht umgesetzt, die durchaus rentabel wären [23].

Dieses Vorgehen mag ein Grund dafür sein, dass sich die Energieeffizienz in der deutschen Glasindustrie seit 1990, wie aus Abbildung 11 hervorgeht, nur inkrementell verbessert. Der Großteil der wesentlichen Errungenschaften kamen bereits vor 1990 zum Einsatz, so z. B. die Vergrößerung der Schmelzwannen, der Einsatz von recycelten Scherben und die Etablierung von Wärmerückgewinnungstechnologien wie dem Regenerator oder dem Rekuperator. Die Interviews bestätigen diese Einschätzung und machen deutlich, dass die meisten Maßnahmen von einem Streben nach Kostenminimierung getrieben werden und somit größere Effizienzmaßnahmen an der Investitionsbewertung des Managements scheitern. Weitere Gründe werden in Kapitel 6 ausgeführt.

3.5.3 Derzeitige Nutzung und Betrachtung von Abwärmepotenzialen in der Industrie

Die Literaturrecherche zeigt, dass das Heben von Abwärmepotenzialen in der deutschen Glasindustrie angestrebt wird. Bisher wird der Nutzung der Abwärme aus dem Verbrennungsprozess die größte Priorität eingeräumt. So wird der Abgasstrom, der aus der Schmelzwanne mit über 1.400 °C kommt, mittlerweile bei den meisten Anlagen mittels eines Regenerators oder Rekuperator genutzt. Unberücksichtigt bleibt jedoch die Rückgewinnung jeglicher diffusen Abwärme. Die fortschrittlichsten Glashersteller setzen eine zweite Rückgewinnungstechnologie zur Nutzung gefasster Abwärmeströme neben dem Regenerator/Rekuperator ein. Dies kann die Verwendung eines Abhitzekeessels in der Flachglasindustrie oder ein Scherben- und Gemengevorwärmer in der Hohlglasindustrie sein. Bis zum jetzigen

Zeitpunkt wurde jedoch keine Technologie zur Rückgewinnung diffuser Abwärme entwickelt. Der momentan größte Fokus aus technologischer Sicht liegt auf der Weiterentwicklung von Scherben- und Gemengevorwärmern, der Verbesserung des Wirkungsgrades des Regenerators sowie einer verbesserten Isolierung der Schmelzwanne. Ein großes Interesse gibt es aber auch hinsichtlich Abwärmotechnologien zur Erzeugung von Strom [13].

Die Auswertung der Interviews bestätigt, dass sich alle befragten Unternehmen bereits intensiv mit der Betrachtung und Analyse von Abwärmepotenzialen beschäftigt haben. Eine Quantifizierung ist in einigen Fällen zudem mit Unterstützung externer Dienstleister erfolgt, auch um die internen Ergebnisse von unabhängigen Instituten zu validieren und neue Erkenntnisse zu gewinnen. Zwei der befragten Unternehmen gaben dabei zusätzlich an, dass die Ergebnisse externer Betrachtungen und Analysen keine neuen Erkenntnisse gebracht haben. Dies ist auch auf das gute Knowhow und die hohen Standards in den Energiemanagement-Abteilungen deutscher Glasproduzenten zurückzuführen.

Durch Interviews mit der Industrie konnte ein weiteres Hindernis der Abwärmenutzung identifiziert werden. Nahezu alle Experten gaben an, dass die Quantifizierung diffuser Abwärmepotenziale eine große Herausforderung ist und derzeit auch kaum im Fokus der Betrachtungen steht. Grund hierfür sind fehlende realisierbare Konzepte zur Nutzung dieses Abwärmetyps. Dies wird auch in der Literaturrecherche deutlich. Zwar gibt es viele Ansätze zur Weiterentwicklung von Abwärmetechnologien, die gefasste Abwärmeströme hinter dem Regenerator/Rekuperator oder hinter der später folgenden Abgasreinigung rückgewinnen, jedoch keine einzige, die diffuse Abwärme nutzen kann [13]. Dies wird später in der Betrachtung der technischen Perspektive näher erläutert.

3.5.4 Aktuell implementierte Konzepte zur Abwärmenutzung und zukünftige Lösungen

Ein weiterer Schwerpunkt der Literaturrecherche und der Expertengespräche waren die implementierten Konzepte zur Abwärmenutzung. Neben den Technologien, die an deutschen Produktionsstandorten bereits zum Einsatz kommen, wurden auch zukünftige Konzepte erörtert.

Wie zuvor erwähnt, ist die Wärmerückgewinnung direkt am Schmelzaggregat durch Regeneratoren oder Rekuperatoren am weitesten verbreitet. Diese ermöglicht die Nutzung eines Großteils der gefassten Abwärme aus dem Verbrennungsprozess der Wanne. Im Vergleich zum Rekuperator ist der Regenerator deutlich größer und effizienter. Dennoch gibt es auch beim Regenerator eine große Spannweite der Wirkungsgrade. So kann die Energierückgewinnung beispielsweise durch eine größere Menge an Feuerfestmaterial erhöht werden. Eine potenzielle Hürde stellen jedoch die Kosten für das Material selbst sowie für die Änderung der Wannen-Infrastruktur dar. Ebenso mangelt es häufig am benötigten Platz. Der Wirkungsgrad bei Regeneratoren kann auch durch den Einsatz speziell geformter Packlagen erhöht werden. Hier dominiert zum jetzigen Zeitpunkt das profilierte Kreuzgittersystem. Insgesamt beträgt der maximale theoretische Wirkungsgrad 77 %, allerdings ist es in der Praxis schwierig einen Wirkungsgrad von 70 % mit kostengünstigen Mitteln zu überschreiten [13].

Eine weitere Möglichkeit, insbesondere die diffusen Abwärmeströme an der Wanne zu minimieren, ist eine Verbesserung der Isolierung. Eine zusätzliche Isolierung in gewissen Bereichen ist häufig ohne strukturelles Schadensrisiko möglich, jedoch werden verschiedene Arten je nach Wannenteil und Betriebsbedingungen benötigt. Auch können nicht alle Teile der Wanne isoliert werden, wie z. B. die Glaspiegellinie oder der Durchlass. Zusätzlich können Wärmeverluste am Regenerator bis zu 50 % durch aufgespritzte Fasern auf der Struktur des Regenerators reduziert werden. Diese Form der Isolierung schließt alle Risse an der Struktur des Regenerators und reduziert so das Austreten von Heißluft als auch das Eintreten von Kaltluft [13].

Als weitere weitverbreitete Abwärmenutzung wurden Turbinen und Wärmetauscher von den befragten Experten genannt. Die gewonnene Abwärme wird dabei häufig intern zu Heizzwecken genutzt. Wird gewonnene Abwärme nicht intern genutzt, so kann diese auch über Fernwärmeleitungen an benachbarte Industrieanlagen oder Gebäude z. B. zu Heizzwecken abgegeben werden. Diese Art der

Nutzung ist jedoch stark limitiert von Standortfaktoren, wie z. B. dem Vorhandensein von externen Wärmeabnehmern, und den vergleichsweise nur noch geringen Temperaturen, die nach interner Nutzung oder Prozessverlusten noch zur Verfügung stehen.

In der Flachglasindustrie kommen bei vielen Unternehmen heute Abhitzekessel zum Einsatz. Sie werden in der Praxis ausschließlich dem Regenerator bzw. Rekuperatorsystem nachgeschaltet und dienen Wärmezwecken oder der Stromerzeugung. Wird ein Abhitzekessel zur Stromerzeugung verwendet, wird dieser mittels geeignetem Dampfmotor oder einer Turbine erzeugt. Der Strom kann dann für den Betrieb von Werksanlagen wie Luftkompressoren oder Ventilatoren für den Formgebungsprozess genutzt werden. Die rückgewinnbare Abwärme ist teilweise für eine wirksame Energieerzeugung zu gering, sodass teilweise eine Zusatzfeuerung nötig ist. Dieses Problem besteht weniger, wenn anstelle eines Regenerators ein Rekuperator verwendet wird, da die Temperaturen des Abgases in dem Fall höher sind, oder wenn die Abgase aus mehreren Wannen zusammengelegt werden können. Bisher kommen Abhitzekessel nur bei einigen Behälterglasanlagen zum Einsatz, jedoch nutzen sie die meisten Floatglasanlagen [13]. In der Behälterglasbranche stellt der Einsatz von Vorwärmern von Gemenge und/oder Scherben eine weitere Möglichkeit zur prozessinternen Nutzung der vorhandenen Abwärme des Abgases dar. In Deutschland kommt vor allem die indirekte Vorwärmung zum Einsatz. Bei dieser Methode wird ein Kreuzstrom-Plattenwärmetauscher verwendet, der die Scherben und das Gemenge auf ca. 300-400 °C vorwärmt. Das Abgas sollte dabei vor Eintritt in den Vorwärmer auf mindestens 600 °C heruntergekühlt werden, da im Gemenge ansonsten Reaktionen anlaufen können und Verpackungen auftreten könnten. Der teilweise in den USA verwendete Praxair EGB Filter, ein Hybridsystem aus Elektrofilter und direktem Scherben-Vorwärmer, wurde in Europe bisher noch nicht genutzt [13].

Theoretisch kann der Scherben- und Gemengevorwärmer bei jeder Wanne verwendet werden, bei der der Scherbenanteil im Gemenge über 50 % liegt. Aus diesem Grund zeichneten sich in den Interviews branchenspezifische Unterschiede ab. So ist der Fremdscherbeneinsatz in der Flachglasproduktion weniger üblich als in der Behälterglasindustrie mit Recyclingscherbenquoten bis 90 %. Bei einem geringeren Scherbengehalt im Gemenge besteht eine höhere Gefahr einer Gemengeverbackung und damit einer Blockade des Vorwärmers insbesondere bei der Flachglasherstellung. Darüber hinaus ist die Produktionsqualität von Flachglas anfälliger für Verunreinigungen durch z. B. Kunststoffanhaftungen oder Keramiken in recycelten Scherben. Eigenscherbengehalte (vom Bordenschnitt) bis 25 % sind jedoch auch in der Flachglasindustrie üblich.

Die Verbreitung von Gemenge- und Scherbenvorwärmern ist in Deutschland noch nicht groß, da hohe Investitionskosten getätigt werden müssen und häufig der nötige Platz fehlt. Auch können die Vorwärmer bislang nur für Wannen eingesetzt werden, die mit fossilen Brennstoffen beheizt werden. Die neuesten Entwicklungen für Gemenge- und Scherbenvorwärmer versuchen die Einsatzfähigkeit zu erweitern. So gab es bereits im Jahr 2007 ein Pilotprojekt, bei dem ein Scherben- und Gemengevorwärmer an eine Oxyfuel-Wanne angebracht wurde. Ein weiteres Forschungsthema ist die Entwicklung eines Gemenge- und Scherbenvorwärmers für Hochtemperaturen des Abgases von 1.200-1.400 °C, der das Gemenge auf rund 500 °C erwärmt. Dadurch müssten die Abgase nur leicht oder gar nicht gekühlt werden [13]. Allerdings ginge der Energieeinsparungseffekt der Luftvorwärmung mit dem Regenerator verloren bzw. es muss darauf geachtet werden, mit welcher Maßnahme die Energieeffizienz der Prozesskette am besten ist.

Die Interviews vermittelten ebenfalls den Eindruck, dass sich die Industrie stark mit Abwärme-Technologien zur Erzeugung von Strom, Prozesskälte und Druckluft auseinandersetzt. Jedoch wurden nur in vereinzelten Fällen derartige Lösungen umgesetzt, wie z. B. der Einsatz eines Spilling-Motors zur Stromerzeugung. ORC-Anlagen werden meist als technisch interessantes Konzept beurteilt, kommen aber praktisch kaum zum Einsatz. Mögliche Gründe dafür werden in Kapitel 3.5.5 aufgeführt.

In der Diskussion mit Industrieexperten wurde auch die Nutzung der Abwärme von Kühltürmen thematisiert. Hier offenbarten die Interviews noch teilweise ungehobene Abwärmepotenziale. Die Nutzung

der Abwärme wird zwar durchweg als theoretisch sinnvoll eingestuft, ist aber unter den aktuellen Randbedingungen (geringe, zum Teil ungefasste Massenströme; niedriges Temperaturniveau ($<250^{\circ}\text{C}$); niedrige Energiekosten) häufig nicht wirtschaftlich. Nur in Ausnahmen wurden hier Konzepte implementiert, wenn dies in der Abgasstrecke technisch möglich war. Ein sinnvoller Weg, der bereits bei einigen Glasherstellern verfolgt wird, ist die Nutzung der Eigenwärme der Glasprodukte im Kühlprozess zur Minderung der mechanischen Spannungen im Produkt, sodass dem Prozessschritt keine zusätzliche (Primär-) Energie zugeführt werden muss.

3.5.5 Identifizierte Barrieren aus Sicht der Industrie

Ein weiterer wichtiger Themenblock der Interviewleitfäden sind Barrieren der Abwärmenutzung und mögliche Lösungsansätze. Aus den Gesprächen konnten sich vier Schwerpunkte bzw. Kategorien ableiten lassen:

- Wirtschaftliche Barrieren
- Regulatorische Barrieren
- Technologische Barrieren
- Limitierte Abnahmepotenziale

Neben Barrieren finanzieller Natur, wurden häufig die regulatorischen Rahmenbedingungen bemängelt. Oft begründen sich wirtschaftliche Barrieren in der derzeitigen Gesetzgebung, wie zum Beispiel in der EEG-Umlage und Besteuerung der Eigenstromproduktion. Neben technologischen Barrieren, wie z. B. unzulängliche technologische Reife von Lösungskonzepten, wurden zudem strukturelle Barrieren angeführt, die sich als limitierte Abnahmepotenziale zusammenfassen lassen. Findet die Abwärmenutzung in thermischer Form statt, müssen z. B. genügend Abwärme-Senken zur Verfügung stehen, um Potenziale voll auszuschöpfen. Dies ist bei weitem nicht immer gegeben. Kapitel 6 geht auf die identifizierten Barrieren detailliert ein.

4 Abwärmepotenziale

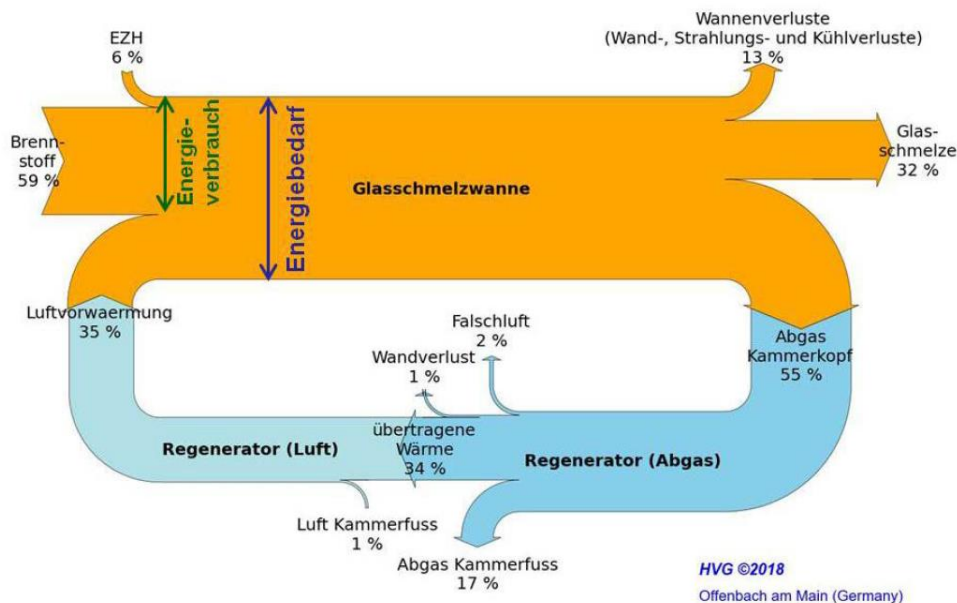
Im Folgenden sollen die Abwärmepotenziale der Glasindustrie anhand verschiedener Fallstudien ermittelt werden. Es wird dabei zwischen vier Potenzialbegriffen unterschieden, die im Kapitel 4.1.2 näher beschrieben werden.

4.1 Grundlagen

4.1.1 Bestehende Wärmerückgewinnung mit Regenerator und Rekuperator

Schon der erste Glasschmelz-Wannenofen in Deutschland vor über 150 Jahren setzte das Prinzip der Wärmerückgewinnung der im Abgas enthaltenen Restwärme zur Vorwärmung der Verbrennungsluft und des Brenngases um. Seit über 150 Jahren ist der Regenerator bei den meisten Glasschmelzwannen integrativer Bestandteil der Schmelzanlage und hilft, die benötigten Verbrennungstemperaturen zu erreichen und Brennstoff einzusparen. Abbildung 14 dokumentiert für eine typische regenerativ beheizte U-Flammenwanne bei der Behälterglasproduktion die einzelnen Energiebeiträge zur Erzeugung eines Behälterglases in verkaufsfähiger Qualität. Ca. 60 bis 65 % der aufgebrauchten Energie stammt je nach Optimierungsgrad und Alter der Wanne von Energieträgern, während der restliche Anteil der eingebrachten Energie aus dem Wärmehalt des Abgases wiedergewonnen wird.

Abbildung 14: Bilanzierung des Endenergiebedarfs einer typischen Glasschmelzwanne [7]



Als Energieträger kommt zurzeit in über 90 % der Wannen Erdgas zum Einsatz. Der Anteil an elektrischer Energie zum Schmelzen von (Behälter-)Glas beträgt typischer Weise ca. 10 % der durch fossile Energieträger eingebrachten Energie.

Seit der Einführung der heute üblichen Schmelzaggregate durch Friedrich Siemens im Jahr 1867 ist die regenerative Wärmerückgewinnung Bestandteil der Wannenöfen und trägt durch die direkte Nutzung effektiv zur Verminderung des Energieträgerverbrauches bei. Die Wärmerückgewinnung wurde stetig verbessert und liegt heute im Bereich des physikalischen Optimums, insofern bauliche Beschränkungen dies nicht verhindern.

Etwas mehr als 60 % aller Glasschmelzwannen, im Flachglasbereich sogar über 75%, werden mit einer regenerativen Wärmerückgewinnung betrieben und ca. 6 % mit einer rekuperativen Wärmerückgewinnung, die allerdings nicht ganz so effektiv ist.

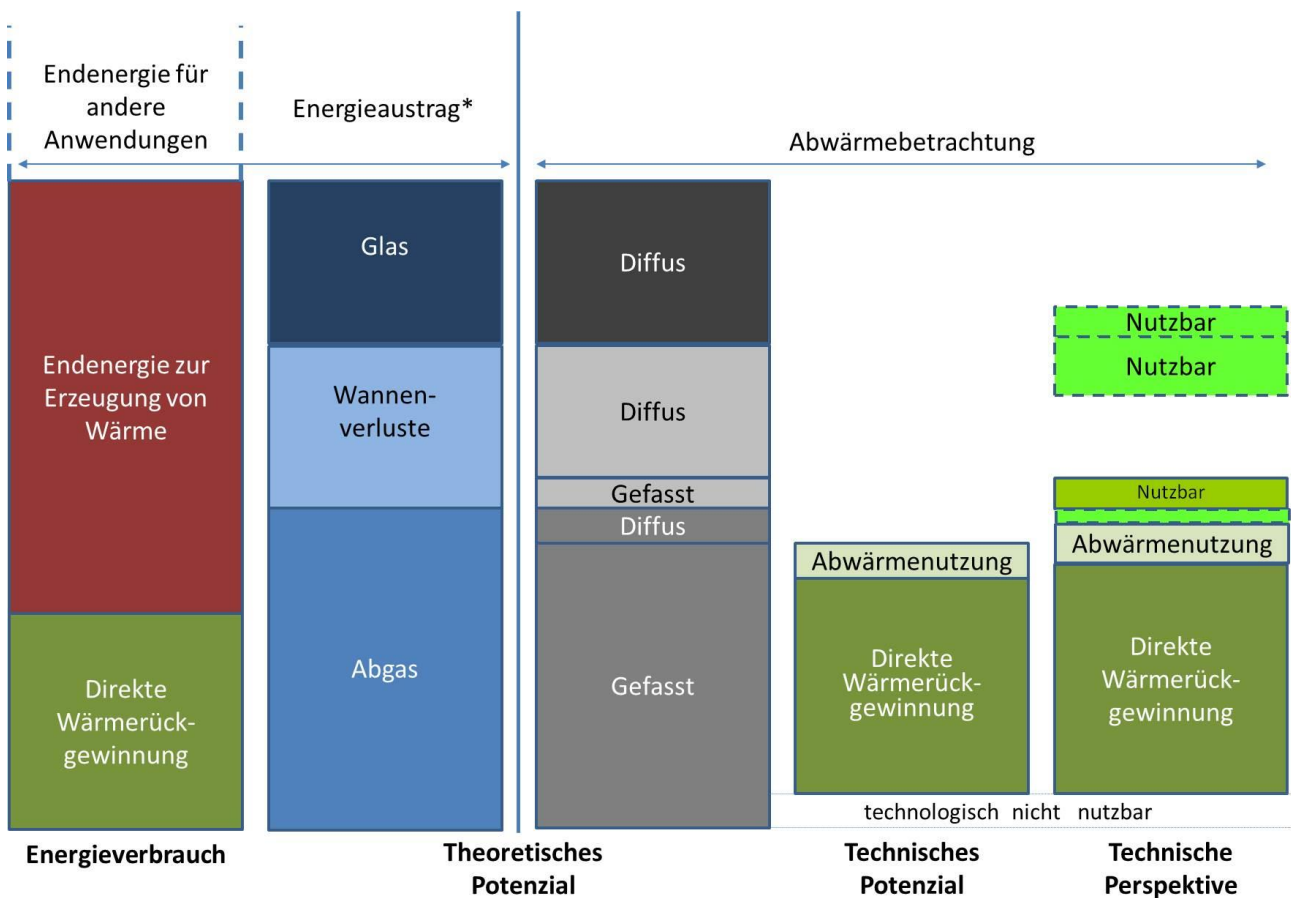
4.1.2 Definition des Abwärmebegriffs

Grundsätzlich kann man zwischen einem gefassten und einem diffusen Abwärmestrom unterscheiden. Gefasste Abwärmeströme sind an einen Medienstrom gebunden. Dies können Kühlflüssigkeit, Abluft- oder Abgasströme oder auch ein im Produkt gefasster Wärmestrom sein. Wichtig dabei ist, dass man die enthaltene Wärme gezielt von A nach B bringen kann. Diffuse Abwärmeströme entstehen hingegen großflächig und vorwiegend durch Strahlung. Um die enthaltene Wärme zu nutzen, müssen sie zunächst gefasst werden, zumindest aus heutiger technologischer Sicht. Im Rahmen dieses Berichts werden die diffusen und gefassten Wärmeströme dem theoretischen Potenzial, dem technischen Potenzial und der technischen Perspektive zugeordnet.

Das theoretische Abwärmepotenzial kann von zwei Seiten aus betrachtet werden. Auf der Eingangsseite ist es die Summe aller Energieträger, die in die Prozesskette eingebracht und die in Wärme umgewandelt werden. Dies ist der Anteil an (fossilen) Brennstoffen, elektrischer Energie und Wärmeenergie, der zum Heizen bzw. zur Temperaturerhöhung von Stoffströmen genutzt wird. Dieses theoretische Potenzial lässt sich auch aus dem Wärmeinhalt des Glases am Durchlass ermitteln, dem Wärmeinhalt des Abgases beim Verlassen des Verbrennungsraumes und den Wärmeverlusten der Wanne, zuzüglich der Abgastemperaturen der diffusen Ströme aus dem Feeder und dem Kühllofen.

Auf der anderen Seite beschreibt das *theoretische Abwärmepotenzial* sämtliche Wärmeinhalte und Wärmeabgaben im Herstellungsprozess. Diese umfassen im Stoffstrom Glas alle Wärmeabgänge vom Ausgang der Wanne bis hin zum kalten Produkt (Abbildung 15 „Glas“). Dazu zählen beispielsweise Abkühlungsverluste oder Abwärme in der Formgebung. Jegliche Abwärmeströme im Stoffstrom Glas sind diffus. Hinzu kommen Wannerverluste am Schmelzaggregat. Wannerverluste beinhalten sowohl diffuse Abwärmeströme wie Strahlungsverluste und Kühlluftverluste, als auch gefasste Abwärmeströme in Form von Kühlwasser. Im Stoffstrom Abgas (Abbildung 15 „Abgas“) sind alle Wärmabgänge in der Abgasreinigung Teil des theoretischen Abwärmepotenzials. Der Großteil der Abwärme im Abgasstrom ist gefasst (Abbildung 15 mittelgrau „gefasst“), sei es über die direkte Wärmerückgewinnung mittels Regenerator oder Rekuperator oder aber durch das Vernichten von Wärme vor dem Eintritt in den Filter oder den Kamin und die Abgabe an die Atmosphäre nach dem Kamin. Zusätzlich entsteht ein diffuser Abwärmestrom in Form von Verlusten am Filter und Regenerator (Abbildung 15 mittelgrau „diffus“).

Abbildung 15: Abwärmepotenzialbegriffe unter Berücksichtigung von Energie- und Stoffströmen und Wärmerückgewinnungstechnologien



Das *technische Potenzial*, als Teilmenge des theoretischen, bezeichnet die mit heutigen Technologien⁸ nutzbare und bereits genutzte Abwärme. Bisher werden lediglich gefasste Abwärmeströme genutzt, da es noch keine Technologien in der Anwendung gibt, welche die Nutzung diffuser Abwärme im industriellen Maßstab ermöglichen. Im Abgasstrom ergibt sich das technische Abwärmepotenzial aus dem Wärmeinhalt, der mithilfe der bereits angewendeten Wärmerückgewinnungstechnologien zurückgeführt wird. Dies geschieht vorwiegend in Form der direkten Wärmerückgewinnung durch einen Regenerator oder Rekuperator (Abbildung 15 „Direkte Wärmerückgewinnung“) im Anschluss an die Schmelzwanne, aber auch durch den Einsatz anderer Wärmerückgewinnungstechnologien vor und nach dem Filter (Abbildung 15 „Abwärmenutzung“). Der Einsatzort der Technologien vor dem Filter ist dadurch bestimmt, dass das Abgas vor Eintritt in den E-Filter auf 400 °C heruntergeköhlt werden muss, da die Sorbensmaterialien bei 250 – 450 °C mit den Inhaltsstoffen des Abgases reagieren. Dabei entsteht ein gefasster Abwärmestrom, der genutzt werden kann. Ebenso kann ein Teil des Wärmeinhaltes im Abgas vor Eintritt in den Kamin genutzt werden. Für den Erhalt des natürlichen Kaminzugs und der Vermeidung einer Unterschreitung des Säuretaupunktes (100 °C bei Erdgas und max. 180 – 210 °C bei Schwerölfeuerung mit 0,5 bis 1 Gew.-% S) muss das Abgas jedoch eine Resttemperatur von mind. 100 °C bzw. 210 °C beibehalten. Der gefasste Abwärmestrom aus dem Kamin ist aus technologi-scher Sicht nicht nutzbar.

⁸ Mit heutigen Technologien werden ausschließlich die bereits angewendeten Technologien bezeichnet.

* Beinhaltet den Energieaustrag von Wanne, Feeder und Kühlofen.

Die *technische Perspektive* umfasst alle Abwärmeströme, die bereits im technischen Potenzial enthalten sind, sowie solche Abwärmeströme, die in Zukunft mithilfe neuer Technologien nutzbar sind. So ist es denkbar, dass eine Technologie entwickelt werden kann, die die diffuse Abwärme aus der Formgebung im Stoffstrom Glas nutzen kann, beispielsweise durch eine Art Trichter, der die IS-Maschine abschirmt, oder durch Formenkühlung mit Kühlkreisläufen und entsprechenden Medien. Ein Teil der diffusen Wannenverluste könnte ebenfalls in Zukunft durch die Weiterentwicklung entsprechender Technologien genutzt werden. Eine Beispieltechnologie wäre die thermoelektrische Generation, die Wärmeleitungsverluste nutzen kann. Die gefassten Wannenverluste in Form von Kühlwasser, das die Kamera und Elektroden schützt, kann in jedem Fall genutzt werden, da es dafür keiner neuen Technologie bedarf. Ebenso könnte die direkte Wärmerückgewinnung um den Einsatz von weiteren Technologien sowie Effizienzsteigerungen ergänzt werden. Dies hat auch zur Folge, dass die diffusen Verluste im Abgasstrom verringert werden. Die verbleibenden Verluste an Regenerator und Filter könnten zumindest teilweise durch eine bessere Isolierung verringert werden.

4.2 Methodik zur Analyse von Abwärmepotenzialen

Im Folgenden wird die Methodik zur Analyse der Abwärmepotenziale für die einzelnen Fallstudien erläutert werden. Hierbei wird zum einen die Vorgehensweise beschrieben als auch wichtige Bezugsgrößen und Zahlenwerte erklärt. Eine detaillierte Beschreibung der Ermittlungsmethode der Wärmeströme findet sich in Anhang A.1. Die Berechnungsformeln zur Quantifizierung der Abwärmepotenziale pro Branche inklusive einiger Rechenbeispiele findet sich zudem in Anhang A.2.

4.2.1 Anmerkungen zu Zahlenwerten, Dimensionen und Bezugsgrößen

Es werden SI-Einheiten und SI-Vorsätze sowie abgeleitete SI-Einheiten mit besonderem Namen zur Kennzeichnung von physikalischen Größen verwendet.

- Temperaturen werden in Grad Celsius (°C) angegeben, Temperaturdifferenzen in K.
- Im Rahmen dieser Arbeit werden Energie- und Wärmeströme in Joule genannt, wenn nicht anders vermerkt. Die Bezugstemperatur für thermodynamische Berechnungen ist 25 °C und der Bezugsdruck beträgt 1013,25 hPa.
- Bei der Nennung von Massenströmen von gasförmigen Stoffen werden die Zahlen in Normkubikmeter (m³_(N)) angegeben und nicht in Betriebskubikmetern. Die Bezugstemperatur für das Volumen ist 0 °C und der Bezugsdruck entspricht 1013,25 hPa.
- Beim Bezug pro Tonne Glas handelt es sich um verkaufsfähige Tonnen, es sei denn es wird ausdrücklich anders gekennzeichnet. Damit können die verfügbaren Wirtschaftskennzahlen, die sich ebenfalls auf die verkaufsfähigen Tonnen beziehen, genutzt werden.

4.2.2 Vorgehensweise

Zur Ermittlung der Abwärmepotenziale je Branche der Glasindustrie müssen zunächst alle Wärmequellen für die relevanten Prozessschritte im Herstellungsprozess identifiziert werden. Diese können je nach Branche variieren. An den Übergängen zwischen den Prozessschritten werden die Temperaturen im Stoffstrom Glas oder im Abgasstrom von der HVG oder den Unternehmen real gemessen. Die Messungen dienen zunächst der Berechnung aller Abwärmeströme und anschließend der Zuordnung passender Abwärmetechnologien.

Die Abwärmemengen je Prozessschritt werden über die Differenz der Wärmeinhalte zwischen zwei Prozessschritten berechnet. Wie die folgende Formel zeigt, berechnet sich der Wärmestrom ΔQ aus der gemessenen Temperaturdifferenz, der Durchflussmenge und der spezifischen Wärmekapazität:

$$\Delta Q = \Delta m \cdot \Delta c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

mit Δm als Massen- oder Volumenstrom in kg bzw. $m^3_{(N)}$, c_p als isobare spezifische Wärmekapazität in $J/(kg \cdot K)$ bzw. $J/(m^3_N \cdot K)$ und ΔT als Temperaturunterschied in K.

Die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Prozessschritten basieren auf real gemessenen Temperaturen der Unternehmen und der HVG, die in repräsentativen Mittelwerten zusammengefasst werden. Der Massen- und Volumenstrom Δm bezieht sich stets auf eine Tonne verkaufsfähiges Glas. Die spezifischen Wärmekapazitäten gehen variabel in die Berechnung der Wärmeströme ein, da sie je nach Abgas- bzw. Glaszusammensetzung und dem betrachteten Temperaturbereich stark variieren. Die in diesem Bericht verwendete Berechnung der spezifischen Wärmekapazität des Abgases erfolgt entsprechend der VDI-Richtlinie 4670 (02-2003) und die des Glases auf Basis der von Prof. Conradt vorgeschlagenen Methode (HVG). Weitere Details zur Berechnungsmethode der Abwärmeströme sind in Anhang A.1 angegeben.

Die errechneten Abwärmeströme werden anhand statistischer Werte zum spezifischen Endenergieverbrauch der verschiedenen Glasbranchen (Tabelle 4) [22] kalibriert und validiert.

Um das Nutzungspotenzial der Abwärmeströme zu bewerten, werden zunächst diffuse und gefasste Abwärmeströme unterschieden. Dies hat den Grund, dass mit heutigen Abwärmetechnologien, diffuse Wärmeströme nicht nutzbar sind, gefasste Abwärmeströme generell jedoch schon. In einem zweiten Schritt wird die Nutzbarkeit der gefassten Abwärmeströme aus heutiger Sicht bewertet (technische Perspektive), d. h. es wird bewertet, ob die heutigen Abwärmerückgewinnungstechnologien diese Abwärmeströme verwerten können. In einem letzten Schritt wird die Nutzbarkeit der sowohl diffusen als auch gefassten Abwärmeströme aus der technischen Perspektive bewertet. Die technische Perspektive gibt dabei an, inwiefern eine Entwicklung von Technologien denkbar ist (oder teilweise bereits in der Entwicklung ist), die die bisher nicht nutzbaren Abwärmeströme verwerten können.

Die so bewerteten Abwärmemengen werden schließlich mit der Jahrestonnage der Branchen hochgerechnet und gehen in die Berechnung des spezifischen Abwärmepotenzial der deutschen Glasindustrie ein. Daneben geht auch die Einsatzhäufigkeit/Verbreitung einer Abwärmerückgewinnungstechnologie je Prozessschritt und Branche ein.

4.2.3 Datenermittlung

Die Ermittlung der Abwärmepotenziale je Branche geht auf verschiedene Datenquellen zurück. Grundlage für die Berechnung der Wärmeströme bilden die real gemessenen Temperaturen zwischen den einzelnen Prozessschritten je Branchen. Es handelt sich hierbei um repräsentative Mittelwerte auf Basis von Betriebswerten und Messungen der HVG. Die Mittelwertbildung ist notwendig, da die Temperaturen u. a. je nach Tonnage, Farbe des Glases und Fahrweise der Wanne stark variieren. Die spezifischen Wärmekapazitäten des Abgases und des Glases werden nach oben beschriebener Methode wissenschaftlich berechnet.

Für die Kalibrierung und Validierung der berechneten Abwärmeströme wird zudem der spezifische Endenergieeinsatz je Branche verwendet. Der fossile und elektrische Endenergieeinsatz pro Teilbranche beruht auf Daten des Statistischen Bundesamts⁹ und ist in Tabelle 4 angegeben¹⁰. Entsprechend dieser Einteilung in Branchen werden die Produktionsmengen verkaufsfähiges Glas dem spezifischen Energieverbrauch zugeordnet. Die Produktionsmengen beruhen auf Angaben des BV Glas [20] und werden zur Hochrechnung der Abwärmepotenziale für die gesamte deutsche Glasindustrie benötigt.

⁹ Jährliche Tabelle des Statistischen Bundesamtes in Wiesbaden: 060_Tab02_mit_GH_yyyy.xlsx; erhältlich auf Anfrage beim Bundesamt

¹⁰ Steinwolle wird nicht ausgegeben und Wasserglas wird nicht in den statistischen Daten erfasst. Steinwolle wird zwar erfasst, aber der Energieverbrauch wird nicht als Einzelwert ausgewiesen, sondern ist Teil einer übergeordneten Summe. Im Fall von Steinwolle werden typische Verbrauchsdaten für die Herstellung von Steinwolle genutzt [22]. Für Wasserglas konnte auf denselben Bericht der HVG und aktuelle Messergebnisse zurückgegriffen werden.

So werden beispielsweise die Produktionsmengen der Behälterglasindustrie dem Energieverbrauch der gesamten Hohlglasindustrie zugeordnet, da 99 % der Tonnage (2015) durch die Behälterglasproduktion bereitgestellt werden und weniger als 1 % durch die Wirtschaftsglasherstellung.

Tabelle 4: Berechneter spezifischer Endenergieverbrauch für verschiedene Glasbranchen (2015)

Produkt	NACE / Prodcom	Energieeinsatz fossil [MJ/t]	Energieeinsatz elektrisch [MJ/t]	Quelle
Hohlglas (Behälterglas & Wirtschaftsglas)	23.13	5896	1.451	Stat. Bundesamt
Flachglas	23.11	8247	906	Stat. Bundesamt
Gebrauchs- u. Spezialglas	23.19	1.0720	4.327	Stat. Bundesamt
Glasfaser	23.14	11.559	4.173	Stat. Bundesamt
Steinwolle	23.99.19.10	5.000	2.500	Typische Verbrauchsdaten
Wasserglas	-	5.525	975	HVG: Interner Bericht und aktuelle Messungen

Für die sechs ausgewählten Branchen und die typischen Prozessketten (vgl. Tabelle 1) werden im Folgenden Abschätzungen der Abwärmepotenziale vorgenommen. Durch die Aufbereitung der verfügbaren statistischen bzw. wirtschaftlichen Daten, realer Messwerte sowie wissenschaftlichen Berechnungen zu der spezifischen Wärmekapazität von Abgas und Glas ergeben sich die in Kapitel 4.3 gezeigten Mengen.

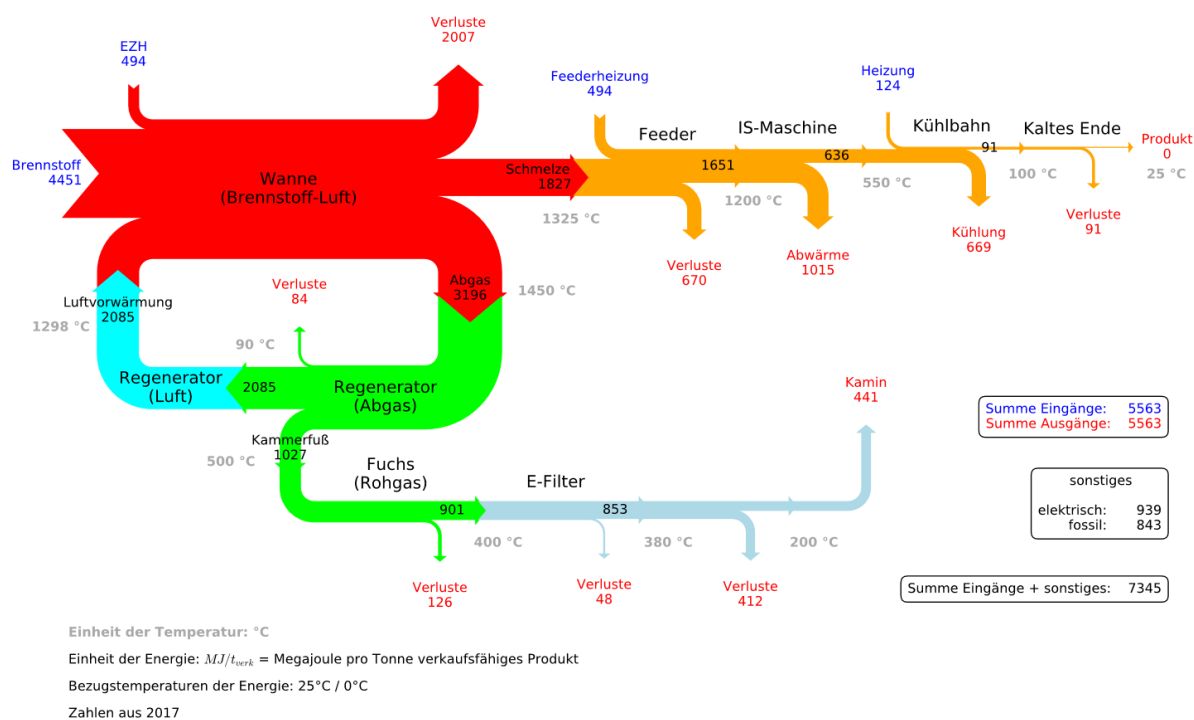
Grundsätzlich sei daran erinnert, dass die Temperaturangaben in den folgenden Sankey-Diagrammen Größenordnungen widerspiegeln sollen und in der industriellen Praxis Abweichungen bis zu 50 K bei einigen Werten nicht unüblich sind. Aus diesem Grund sind auch die Angaben zu Wärmeinhalten und Wärmeströmen als Angabe einer Größenordnung zu betrachten. Die exakten Werte im Diagramm ergeben sich aus Wärmebilanzbetrachtungen mit den vorhandenen Startwerten des Energieverbrauches und den Mittelwerten der Temperaturen aus Messungen der HVG und der Glashersteller.

4.3 Abschätzung je Branche

4.3.1 Hohlglas

Die Wärmeströme im Produktionsprozess von Hohlglas sind mithilfe eines Sankey-Diagramms in Abbildung 16 dargestellt. Der Produktionsprozess lässt sich in drei übergeordnete Prozessschritte teilen, die für die Potenzialbestimmung von Bedeutung sind: Die Schmelze, die Formgebung inklusive der Kühlung und die Abgasreinigung. Für jeden dieser Prozessschritte werden die diffusen und gefassten Abwärmeströme anhand der Temperaturen an den Prozessübergängen ermittelt. Diese werden später benötigt, um die Energie- bzw. Wärmemengen abzuschätzen, die für die Wärmerückgewinnung zur Verfügung stehen.

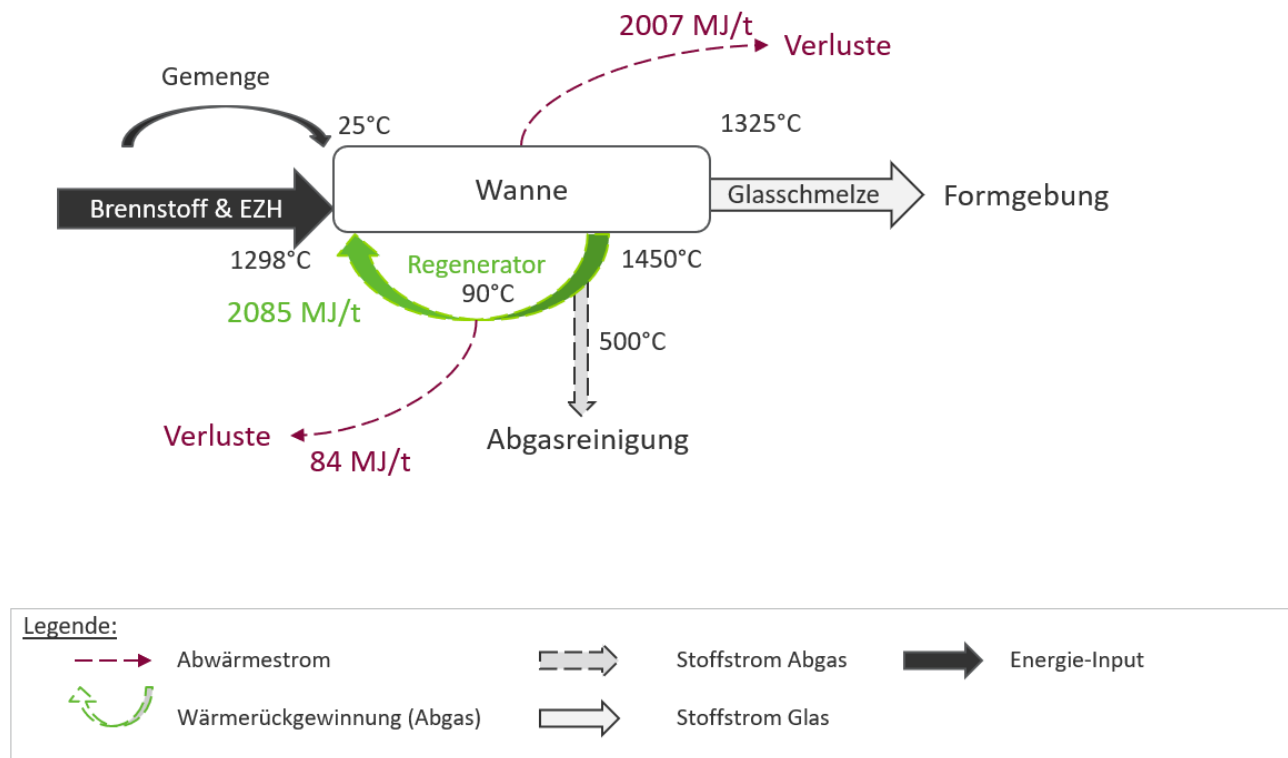
Abbildung 16: Sankey-Diagramm Hohlglasbranche



4.3.1.1 Schmelzaggregat

In der Hohlglasindustrie werden vornehmlich regenerative U-Flammenwannen als Schmelzaggregat eingesetzt. Wie Abbildung 17 zeigt, wird das Gemenge, nachdem die Rohstoffe vermisch wurden, in der Schmelzwanne von ca. 25 °C auf 1.430 °C erhitzt und so geschmolzen. An der Schmelzwanne treten dabei diffuse Abgasströme aus, die als Wannerverluste zusammengefasst werden können. Diese Verluste umfassen u. a. diffuse Strahlungsverluste, diffuse Verluste durch Kühlluft und gefasste Abwärme in Form von Kühlwasser.

Abbildung 17: Schematische Darstellung der Abwärmeströme am Schmelzaggregat der Hohlglasindustrie

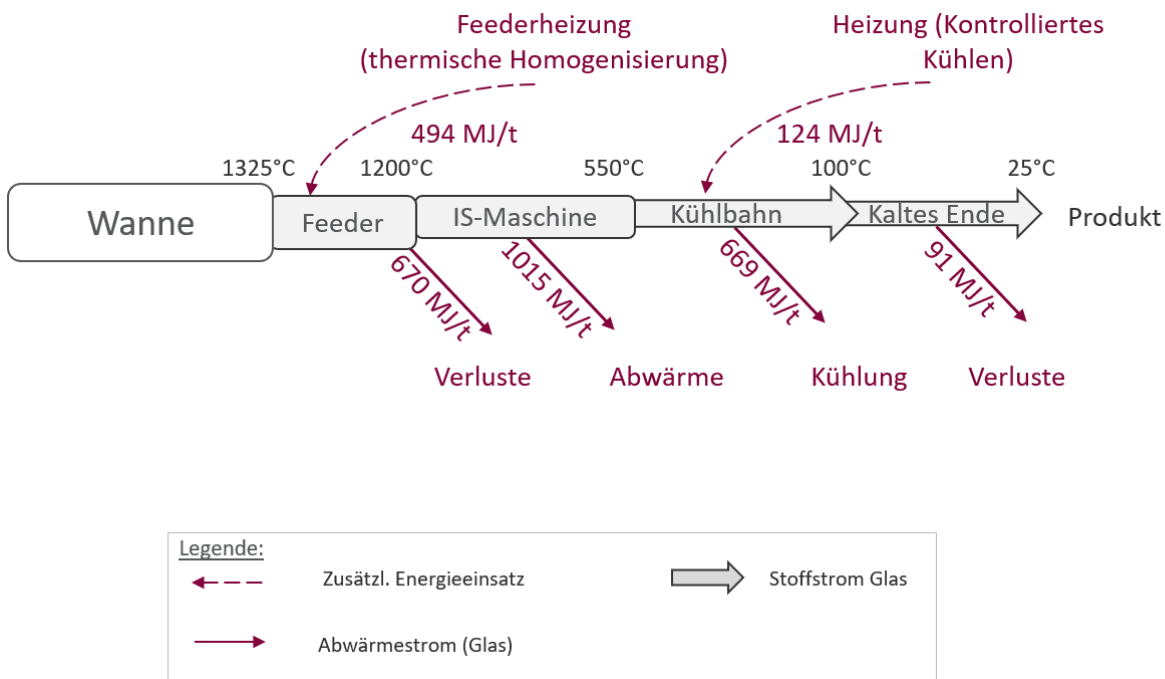


Von der Schmelzwanne gelangt die Schmelze mit 1.325 °C auf den Weg zum Formgebungsprozess. Das Abgas verlässt die Wanne mit 1.450 °C in den Regenerator oder Rekuperator. Da die Abgasreinigung mittels E-Filter, wie in Kapitel 2.3.4 erläutert, bei Temperaturen von ca. 400 °C – 500 °C erfolgen sollte, muss das Abgas zunächst runtergekühlt werden. Ein Großteil der überschüssigen Wärme wird über den Regenerator bzw. Rekuperator zurück in die Schmelzwanne geführt und verringert so den Endenergiebedarf der Wanne. Am Regenerator kommt es u. a. durch Falschluf zu Verlusten, die jedoch deutlich geringer sind als die zuvor beschriebenen Wannenverluste. Vom Regenerator gelangt schließlich das Abgas mit einer Temperatur von ca. 500 °C in den Fuchs (Abgaskanal) auf dem Weg zur Abgasreinigung.

4.3.1.2 Formgebung und Kühlung

Im Feederkanal kommt die thermische Homogenisierung zum Abschluss, die schon in der Wanne nach Passieren des Hot-Spot einsetzt. Wie Abbildung 18 zeigt, fließt das Glas vom Durchlass über den Feeder in die darunter stehende IS-Maschine. Hierbei entsteht ein ungefasster Abwärmeverlust, der der Temperaturdifferenz zwischen 1.325 °C und 1.200 °C beim Verlassen des Kanals im Feederkopf entspricht. Die Temperatur des Glases beim Tropfenschnitt variiert je nach Tropfengewicht, Tonnage, Glasfarbe u. a. Rand- bzw. Betriebsparametern.

Abbildung 18: Schematische Darstellung der Abwärmeströme in der Formgebung der Hohlglasindustrie



Der größte ungefasste Wärmeverlust entsteht allerdings in der darauffolgenden Formgebung und Kühlung. Während des Formgebungsprozesses mittels IS-Maschine kühlt die Schmelze von ca. 1.200 °C auf 550 °C innerhalb weniger Sekunden ab und muss am Ende der Formgebung formstabil sein. Bei der anschließenden sogenannten Kühlung wird das Glas unter Einsatz zusätzlicher Energie kontrolliert von 550 °C auf 100 °C abgekühlt. Dabei entsteht ein weiterer ungefasster Abwärmestrom im Massestrom Glas, der dieser Temperaturdifferenz entspricht. Im letzten Schritt, dem sogenannten kalten Ende, kühlt das Glas schließlich auf 25 °C ab. Die Abwärmeströme im Massestrom Glas lassen sich nur schwer fassen, da es sich um offene Bauteile handelt, die in der Halle schwer abzuschirmen sind bzw. bewusst offen gestaltet wurden, um einen ausreichenden lokalen Kühleffekt zu bekommen.

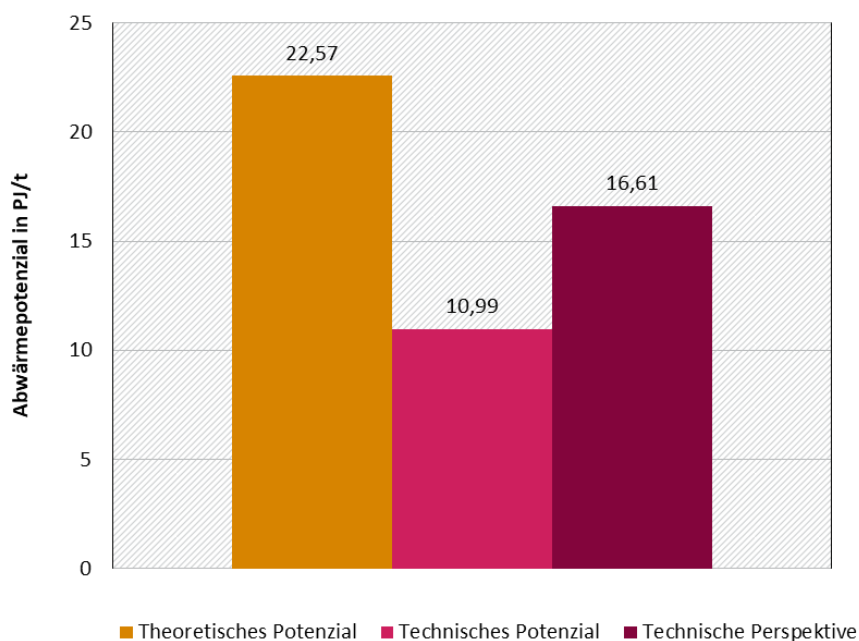
4.3.1.3 Abgas aus Verbrennung hinter Schmelzaggregat/Abgasreinigung

Das Abgas gelangt nach dem Regenerator mit ca. 500 °C in den Fuchs und damit in die Abgasreinigung. Da eine optimale Reaktion von Sorptionsmittel und Abgasbestandteilen jedoch bei einer Temperatur von bereits 450 bis 350 °C erreicht wird, kann die überschüssige Wärme zwischen Kammerfuß und E-Filter (im Mittel bis 400 °C) genutzt werden. Während der Abgasreinigung im E-Filter fällt die Temperatur des Abgases um ca. 20 K auf etwa 380 °C. Dies geschieht aufgrund von Wandverlusten am E-Filter. Um den Säuretaupunkt im Kamin nicht zu unterschreiten (siehe Kapitel 2.3.5) und einen natürlichen Kaminzug zu erhalten, muss das Abgas eine Temperatur von mindestens 200 °C haben. Somit kann ein weiterer Abwärmestrom, in Höhe der Temperaturdifferenz von 380 °C und 200 °C genutzt werden.

4.3.1.4 Abwärmepotenzial in der Hohlglasindustrie

In diesem Kapitel werden im Herstellungsprozess entstehende Abwärmeströme den verschiedenen Abwärmepotenzialen zugeordnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 19 zusammengefasst und wird im Folgenden hergeleitet.

Abbildung 19: Abwärmepotenziale der Hohlglasindustrie



Anhand der Temperaturdifferenzen zwischen den zuvor beschriebenen Prozessschritten, können die zugehörigen Abwärmeströme pro Tonne verkaufsfähigem Glas spezifiziert werden. Tabelle 5 soll dazu eine Übersicht über die Abwärmeströme geben.

Tabelle 5: Abwärmeströme im Herstellungsprozess von Hohlglas

Prozessschritt		Stoffstrom	Genutzte Abwärme [MJ/t]	Gefasste Abwärme [MJ/t]	Diffuse Abwärme [MJ/t]	Eingangs- und Ausgangstemperatur [°C]	Beschreibung der Abwärme
Schmelze	Schmelzwannenverluste		-	241	1.766	Max. Gewölbertemperatur ca. 1.600 °C	Wannenverluste (Strahlungsverluste an Wanne, Kühlluft, Kühlwasser)
	Wärmerückgewinnung (Regenerator/Rekuperator)	Abgas	2.085	-	84	1.450 – 500	Wärmerückgewinnung durch Regenerator, Verluste an Regenerator
Formgebung & Kühlung	Durchlass/Feeder/Überlauf	Glas	-	-	670	1.325 – 1.200	Auskühlung zwischen Ausgang Wanne und Feeder
	Formgebung		-	-	1.015	1.200 – 550	IS-Maschine
	Kühlbahn		-	-	669	550 – 100	Kontrolliertes Abkühlen
	Kaltes Ende		-	-	91	100 – 25	Abkühlung des Produktes

Prozessschritt		Stoffstrom	Genutzte Abwärme [MJ/t]	Gefasste Abwärme [MJ/t]	Diffuse Abwärme [MJ/t]	Eingangs- und Ausgangstemperatur [°C]	Beschreibung der Abwärme
Abgasreinigung	Fuchs	Abgas	-	126		500 - 400	Reaktionsaktivität der Absorptionsmittel im E-Filter bei 400°C erhalten
	E-Filter		-		48	400 - 380	Diffuse Wärmeverlust am E-Filter
	E-Filter bis Kamin		-	412		380 - 200	Säuretaupunkt von 200°C darf nicht unterschritten werden
	Kamin			441		200	Technologisch nicht nutzbare Abwärme
Summe			2.085	779	4.343		

	= technisches Potenzial
	=aus technischer Perspektive vollständig nutzbar
	=aus technischer Perspektive teilweise nutzbar

Anhand des Fallbeispiels einer regenerativen U-Flammenwanne, zeigt sich, dass ca. 2.085 MJ/t bereits über den Regenerator zurückgewonnen werden. Daneben entstehen insgesamt 779 MJ/t gefasste Abwärmeströme, von denen heute bereits 126 MJ/t vor dem Filter und 412 MJ/t nach dem Filter genutzt werden können. In Zukunft kann auch das Kühlwasser aus dem Schmelzaggregat genutzt werden. Die gefasste Abwärme aus dem Kamin (441 MJ/t) kann jedoch aus technologischer Sicht nicht genutzt werden, ohne den zusätzlichen Einsatz elektrischer Energie für das dann nötige Gebläse. Daneben entstehen diffuse Abwärmeströme in Höhe von insgesamt 4.343 MJ/t, die teilweise in Zukunft mittels neuer Technologien nutzbar sein könnten. Dies betrifft zum einen die Abwärme aus der Formgebung sowie einen Teil der Verluste an Wanne, Regenerator und E-Filter. Diese Form der Abwärmenutzung bedarf jedoch der Entwicklung bzw. Weiterentwicklung neuer Technologien, die diffuse Abwärme nutzen können bzw. sie aufgrund einer besseren Isolierung vermeiden. Hier ist beispielsweise die thermoelektrische Generation zu nennen, die Strahlungsverluste z. B. an der Wannenwand nutzen kann. Diese Technologie muss sich aber noch etablieren.

Theoretisches und technisches Potenzial

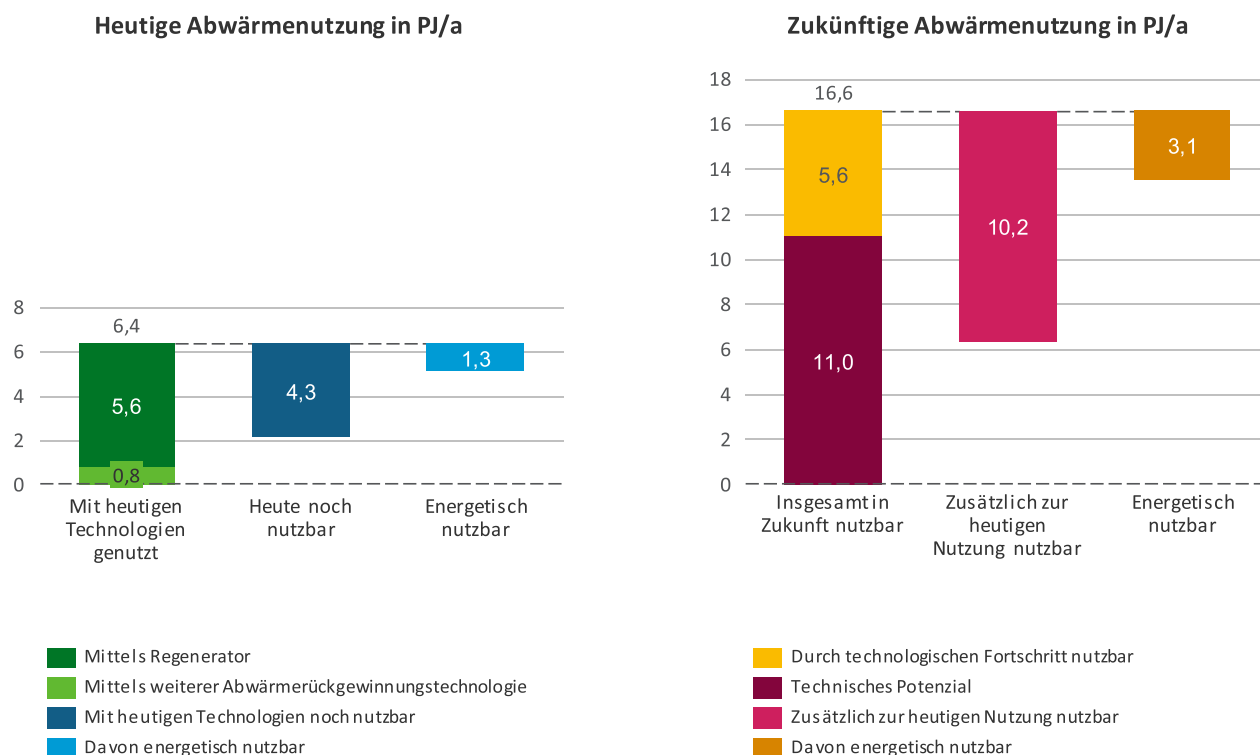
Ordnet man die Abwärmeströme den Potenzialbegriffen zu, ergibt sich für die Hohlglasindustrie ein theoretisches Potenzial von 5.563 MJ/t. Das technische Potenzial, also die Abwärme, die mit heutigen Technologien bereits nutzbar wäre, beträgt hingegen etwa 2.707 MJ/t. Die Zahl berechnet sich aus der Abwärme, die aus der Schmelzwanne in die Abgasreinigung geleitet wird (3.196 MJ/t), abzüglich der Wärme, die den Kamin verlässt (441 MJ/t) und abzüglich der Verluste am E-Filter (48 MJ/t).

Skaliert man diese Potenziale pro Tonne verkaufsfähigem Glas mit der Jahrestonnage der Hohlglasindustrie von ca. 4 Mio. Tonnen, ergeben sich die am Anfang des Kapitels in Abbildung 19 dargestellten Abwärmepotenziale. In der Hohlglasindustrie ergibt sich ein theoretisches Potenzial von 22,57 PJ/a und ein technisches Potenzial von knapp 11 PJ/a. Eine Übersicht der Abwärmepotenziale über alle Branchen hinweg wird in Abbildung 35 in Kapitel 4.4 gegeben.

Heutige Nutzung

Wie Abbildung 20 zeigt, werden vom technischen Potenzial heute bereits knapp 5,6 PJ/a mittels Regenerator genutzt. An 27 der 30 Hüttenstandorten im Bereich Hohlglas in Deutschland ist bereits mindestens eine weitere Technologie zur Wärmerückgewinnung aus den Abgasen im Einsatz (ca. 90 % der Standorte). Dabei werden ca. zwei Drittel im Bereich zwischen dem Ausgang des Regenerators/Rekuperators und dem Eingang des Filters betrieben und in etwa einem Drittel hinter dem Filter. Unter Berücksichtigung dieser Verbreitungsgrade sowie der verfügbaren gefassten Abwärme vor und nach dem Filter, lässt sich berechnen, dass im Bereich der Hohlglasfertigung heute 0,8 PJ/a thermische Energie durch einen weitere Wärmerückgewinnung zusätzlich zum Regenerator genutzt werden. Somit sind mit heutigen Technologien noch rund 4,3 PJ/a der gefassten Abwärme nutzbar. Geht man von einer Umwandlungseffizienz von 30 % aus, stehen demnach heute noch etwa 1,3 PJ/a auf der Nutzungsseite zur Verfügung. Diese Wärmemenge entspricht dem durchschnittlichen jährlichen Wärmebedarf von etwa 14.250 Einfamilienhäusern¹¹.

Abbildung 20: Heutige und zukünftige Abwärmenutzung in der Hohlglasindustrie



Technische Perspektive

In Abbildung 20 wird auf der rechten Seite die zukünftige Abwärmenutzung dargestellt. In der Zukunft kann davon ausgegangen werden, dass das technische Potenzial von knapp 11 PJ/a vollständig ausgeschöpft wird. Zusätzlich dazu kann die Abwärme aus dem Kühlwasser der Schmelzwanne genutzt werden. Der Anteil der Wannenverluste, der auf das Kühlwasser zurückzuführen ist beträgt in der Hohlglasindustrie ca. 12 % (241 MJ/t) (HVG). Die Abwärme aus der Formgebung (1.015 MJ/t) kann nur etwa zur Hälfte genutzt werden, denn selbst mit geschlossenen Kühlmittelkreisläufen kann nur ein Teil der Energie genutzt werden. Ein Teil der Temperaturabnahme der Schmelze begründet sich in der Temperaturerhaltung der Formen auf einem gewünschten Niveau von ca. 300 bis 600 °C, je nach

¹¹ Basiert auf einem durchschnittlicher Wärmeverbrauch eines Einfamilienhauses von 25.000 kWh pro Jahr (DESTATIS, 2018)

gewünschter Kontakttemperatur und Wärmeleitung der Formen. Zudem kann die Abwärme aus der Formgebung nur unter der Bedingung genutzt werden, dass die heute offenen Kühlmittelkreisläufe geschlossen werden können.

Es ist auch denkbar, dass die Wärmeleitungsverluste an der Schmelzwanne mittels thermoelektrischer Generation (TEG) genutzt werden können. Dies würde etwa einem Drittel der diffusen Wannerverluste (1.766 MJ/t) entsprechen. Im Abgasstrom könnte die direkte, prozessinterne Wärmerückgewinnung zum einen durch eine Effizienzsteigerung des Regenerators und zum anderen durch den zusätzlichen Einsatz der Gemengevorwärmung nach dem Regenerator erhöht werden. Die verbleibenden diffusen Verluste an Regenerator und dem E-Filter könnten möglicherweise durch eine bessere Isolierung vermieden werden und stünden dann für eine Abwärmenutzung in gefasster Form zur Verfügung.

In der technischen Perspektive sind demnach voraussichtlich 4.092 MJ/t nutzbar. Diese Zahl umfasst das gesamte technische Potenzial, alle gefassten Wannerverluste, etwa ein Drittel der diffusen Wannerverluste, die Hälfte der Abwärme im Formgebungsprozess sowie die Verluste am E-Filter. Skaliert man dieses Potenzial pro Tonne verkaufsfähigem Glas mit der Jahrestonnage der Hohlglasindustrie von ca. 4 Mio. Tonnen, ergibt sich eine technische Perspektive von 16,6 PJ/a.

Im Vergleich zu der heute bereits genutzten Abwärme von knapp 6,4 PJ/a, wären in Zukunft also noch rund 10,2 PJ/a nutzbar. Unter Berücksichtigung der Umwandlungseffizienz von 30 %, stehen also in der fernerer Zukunft noch knapp 3,1 PJ/a auf der Nutzungsseite zu Verfügung. Dies entspricht dem heutigen Durchschnittswärmeverbrauch von über 34.000 Einfamilienhäusern^{7 12}.

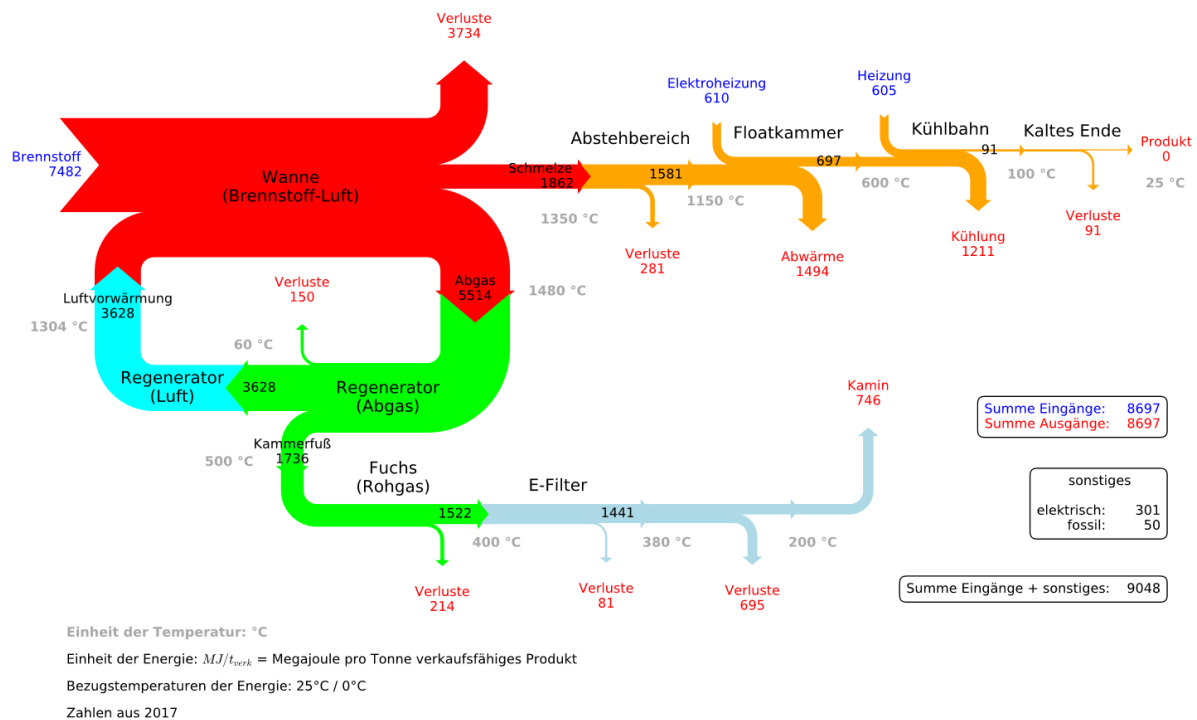
4.3.2 Flachglas

Flachglas wird überwiegend als sogenanntes Floatglas in einer Floatkammer gezogen. Hierbei kommt zumeist eine regenerativ beheizte Querbrennerwanne zum Einsatz. Analog zum Produktionsprozess von Hohlglas lässt sich die Produktion für Flachglas ebenfalls in drei übergeordnete Prozessschritte Schmelze, Formgebung/Kühlung und Abgasreinigung teilen.

Für jeden dieser Prozessschritte werden die diffusen und gefassten Abwärmeströme anhand der Temperaturen an den Prozessübergängen ermittelt. Diese Abwärmeströme sind anhand des Sankey-Diagramms in Abbildung 21 nachvollziehbar. In den folgenden Unterkapiteln wird erläutert, wie diese Abwärmemengen zustande kommen.

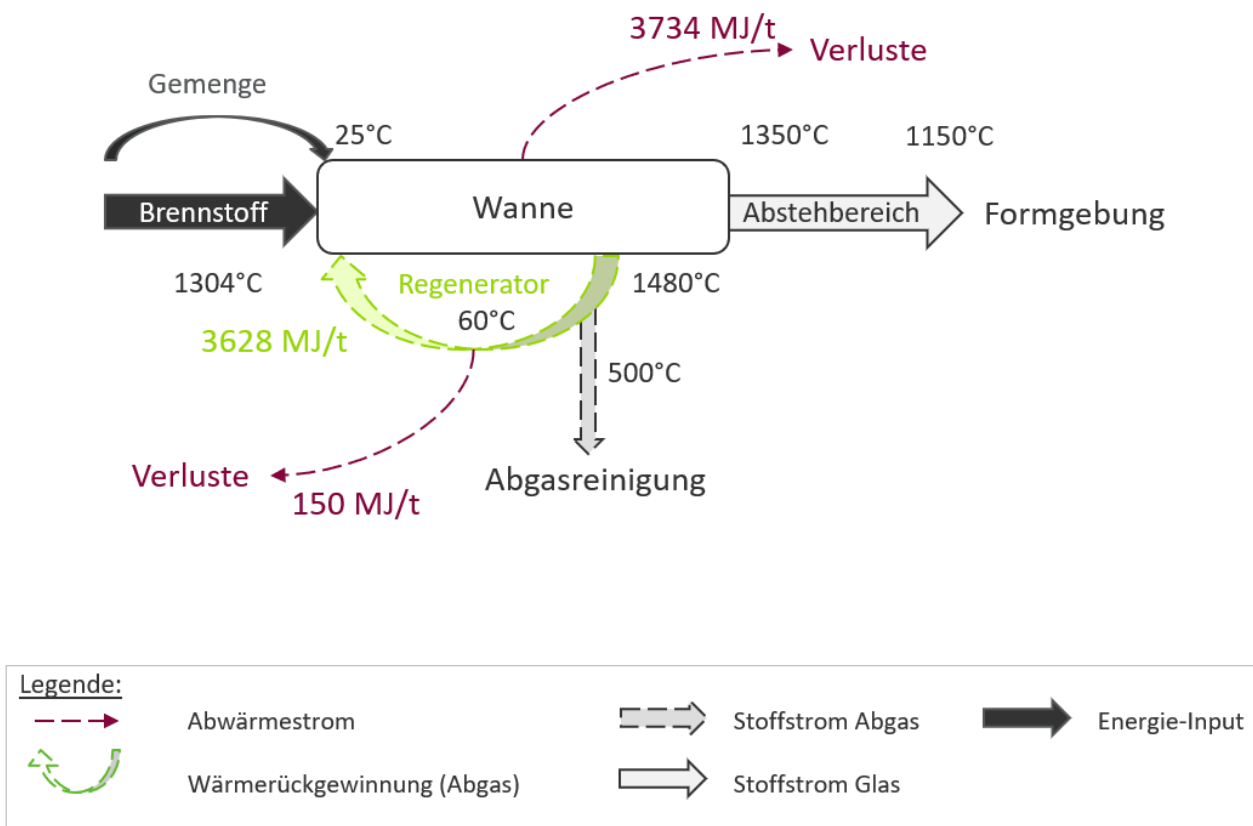
¹² Eine detaillierte Beschreibung der Berechnungen wird in Anhang A.2 gegeben.

Abbildung 21: Sankey-Diagramm in der Flachglasbranche



4.3.2.1 Schmelzaggreat

Abbildung 22: Schematische Darstellung der Abwärmeströme am Schmelzaggreat der Flachglasindustrie

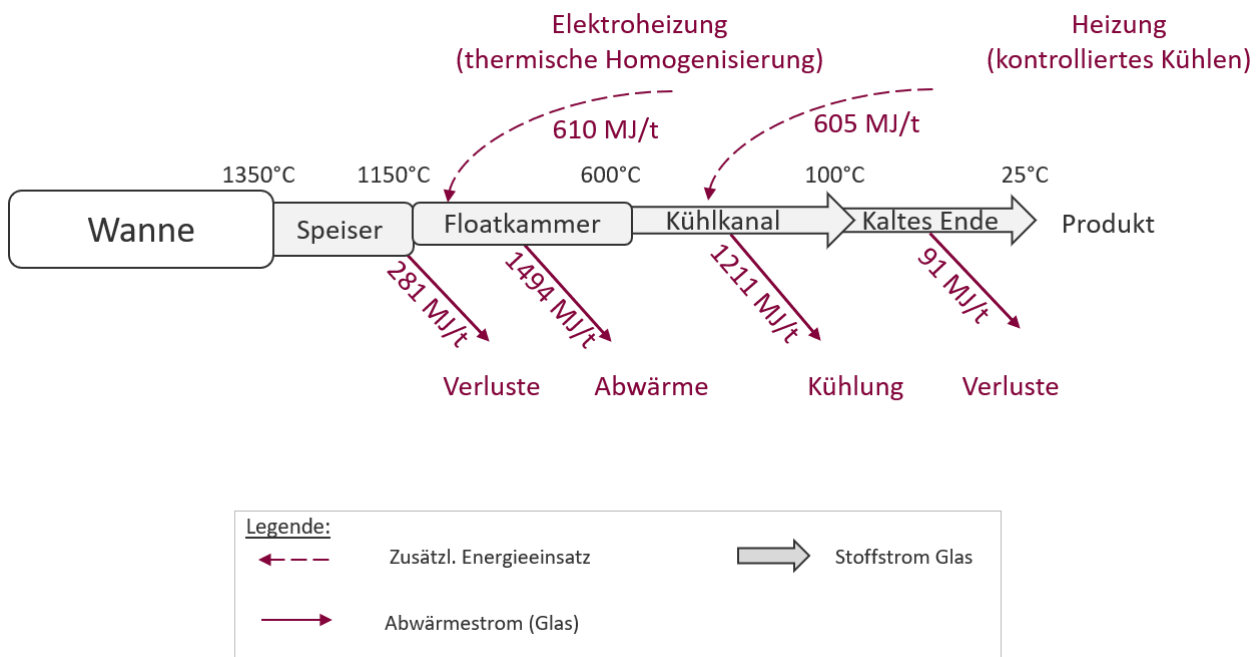


Im Flachglasherstellungsprozess wird das Gemenge in der regenerativen Querbrennerwanne auf 1.435 °C erhitzt und geschmolzen. Dabei entstehen, wie Abbildung 22 zeigt, beachtliche Wärmeverluste an der Wanne, die u. a. durch Strahlungsverluste und Kühlluft zustande kommen. Die Glas-schmelze gelangt mit einer Temperatur von 1.150 °C von der Schmelzwanne in die Formgebung, wo sie zu Flachglas weiterverarbeitet wird. Das Abgas verlässt mit 1.480 °C die Wanne. Das Abgas wird in den Regenerator geleitet, der über die Vorwärmung der Verbrennungsluft einen Teil der enthaltenen Wärme zurück in die Schmelzwanne führt und somit Brennstoff einspart. Ähnlich wie in der Hohlglasherstellung entstehen am Regenerator diffuse Abwärmeverluste, die ungenutzt nach außen strömen. Nach Verlassen des Regenerators wird das Abgas mit ca. 500 °C zur Abgasreinigung weitergeleitet.

4.3.2.2 Formgebung und Kühlung

Der Formgebungs- und Kühlprozess ist in Abbildung 23 schematisch dargestellt. Am Ausgang der Wanne besitzt die Schmelze noch eine Temperatur von ca. 1.350 °C. Im Abstehbereich kühlt die Schmelze auf 1.150 °C ab, während der Entnahmestrom thermisch homogenisiert wird. Dadurch ergibt sich ein diffuser Abwärmestrom im Massestrom Glas. In der anschließenden Floatkammer wird das Glasband ausgeformt und das Glas erstarrt, wobei es auf 600 °C abkühlt. Hier entsteht der größte diffuse Abwärmestrom innerhalb des Formgebungs- und Kühlungsprozesses, der in die Produktionshalle abgegeben wird. Nach dem Floatbad gelangt das 600 °C kalte Glasband in den Kühlkanal, wo es kontrolliert auf ca. 100 °C abgekühlt wird. Hierdurch ergeben sich weitere Abwärmeströme in dem betrachteten Prozessschritt.

Abbildung 23: Schematische Darstellung der Abwärmeströme in der Formgebung der Flachglasindustrie

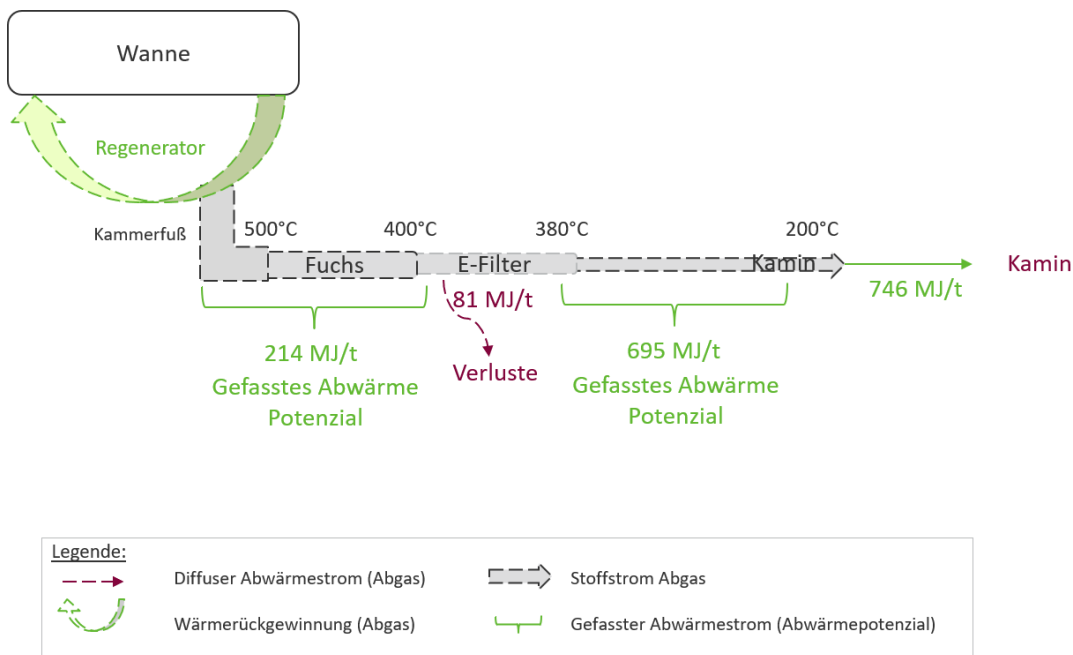


4.3.2.3 Abgas aus Verbrennung/Wanne hinter dem Schmelzaggregat

Wie in Kapitel 2.3.4 beschrieben, sollte die Abgasreinigung bei ca. 400 °C erfolgen. Da das Abgas nach der direkten Wärmerückgewinnung im Regenerator, wie im Fall von Hohlglas, allerdings eine Temperatur von 500 °C besitzt, ergibt sich hier ein gefasster Abwärmestrom, der sich aus der Differenz der Wärmeinhalte bei 500 und 400 °C errechnet. Wie Abbildung 24 zeigt, beträgt die Temperatur des Abgases nach der Abgasreinigung im E-Filter noch etwa 380 °C. Um den Säuretaupunkt im Kamin nicht zu unterschreiten (siehe Kapitel 2.3.5), muss das Abgas eine Temperatur von mindestens 200 °C haben. Somit könnte der gefasste Abwärmestrom, der sich aus der Temperaturdifferenz zwischen 380

und 200 °C ergibt, genutzt werden. Ähnlich wie in der Hohlglasherstellung entstehen zudem diffuse Abwärmeverluste am E-Filter durch Wandverluste.

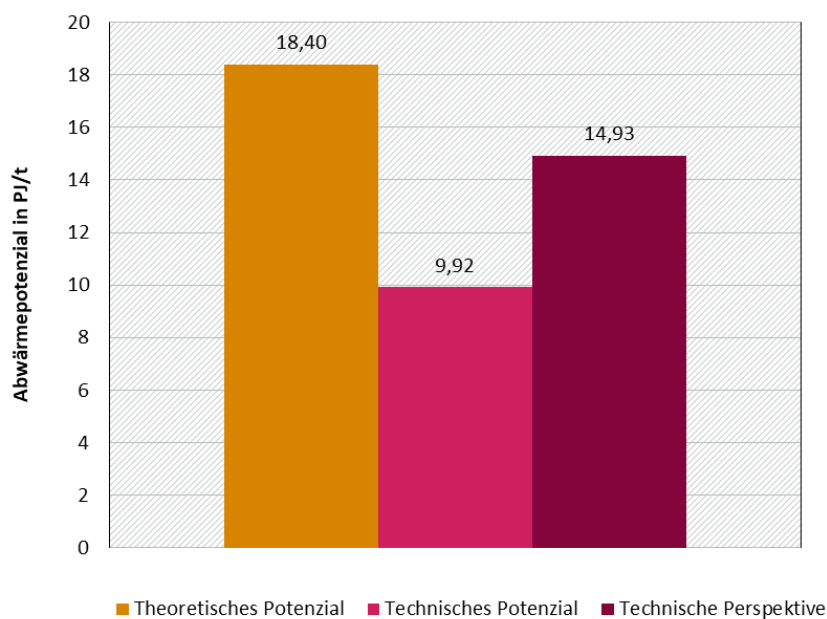
Abbildung 24: Schematische Darstellung der Abwärmeströme in der Abgasreinigung der Flachglasindustrie



4.3.2.4 Abwärmepotenzial in der Flachglasindustrie

Auch für die Flachglasindustrie sollen die Abwärmeströme im Herstellungsprozess den Abwärmepotenzialen zugeordnet werden. Das Ergebnis wird in Abbildung 25 dargestellt und soll im Folgenden näher erläutert werden.

Abbildung 25: Abwärmepotenziale der Flachglasindustrie



Anhand der Temperaturdifferenzen zwischen den zuvor beschriebenen Prozessschritten, können die zugehörigen Abwärmeströme pro Tonne verkaufsfähigem Glas spezifiziert werden. Eine Übersicht über die Abwärmeströme wird in Tabelle 6 gegeben.

Tabelle 6: Abwärmeströme im Herstellungsprozess von Flachglas

Prozessschritt		Stoffstrom	Genutzte Abwärme [MJ/t]	Gefasste Abwärme [MJ/t]	Diffuse Abwärme [MJ/t]	Eingangs- und Ausgangstemperatur [°C]	Beschreibung der Abwärme
Schmelze	Schmelzwannenverluste		-	448	3.286	Max. Gewölbetemperatur ca. 1.600 °C	Wannenverluste
	Wärmerückgewinnung (Regenerator/ Reku- perator)	Abgas	3.628	-	150	1.480 – 500	Wärmerück- gewinnung durch Regene- rator, Verluste an Regenerator
Formge- bung & Kühlung	Abstehbereich	Glas	-	-	281	1.350 – 1.150	Verluste durch Abkühlung des Produktes
	Formgebung (Floatkammer)		-	-	1.494	1150 – 600	Floatkammer Abwärme, incl. Elektro- heizung zur thermischen Homogenisie- rung
	Kühlbahn		-	-	1.211	600 – 100	Kontrolliertes Abkühlen
	Kaltes Ende		-	-	90	100 – 25	Abkühlung des Produktes
Abgasrei- nigung	Fuchs (Rohgas)	Abgas	-	214		500 – 400	Reaktionsakti- vität der Ab- sorptionsmit- tel im E-Filter bei 400 °C er- halten
	E-Filter		-		81	400 – 380	Diffuse Wär- meverlust am E-Filter
	E-Filter bis Ka- min		-	695		380 – 200	Säuretau- punkt von 200 °C darf nicht unter- schritten wer- den
	Kamin			746		200	Technologisch nicht nutzbare Abwärme
Summe			3.628	1.357	6.594		

Mithilfe des Regenerators an der Querbrennerwanne, können heute bereits etwa 3.628 MJ/t als gefasster Abwärmestrom zurückgewonnen werden. Andere gefasste Abwärmeströme in Höhe von 214 MJ/t vor dem Filter und in Höhe von 695 MJ/t nach dem Filter können über weitere

Abwärmerückgewinnungstechnologien genutzt werden. In der Zukunft könnten auch die gefassten Abwärmeströme am Schmelzaggregat genutzt werden, die auf die Kühlkreisläufe für die Ofenkamera und die Gemengeschieber in der Einlage zurückzuführen sind. Diese entsprechen ca. 12 % der gesamten Wannenverluste. Die gefasste Abwärme aus dem Kamin (746 MJ/t) kann jedoch aus technologischer Sicht auch in dieser Branche nicht genutzt werden.

Alle diffusen Abwärmeströme summieren sich zu etwa 6.594 MJ/t auf, die teilweise in Zukunft mittels neuer Technologien genutzt werden könnten. Dies betrifft zum einen die Abwärme über dem Floatbad und zum anderen Teile der Verluste an Wanne, Regenerator und Filter. Für die Nutzung der diffusen Abwärme aus der Formgebung bedarf es allerdings zunächst der Entwicklung der entsprechenden Technologien. Die Wärmeleistungsverluste an der Schmelzwanne könnten hingegen bspw. durch die thermoelektrische Generation genutzt werden. Die Verluste an Regenerator und Filter könnten zum einen durch Effizienzsteigerungen oder eine verbesserte Isolierung vermindert werden. Diese geringen Verluste stehen dann im folgenden Prozessablauf als gefasste Abwärmeströme zur Verfügung.

Theoretisches und technisches Potenzial

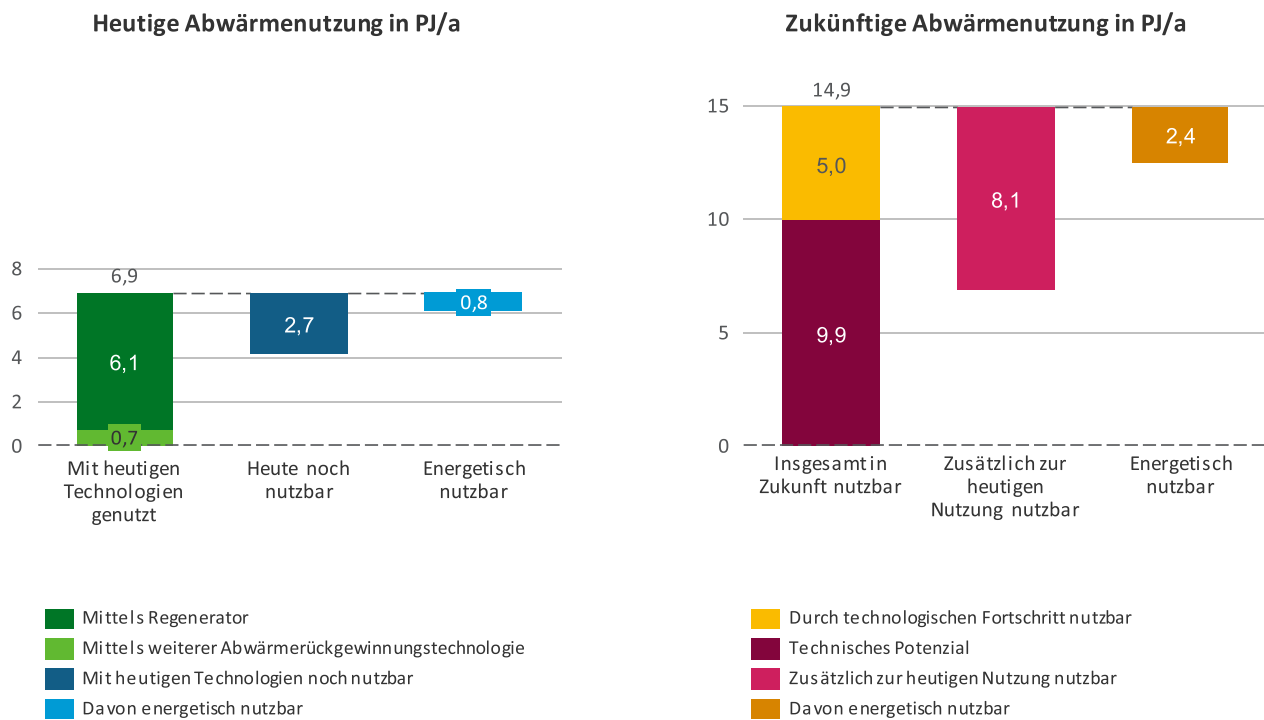
In der Zuordnung der Abwärmeströme zu den Potenzialbegriffen ergibt sich für die Flachglasindustrie ein theoretisches Potenzial von 8.697 MJ/t. Das technische Potenzial, das mit heutigen Technologien gehoben werden kann, beträgt rund 4.687 MJ pro Tonne verkaufsfähiges Glas. Analog zur Hohlglasindustrie, berechnet sich das technische Potenzial aus der Abwärme, die von der Wanne in die Abgasreinigung geht (5.514 MJ/t), abzüglich der Abwärme über den Kamin (746 MJ/t) und abzüglich der Verluste am Filter (81 MJ/t). Skaliert man diese Potenziale mit der Jahrestonnage der Flachglasindustrie von ca. 2,1 Mio. Tonnen hoch, ergibt sich ein theoretisches Potenzial von 18,4 PJ/a sowie ein technisches Potenzial von 9,9 PJ/a. Eine Übersicht der Abwärmepotenziale über alle Branchen hinweg wird in Abbildung 35 in Kapitel 4.4 gegeben.

Heutige Nutzung

Wie Abbildung 26 zeigt, werden vom technischen Potenzial heute bereits 6,1 PJ/a mittels Regenerator genutzt, da etwa 80 % der Standorte über eine regenerative Wanne verfügen. An 13 der 14 Hüttenstandorte der Flachglasbranche in Deutschland ist bereits mindestens eine weitere Technologie zur Wärmerückgewinnung aus den Abgasen im Einsatz (ca. 93 % der Standorte). Nach heutigem Wissensstand betreiben 40 % der Standorte in der Flachglasindustrie ein zusätzliches Aggregat zur Wärmerückgewinnung vor dem Filter und 20 % hinter dem Filter. Damit werden in der Flachglasbranche heute rund 0,7 PJ/a thermische Energie durch einen weitere Wärmerückgewinnung zusätzlich zum Regenerator genutzt. Die Zahl berechnet sich aus der zur Verfügung stehenden gefassten Abwärme vor und nach dem Filter, multipliziert mit dem Verbreitungsgrad einer zusätzlichen Abwärmetechnologie sowie der Verteilung des Einsatzortes (vor oder nach dem Filter) dieser Technologie. Somit sind mit heutigen Technologien noch rund 2,7 PJ/a der gefassten Abwärme nutzbar. Geht man von einer Umwandlungseffizienz von 30 % aus, stehen demnach heute noch etwa 0,8 PJ/a auf der Nutzungsseite zur Verfügung, also etwa dem durchschnittlichen Jahreswärmeverbrauch von rund 9.075 Einfamilienhäusern¹³.

¹³ Basiert auf einem durchschnittlicher Wärmeverbrauch eines Einfamilienhauses von 25.000 kWh pro Jahr (DESTATIS, 2018)

Abbildung 26: Heutige und zukünftige Abwärmenutzung in der Flachglasindustrie



Technische Perspektive

In Zukunft kann das technische Potenzial von 9,9 PJ/a vollständig ausgeschöpft werden. Zusätzlich dazu können die gefassten Abwärmeströme am Schmelzaggregat, die etwa 12 % der gesamten Wannenverluste betragen, sowie ca. die Hälfte der Abwärme aus der Formgebung genutzt werden, jedoch nur, wenn auch hier eine Technologie entwickelt wird, die diffuse Abwärme nutzen kann. Analog zu Hohlglasindustrie könnten die Wärmeleitungsverluste an der Schmelzwanne mittels thermoelektrischer Generation genutzt werden. Dadurch lässt sich ca. ein Drittel der diffusen Wannenverluste nutzen. Im Abgasstrom könnte die direkte Wärmerückgewinnung vor allem durch eine Effizienzsteigerung des Regenerators erhöht werden. Die verbleibenden diffusen Verluste an Regenerator und dem E-Filter könnten durch eine bessere Isolierung vermieden werden und stünden dann für eine Abwärmenutzung in gefasster Form zur Verfügung.

In der technischen Perspektive ergibt sich somit ein Abwärmenutzungspotenzial von ca. 4.687 MJ/t¹⁴. Skaliert man dieses Potenzial mit der Jahrestonnage der Flachglasindustrie von ca. 2,1 Mio. Tonnen hoch, ergibt sich ein absolutes Abwärmepotenzial in der technischen Perspektive von 14,9 PJ/a. Im Vergleich zu der heute bereits genutzten Abwärme von 6,9 PJ/a, wären in Zukunft also noch rund 8,1 PJ/a nutzbar. Unter Berücksichtigung der Umwandlungseffizienz von 30 %, stehen also in Zukunft noch rund 2,4 PJ/a auf der Nutzungsseite zu Verfügung. Diese Abwärmemenge würde für die jährliche Versorgung von knapp 27.000 Einfamilienhäusern reichen^{15 16}.

¹⁴ Die Zahl berechnet sich aus dem technischen Potenzial plus der gefassten Wannenverluste plus einem Drittel der diffusen Wannenverluste plus der Hälfte der Abwärme aus der Formgebung plus der Verluste am Filter.

¹⁵ Basiert auf einem durchschnittlicher Wärmeverbrauch eines Einfamilienhauses von 25.000 kWh pro Jahr (DESTATIS, 2018)

¹⁶ Eine detaillierte Beschreibung der Berechnungen wird in Anhang A.2 gegeben.

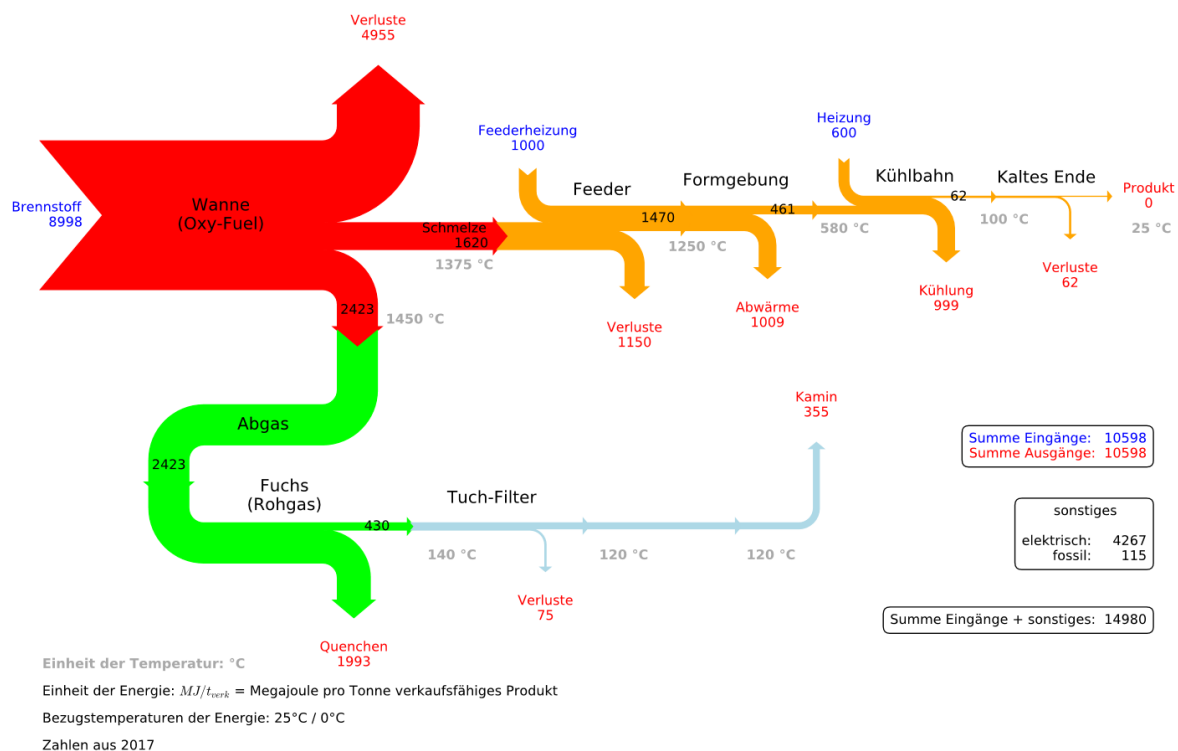
4.3.3 Spezialglas

Wie in Tabelle 3 zu erkennen, sind nicht ganz die Hälfte der Glasschmelzaggregate Oxy-Fuel-Wannen. Dennoch wird die Herstellung von Spezialglas mit Hilfe einer Oxy-Fuel-Wanne als Beispiel zur Beschreibung herangezogen und für die Bestimmung der relevanten Parameter als Modellierungsgrundlage herangezogen (siehe Tabelle 1).

Analog zu den zuvor beschriebenen Branchen, lässt sich der Produktionsprozess der Spezialglasindustrie in die Bereiche Schmelzaggregat, Formgebung und Abgasreinigung unterteilen. Für jeden dieser Prozessschritte werden die diffusen und gefassten Abwärmeströme anhand der Temperaturen an den Prozessübergängen ermittelt. Alle Wärmeein- und -ausgänge einer typischen Oxy-Fuel-Wanne in der Spezialglasherstellung werden mithilfe eines Sankey-Diagramms in Abbildung 27 dargestellt.

Im Unterscheid zu den beiden vorherigen Fallbeispielen wird hier kein KNS-Glas erschmolzen, sondern das Schmelzen eines Bororsilicatglases zu Grunde gelegt und als Formgebungsschritt die Ausformung von Rohren angenommen. Auch das Schmelzaggregat weist einen wesentlichen Unterschied auf. Im Gegensatz zu den bisherigen Fällen wird dem Brennstoff nicht Luft als Oxidator zugegeben, sondern „reiner“ Sauerstoff (92 - 95 Vol.-% O₂, Rest Ar und N₂).

Abbildung 27: Sankey-Diagramm Spezialglas

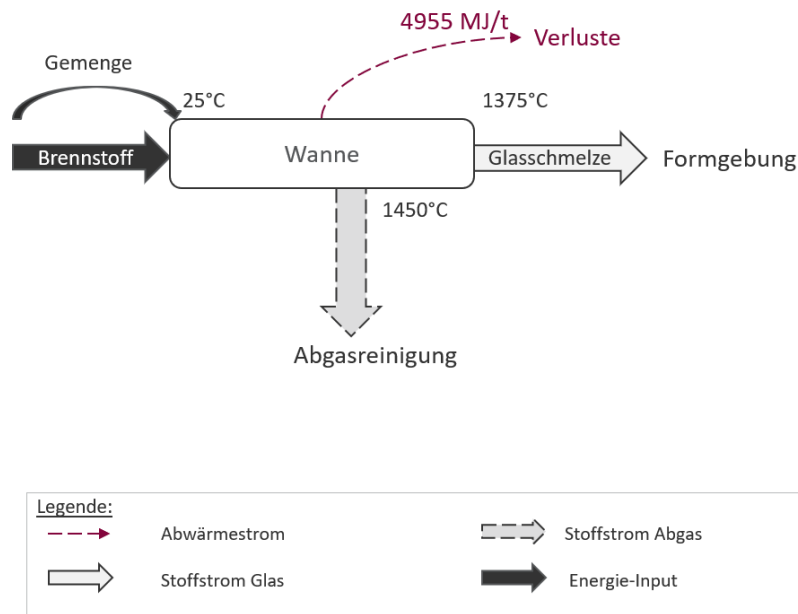


In den folgenden Unterkapiteln wird näher auf die Abwärmeströme in den Bereichen Schmelzaggregat, Formgebung und Abgasreinigung eingegangen, die sich aus den Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Prozessschritten ergeben.

4.3.3.1 Schmelzaggregat und Formgebung

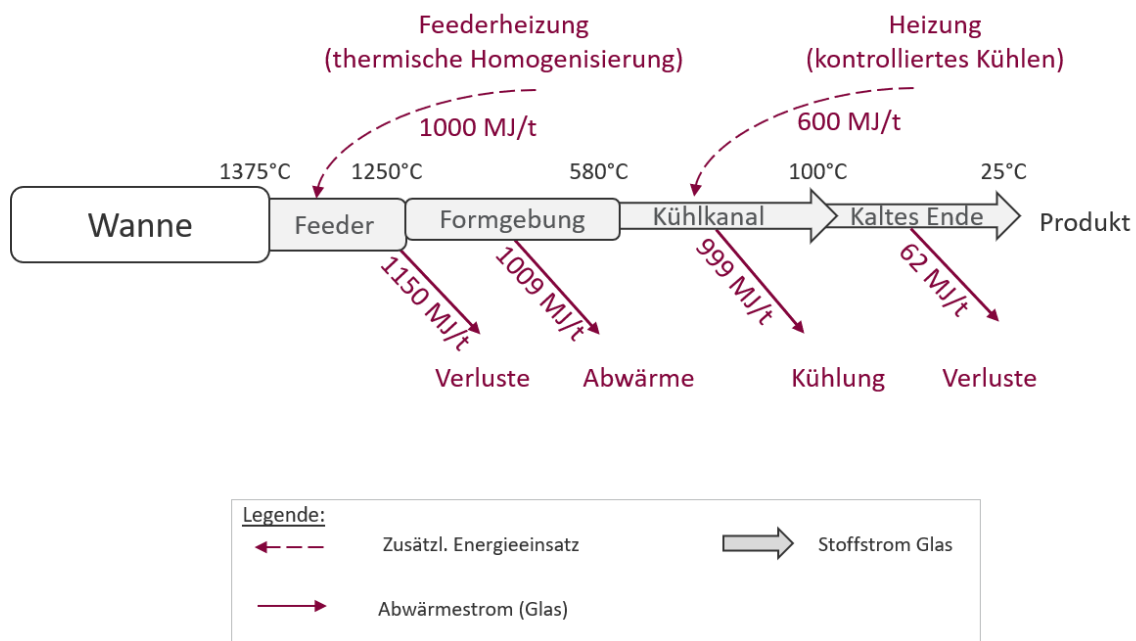
Wie in Abbildung 28 dargestellt, verlässt die Glasschmelze im Falle von Spezialglas die Wanne mit 1.375 °C. Gleichzeitig wird das Abgas mit einer Temperatur von 1.450 °C in die Abgasreinigung geleitet. Wie Abbildung 28 zeigt, entstehen am Schmelzaggregat, beachtliche Wannenverluste durch Strahlung, Kühlwasser und Kühlluft.

Abbildung 28: Schematische Darstellung der Abwärmeströme am Schmelzaggregat der Spezialglasindustrie



In der anschließenden Formgebung entstehen zahlreiche diffuse Abwärmeströme. Zum einen tritt Wärme durch die thermische Homogenisierung im Feeder, der unter Zugabe von Energie beheizt wird, und die Beheizung des Kühlkanals nach außen und zum anderen entstehen diffuse Abwärmeströme durch Verluste an Feeder und dem sogenannten kalten Ende, in der Formgebung sowie durch die Abkühlung des Glases im Kühlkanal. Die Größenordnung der jeweiligen Abwärmeströme kann in Abbildung 29 nachvollzogen werden.

Abbildung 29: Schematische Darstellung der Abwärmeströme in der Formgebung der Spezialglasindustrie

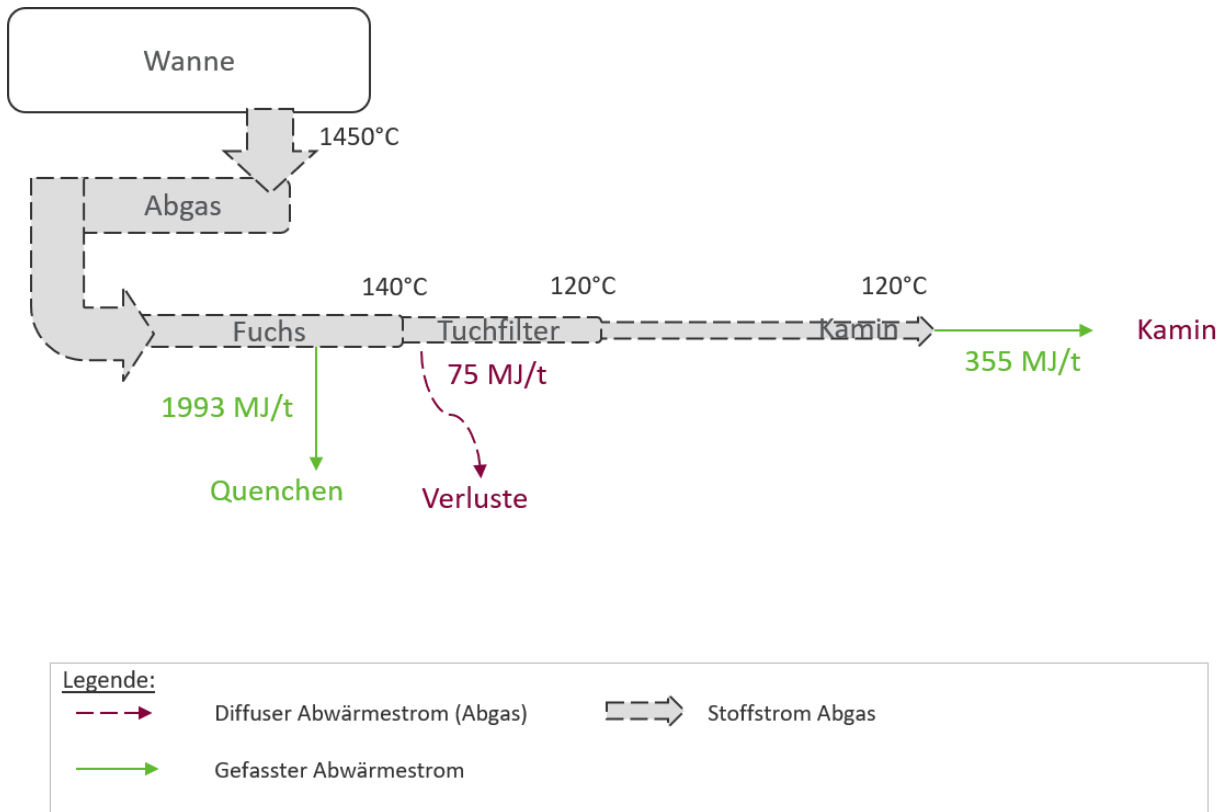


4.3.3.2 Abgasreinigung

Aus dem Verbrennungsraum des Schmelzaggregat tritt das Abgas mit einer Temperatur von 1.450 °C in den Abgaskanal ein. Wie Abbildung 30 zeigt, entstehen die größten Verluste durch das Quenschen vor dem Tuch-Filter. Der Tuch-Filter sollte je nach Material des Filtergewebes bei einer maximalen Temperatur bis zu 250 °C (im Bsp. 140 °C) betrieben werden. Daher muss das Abgas zuvor mit Wasser

oder Luft "gequenscht" (abgekühlt) werden, um die für die Abgasreinigung benötigten Temperaturen einzustellen. An dem Tuch-Filter selbst, entstehen weitere Verluste, die jedoch bedeutend kleiner sind, als die durch Quenschen.

Abbildung 30: Schematische Darstellung der Abgasführung in der Spezialglasindustrie



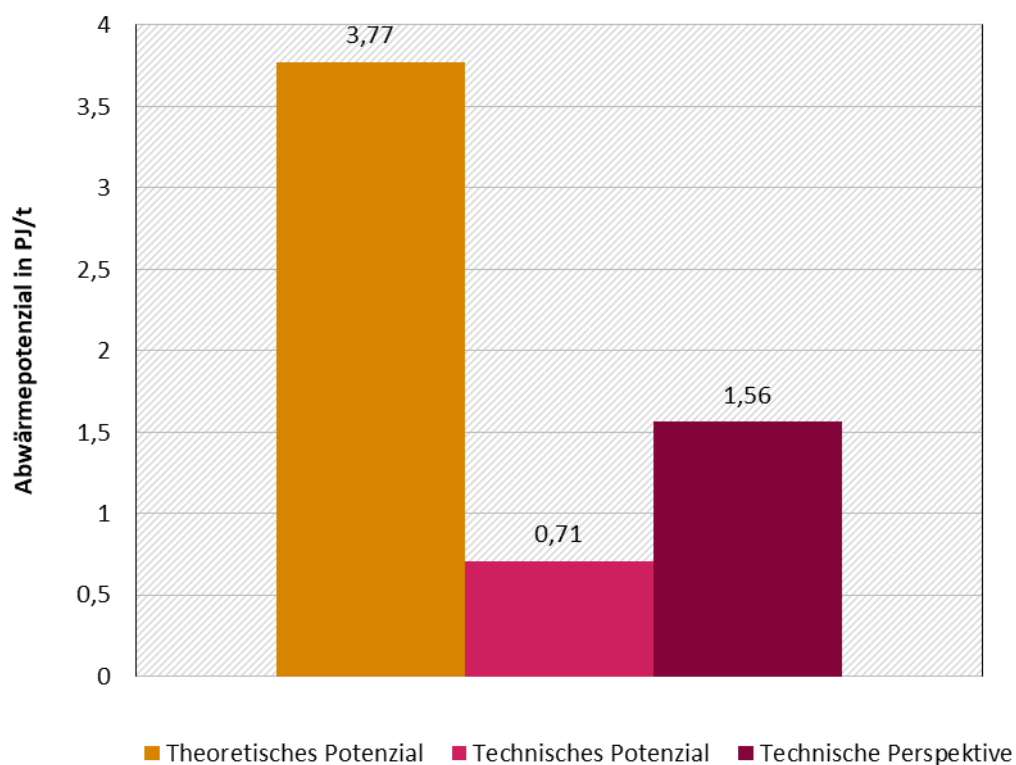
Bezüglich der Wärmerückgewinnung des Wärmeinhalts aus der Verbrennung lässt sich die grundsätzliche Aussage machen, dass eine direkte Zurückführung mithilfe eines Regenerators bzw. Rekuperators bisher nicht stattfindet. Auch eine indirekte Nutzung findet nur begrenzt statt, obwohl die Abwärme vor dem Tuchfilter fassbar und damit nutzbar ist. Beispielsweise wird die Abwärme hinter einer Oxy-Fuel-Wanne in den Niederlanden mithilfe von Optimelt [24] [25] [26] [27] oder in Frankreich an einer Flachglaswanne genutzt [28] [29].

Das Abwärmepotenzial der Spezialglasindustrie wird im Folgenden näher beschrieben.

4.3.3.3 Abwärmepotenzial in der Spezialglasindustrie

Die zuvor beschriebenen Abwärmeströme werden in diesem Kapitel dem theoretischen und dem technischen Abwärmepotenzial sowie der technischen Perspektive zugeordnet. Das Ergebnis dieser Zuordnung ist in Abbildung 31 zu sehen.

Abbildung 31: Abwärmepotenziale in der Spezialglasindustrie



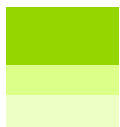
Um nachvollziehen zu können, wie die Abwärmepotenziale zustande kommen, gibt Tabelle 7 einen Überblick über die Temperaturdifferenzen zwischen den zuvor beschriebenen Prozessschritten sowie die zugehörigen Abwärmeströme pro Tonne verkaufsfähigem Glas.

Tabelle 7: Abwärmeströme im Herstellungsprozess von Spezialglas

Prozessschritt	Stoffstrom	Genutzte Abwärme [MJ/t]	Gefasste Abwärme [MJ/t]	Diffuse Abwärme [MJ/t]	Eingangs- und Ausgangstemperatur [°C]	Beschreibung der Abwärme
Schmelze	Schmelzwanne	-	248	4.707	N/A ¹⁷	Wannenverluste (Strahlungsverluste an Wanne, Kühlluft, Kühlwasser)
Formgebung & Kühlung	Feeder	-	-	1.150	1.375 – 1.250	Verluste durch Abkühlung des Produktes
	Formgebung	-	-	1.009	1.250 – 580	Abwärme Formgebung
	Kühlbahn	-	-	999	580 – 100	Kontrolliertes Abkühlen
	Kaltes Ende	-	-	61	100 – 25	Abkühlung des Produktes

¹⁷ Maximale Gewölbetemperatur nicht einheitlich.

Prozessschritt	Stoffstrom	Genutzte Abwärme [MJ/t]	Gefasste Abwärme [MJ/t]	Diffuse Abwärme [MJ/t]	Eingangs- und Ausgangstemperatur [°C]	Beschreibung der Abwärme
Abgasreinigung	Fuchs (Rohgas)	-	1.993		1450 – 140	Bewusstes Herunterkühlen vor Tuchfilter
	Tuchfilter	-		75	140 – 120	Diffuse Wärmeverlust am Tuchfilter
	Kamin		355		200	Technologisch nicht nutzbare Abwärme
Summe		0	2.241	8.002		



= technisches Potenzial

=aus technischer Perspektive vollständig nutzbar

=aus technischer Perspektive teilweise nutzbar

In der Spezialglasindustrie könnten heute bereits 1.993 MJ/t beim Quenschen über Abwärmetechnologien genutzt werden. Bisher wird diese Abwärme jedoch selten genutzt. Ein weiterer gefasster Abwärmestrom (248 MJ/t) aus dem Kühlwasser der Wanne könnte ebenfalls genutzt werden, nicht jedoch der gefassten Abwärme aus dem Kamin (355 MJ/t), der aus technischen Gründen erhalten werden muss. Der gefasste Teil der Wannenverluste beträgt bei der Oxy-Fuel-Wanne rund 5 % der gesamten Wannenverluste, da Kühlwasser nur für die Kühlung der Kamera genutzt wird.

Alle diffusen Abwärmeströme summieren sich zu etwa 8.002 MJ/t auf, die teilweise in Zukunft mittels neuer Technologien genutzt werden könnten. Dies betrifft einen Teil der Abwärme aus der Formgebung, als auch zum Teil die Verluste an Wanne und Tuchfilter. Auch hier bedarf es allerdings zunächst der Entwicklung der entsprechenden Technologien. Die Verluste am Filter könnten zum einen durch Effizienzsteigerungen, einer verbesserten Isolierung oder mithilfe eines Wärmeverchiebesystems vermindert werden.

Theoretisches und technisches Potenzial

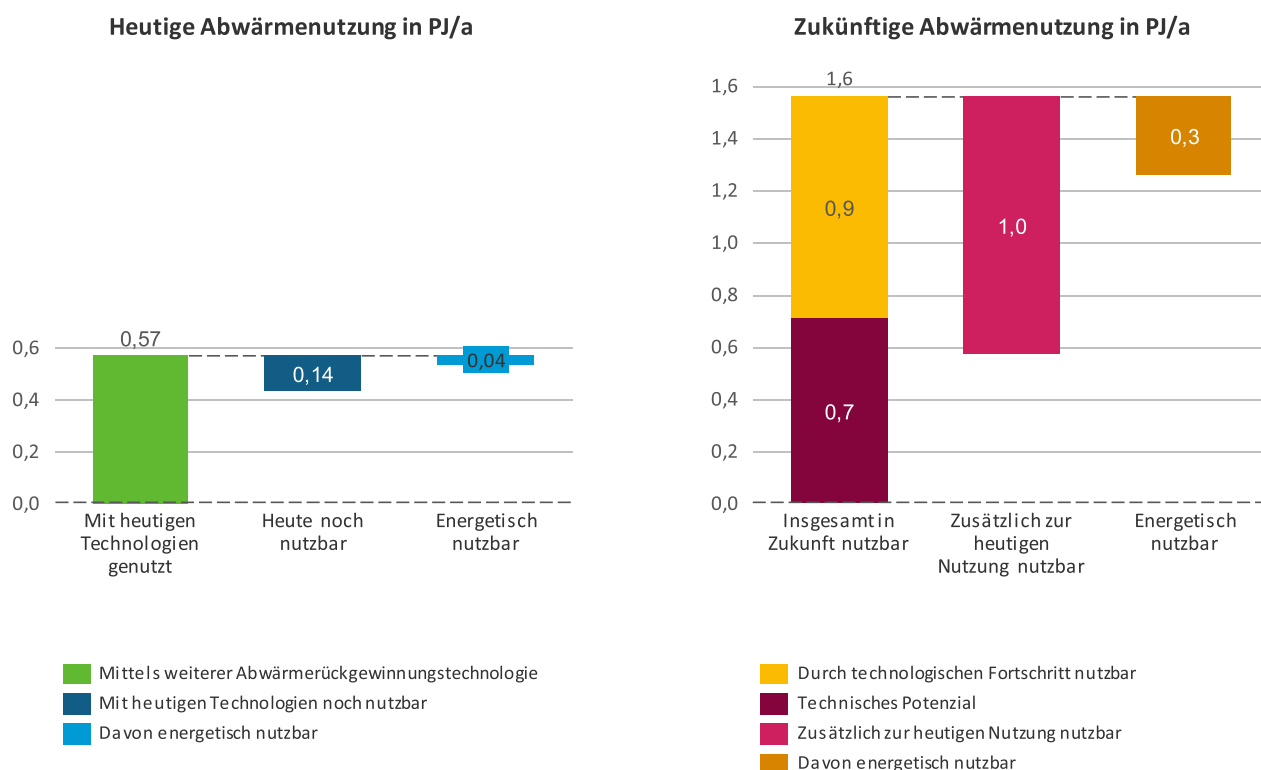
In der Spezialglasindustrie beträgt das theoretische Potenzial 10.598 MJ/t. Das technische Potenzial entspricht dem Wärmehalt von 1.993 MJ/t, der beim Quenschen vernichtet wird. Es berechnet sich aus der Abwärme, die im Abgasstrom von der Wanne in die Abgasreinigung enthalten ist (2.423 MJ/t), abzüglich der Abwärme über den Kamin (355 MJ/t) und abzüglich der Verluste am Tuch-Filter (75 MJ/t). Unter Berücksichtigung der Jahrestonnage der Spezialglasindustrie von knapp 356.000 Tonnen, ergibt sich dementsprechend ein theoretisches Potenzial von rund 3,8 PJ/a und ein technisches Potenzial von ca. 0,7 PJ/a. Wie für die anderen Branchen bereits erwähnt, wird eine Übersicht der Abwärmepotenziale über alle Branchen hinweg in Abbildung 35 in Kapitel 4.4 gegeben.

Heutige Nutzung

Zum heutigen Zeitpunkt werden Abwärmetechnologien lediglich vor dem Tuchfilter eingesetzt, die die beim Quenschen vernichtete Wärme nutzen. Etwa 80 % der Standorte haben eine solche Technologie im Einsatz. Demnach werden heute knapp 0,6 PJ/a vom technischen Potenzial genutzt. Dementsprechend sind mit heutigen Technologien noch rund 0,1 PJ/a der gefassten Abwärme nutzbar. Geht man von einer Umwandlungseffizienz von 30 % aus, stehen demnach heute noch etwa 0,04 PJ/a auf der

Nutzungsseite zur Verfügung. Dies entspricht immerhin noch dem durchschnittlichen Jahreswärmebedarf von rund 473 Einfamilienhäusern¹⁸.

Abbildung 32: Heutige und zukünftige Abwärmenutzung in der Spezialglasindustrie



Technische Perspektive

In der technischen Perspektive kann davon ausgegangen werden, dass das gesamte technische Potenzial gehoben werden kann. Zusätzlich könnten alle gefassten Wannenverluste in Form von Kühlwasser (248 MJ/t) sowie ein Drittel der diffusen Wannenverluste mit zukünftigen Technologien (4.707 MJ/t) genutzt werden. In der Formgebung kann man davon ausgehen, dass etwa die Hälfte der diffusen Abwärme (1.009 MJ/t) mit zukünftigen Technologien genutzt werden kann. Die Verluste am Tuchfilter (75 MJ/t) können vollständig mit einer besseren Isolierung vermieden werden. In der Summe ergibt sich in der technischen Perspektive ein Abwärmepotenzial von 4.390 MJ pro Tonne verkaufsfähiges Glas. Skaliert man dieses Potenzial mit der Jahrestonnage von knapp 356.000 Tonnen hoch, ergibt sich ein absolutes Potenzial von rund 1,6 PJ/a. Im Vergleich zu der heute bereits genutzten Abwärme von knapp 0,6 PJ/a, wären in Zukunft also noch rund 1 PJ/a nutzbar. Unter Berücksichtigung der Umwandlungseffizienz von 30 %, stehen also in Zukunft noch etwa 0,3 PJ/a auf der Nutzungsseite zu Verfügung. Dies entspricht dem durchschnittlichen Jahreswärmeverbrauch von rund 3.315 Einfamilienhäusern^{19 20}.

¹⁸ Basiert auf einem durchschnittlicher Wärmeverbrauch eines Einfamilienhauses von 25.000 kWh pro Jahr (DESTATIS, 2018)

¹⁹ Basiert auf einem durchschnittlicher Wärmeverbrauch eines Einfamilienhauses von 25.000 kWh pro Jahr (DESTATIS, 2018)

²⁰ Eine detaillierte Beschreibung der Berechnungen wird in Anhang A.2 gegeben.

4.3.4 Glaswolle/-faser

Fasern für nicht optische Anwendungen, werden in einem Zerfaserungsprozess bzw. aus Düsen gezogen hergestellt und dann zum größten Teil für Isolierbauteile aufbereitet, zu Garnen, Matten oder Fliesen verarbeitet oder als Endlosfaser(-bündel) aufgewickelt.

Ein typisches dafür genutztes Schmelzaggregat ist eine Glasschmelzwanne mit einer rekuperativen Luftvorwärmung. Zum Zeitpunkt der Zählung wurden 10 Schmelzaggregate ausgemacht, die eine rekuperative Luftvorwärmung aufweisen. Dabei kommen sowohl keramische Rekuperatoren als auch Rekuperatoren aus Stahl zum Einsatz. Die Luftvorwärmung, die mit Rekuperatoren erreicht wird, liegt üblicherweise zwischen 600 und 850 °C. Die Gläser, die bei Fasermaterialien zum Einsatz kommen, haben unterschiedlichste Zusammensetzungen. Tabelle 8 gibt beispielhafte Zusammensetzungen an [30].

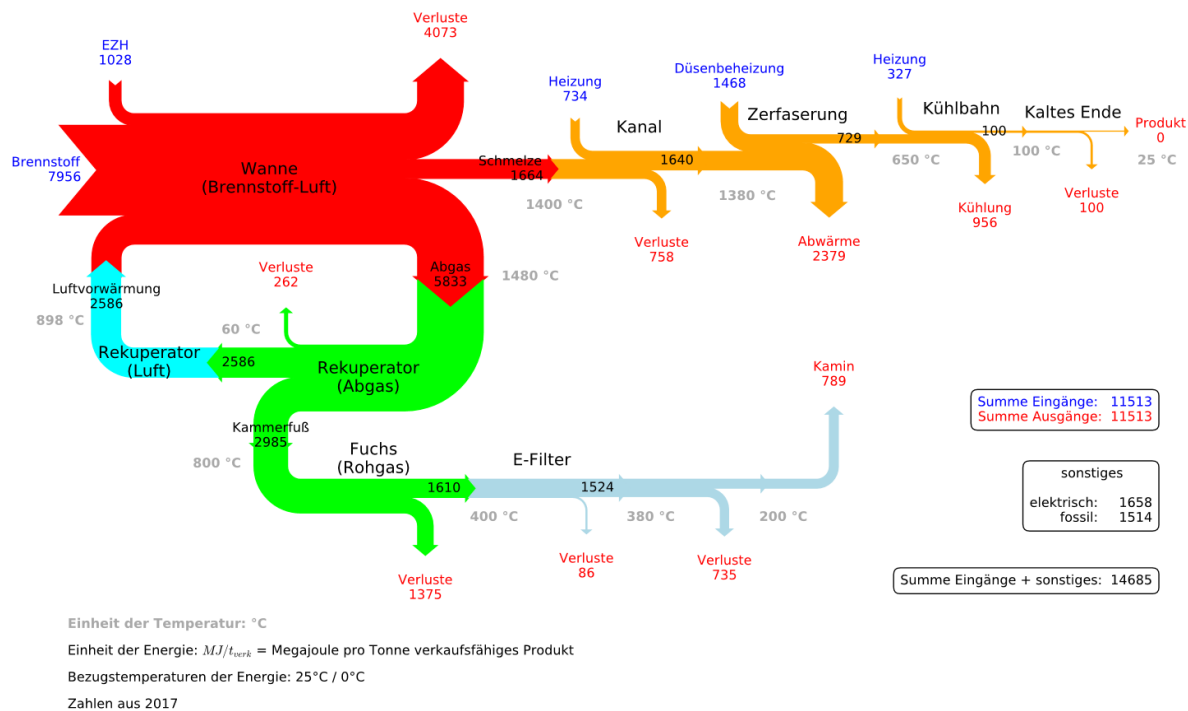
Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung von Glas- und Mineraldasern

Chemische Zusammensetzung von Glas- und Mineraldasern (Durchschnittswerte in Ma.-%) [30]						
	Glasfasern					Mineraldasern
	Schleuderverfahren	Düsenziehverfahren				Düsenblasverfahren
	allgemein	allgemein	E-Glas	AR-Glas	S-Glas	basaltisch
SiO ₂	62,0	53,2	54,0	61,0	65,0	45,6
Al ₂ O ₃	3,4	14,2	14,0	0,3	25,0	13,5
CaO	8,0	22,6	17,5	4,9	--	10,4
MgO	3,7	0,42	4,5	0,1	10,0	10,3
BaO	1,4	8,55	--	--	--	--
Na ₂ O	14,0	0,26	--	14,3	--	3,5
K ₂ O	1,8	0,21	--	2,7	--	1,1
B ₂ O ₃	5,0	--	10,0	--	--	--
ZrO ₂	--	--	--	10,2	--	--
Fe ₂ O ₃ +TiO ₂	0,5	0,34	--	6,5 (Ti)	--	15,5

Da sich auf Grund der unterschiedlichen Glaszusammensetzung für die verschiedenen Gläser auch unterschiedliche Temperatur-Viskosität-Zusammenhänge ergeben, ist die Angabe von Temperaturen im Sankey-Diagramm (Abbildung 33) beim Massenstrom Glas als Angabe einer Größenordnung zu verstehen. Gerechnet wurde mit E-Glas, dessen grobe Zusammensetzung in [13, p. 60] spezifiziert ist und dem in Tabelle 8 beschriebenen E-Glas in den Hauptkomponenten entspricht.

Bei der Faserherstellung werden je nach Glasart, Produkt und Produktionsweise für die Schmelze 50 bis 80 % der Energie benötigt [13, p. 129].

Abbildung 33: Sankey-Diagramm in der Glaswolle/-faserbranche



In Abbildung 33 werden die Abwärmeströme im Herstellungsprozess von E-Glas am Beispiel einer rekuperativen Schmelzwanne gezeigt. Die größten Abwärmeverluste (2379 MJ/t) entstehen im Zerkleinerungsprozess, welcher etwa die Hälfte aller eingesetzten Energie verbraucht. Bei dem dort entstehenden Abwärmestrom handelt es sich jedoch um einen diffusen Strom. Momentan wird dieser Abwärmestrom über Dach gefahren, da er mit heutigen Technologien nur schwer zu fassen ist. Etwas anders schaut es bei den Abwärmeströmen im Abgasstrom aus. Nachdem das Abgas den Regenerator mit ca. 800 °C verlässt, muss das Abgas auf 400 °C vor dem E-Filter abgeköhlt werden. Dabei entstehen Wärmeverluste von ca. 1.375 MJ pro Tonne verkaufsfähigem Glas, die bereits mit heutigen Abwärmerückgewinnungstechnologien nutzbar sind. Das Abgas verlässt den E-Filter schließlich mit einer Temperatur von ca. 380 °C. Da für den Erhalt des Kaminzuges jedoch nur eine Temperatur von 200 °C benötigt wird, kann die überschüssige Wärme von ca. 735 MJ/t mithilfe einer Abwärmerückgewinnungstechnologie genutzt werden, es sei denn, ein zusätzliches Temperaturfenster für die Entstickung des Abgases muss erhalten bleiben.

4.3.4.1 Abwärmepotenziale in der Glaswolle/-faserindustrie

Möchte man die Abwärmeströme Glaswolle/-faserindustrie den Abwärmepotenzialen zuordnen, ergibt sich für das oben genannte Beispiel ein theoretisches Abwärmepotenzial von 11.513 MJ/t verkaufsfähiges E-Glas, welches sich aus der Summe aller Energieeinträge berechnet. Würde man dieses Potenzial mit der Jahrestonnage der Glaswolle/-faserindustrie hochskalieren, ergäbe sich ein absolutes theoretisches Potenzial von 4,35 PJ/a.

Das technische Potenzial am Beispiel von E-Glas berechnet sich aus dem Wärmeinhalt des Abgases beim Verlassen der Schmelzwanne (5.833 MJ/t), abzüglich der Wärme, die über den Kamin in die Atmosphäre strömt (789 MJ/t) und abzüglich der Verluste am E-Filter (86 MJ/t). Somit ergibt sich ein technisches Potenzial von ca. 4.958 MJ/t verkaufsfähiges E-Glas. Skaliert man dieses Potenzial am Beispiel von E-Glas mit der Jahrestonnage für die gesamte Glasfaserindustrie hoch, ergäbe sich ein absolutes technisches Potenzial von ca. 1,87 PJ/a für diese Branche.

In der technischen Perspektive, ist davon auszugehen, dass neben dem technischen Potenzial auch ein Teil

der Wannenverluste genutzt werden können, wahrscheinlich jedoch nicht die diffuse Abwärme aus dem Zerspanungsprozess. Unter den Annahmen, dass 12 % der Wannenverluste gefasst sind (bspw. in Form von Kühlwasser) und diese vollständig nutzbar sind, dass ein Drittel der restlichen Diffusen Wannenverluste in Zukunft über neue Technologien nutzbar sind und dass zukünftig die Verluste am E-Filter durch eine Effizienzsteigerung und eine bessere Isolation vermieden werden können, ergibt sich für E-Glas eine technische Perspektive von 7.377 MJ/t verkaufsfähiges E-Glas. Für die Glaswolle/-faserbranche würde dies einer absoluten technischen Perspektive von etwa 2,79 PJ/a entsprechen.

Insgesamt ist jedoch festzuhalten, dass die zuvor genannten absoluten Abwärmepotenziale auf dem Beispiel von einer einzigen Glasfaserart und einer beispielhaften Schmelzwanne ermittelt wurden, sodass die skalierten Werte nur als sehr grobe Abschätzung gesehen werden können.

4.3.5 Steinwolle

Zur Herstellung von Mineralfasern (Steinwolle) werden unterschiedliche Schmelzaggregate verwendet. Ein Hersteller nutzt sog. Kupolöfen, wie sie aus der Metallherstellung bekannt sind (Gusseisenherstellung aus Roheisen). Diese Schachtofen werden von oben mit einer Mischung aus Rohstoffen und Kohle beschickt. Über der Schmelze wird Sauerstoff/Verbrennungsluft eingeblasen und die entstandene Schmelze am unteren Ende des Schachtofens abgezogen. Da diese Sonderöfen nicht weiter verbreitet sind, wird nicht näher auf diese eingegangen. Außerdem können keine technischen Kennzahlen ermittelt werden, ohne das Know-how der Firmengruppe offen zu legen. Die so erschmolzene Tonnage macht maximal 5 % der Jahresgesamtonnage in D aus. Die Abgasaufbereitung unterscheidet sich in den wesentlichen Schritten nicht von anderen Produktionsprozessen und bietet im Bereich unter ca. 600 bis 500 °C [31] ähnliche Möglichkeiten wie in den vorher beschriebenen Fallbeispielen. Bei der Herstellung von Mineralfasern werden 50 bis 70 % der eingesetzten Energie für die Schmelze benötigt (HVG).

4.3.6 Vollelektrische Schmelzwannen und Abwärmenutzung

Zum Zeitpunkt der Erhebung wurden 7 vollelektrische Schmelzwannen in Deutschland erfasst mit einer Tagesproduktion von 10 Tonnen am Tag oder mehr. Diese Wannen werden im Produktionsprozess von Behälterglas (Flakonagen), Wirtschaftsglas oder Fasern eingesetzt. Es ist jedoch abzusehen bzw. erkennbar, dass im Rahmen der Bemühungen, die CO₂-Emissionen zu verringern, der Anteil der VES zunehmen wird. Kleinere Aggregate bzw. VES bis 220 t/d sind weltweit im Einsatz. Größere Aggregate stellen bisher eine Herausforderung für den Ofenbau dar und konnten bisher nicht erfolgreich betrieben werden. Die Tonnageanforderungen einer Floatlinie bzw. einer entsprechenden Behälterglasfertigung mit bis zu 5 Linien hinter einer Wanne, können mit VES z.Zt. nicht erfüllt werden. Hier werden unterschiedliche Konzepte weltweit diskutiert, um entsprechende Lösungen in die Praxis umzusetzen.

Zudem steht beim Einsatz vollelektrischer Schmelzwannen kein gefasster Abgasstrom aus einer Verbrennung für die Wärmerückgewinnung zur Verfügung. Da in der überwiegenden Zahl der Aggregate mit einem sog. Cold-Top (kalter Gemengebedeckung der Schmelze) gearbeitet bzw. angestrebt wird, ist das über der Schmelze abgesaugte Gas mit den Verdampfungsprodukten in den meisten Fällen kälter als 150 °C. Der Massenstrom dieser Absaugungen ist extrem gering, sodass sich weder das Temperaturniveau noch der Menge eine Nutzung zur Wärmerückgewinnung anbietet.

Da es keine typische Anwendung / Produktionskette mit VES gibt, fehlt hier das entsprechende Sankey-Diagramm.

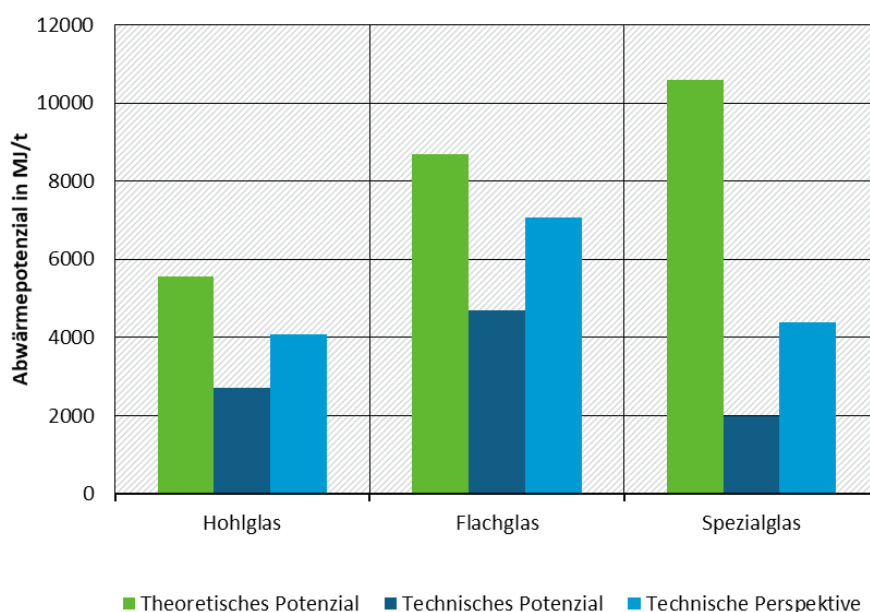
4.4 Zusammenfassung des Abwärmepotenzials

Die hebbaren Abwärmepotenziale in der deutschen Glasindustrie unterscheiden sich sowohl über Branchen hinweg als auch in der Betrachtung auf Basis von relativen und absoluten Abwärmepotenzialen. Abbildung 34 zeigt die Abwärmepotenziale der Hohlglas-, Flachglas- und der Spezialglasindustrie

je Tonne verkaufsfähiges Glas. Ein direkter Vergleich über Branchen hinweg ist jedoch aufgrund verschiedener Qualitätsanforderungen und dem damit verbundenen Energiebedarf nicht möglich. In der Hohlglasindustrie könnte mit heute bereits verfügbaren Technologien knapp die Hälfte des theoretischen Potenzials gehoben werden, in der technischen Perspektive sogar rund 74 %.

In der Flachglasindustrie ist das Verhältnis der hebbaren Potenziale in Bezug auf das theoretische Potenzial ähnlich. Während heute bereits etwa 54 % des theoretischen Potenzials gehoben werden könnten, könnten zukünftige Technologien rund 81 % des theoretischen Potenzials heben. In der Spezialglasindustrie kann anteilig deutlich weniger Abwärme zurückgewonnen und genutzt werden. Unter Einsatz heutiger Technologien könnten heute etwa 19 % des theoretischen Potenzials genutzt werden und in Zukunft ca. 41 %.

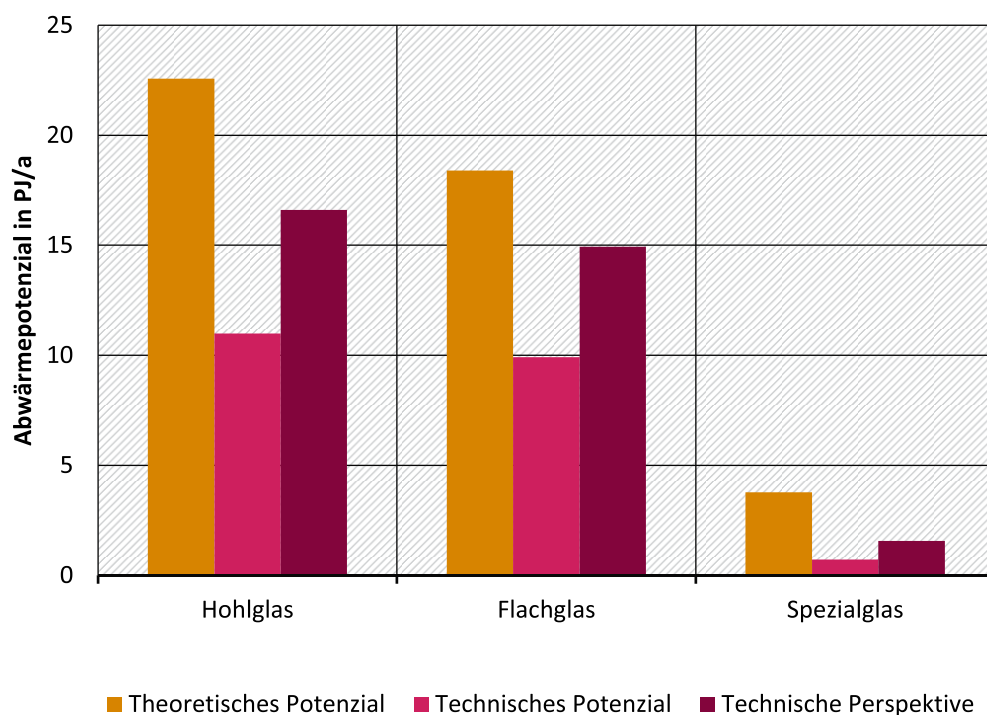
Abbildung 34: Abwärmepotenzial der deutschen Glasindustrie in MJ pro Tonne verkaufsfähiges Glas



Absolute Abwärmepotenziale

Das Bild ändert sich leicht, sobald die Jahrestonnagen der einzelnen Branchen berücksichtigt werden (Abbildung 35). Die Hohlglasindustrie ist mit einer Jahrestonnage von rund 4 Mio. Tonnen (2017) die mit Abstand größte Branche. Dementsprechend fallen auch die Potenziale deutlich größer aus. Es wird deutlich, dass die hebbaren Potenziale, sowohl mit heutigen als auch zukünftigen Technologien in der Hohlglas- und der Flachglasindustrie mit 16,6 PJ (Hohlglas) und 14,9 PJ (Flachglas) absolut gesehen ähnlich groß sind.

Abbildung 35: Absolutes Abwärmepotenzial der deutschen Glasindustrie in PJ/a

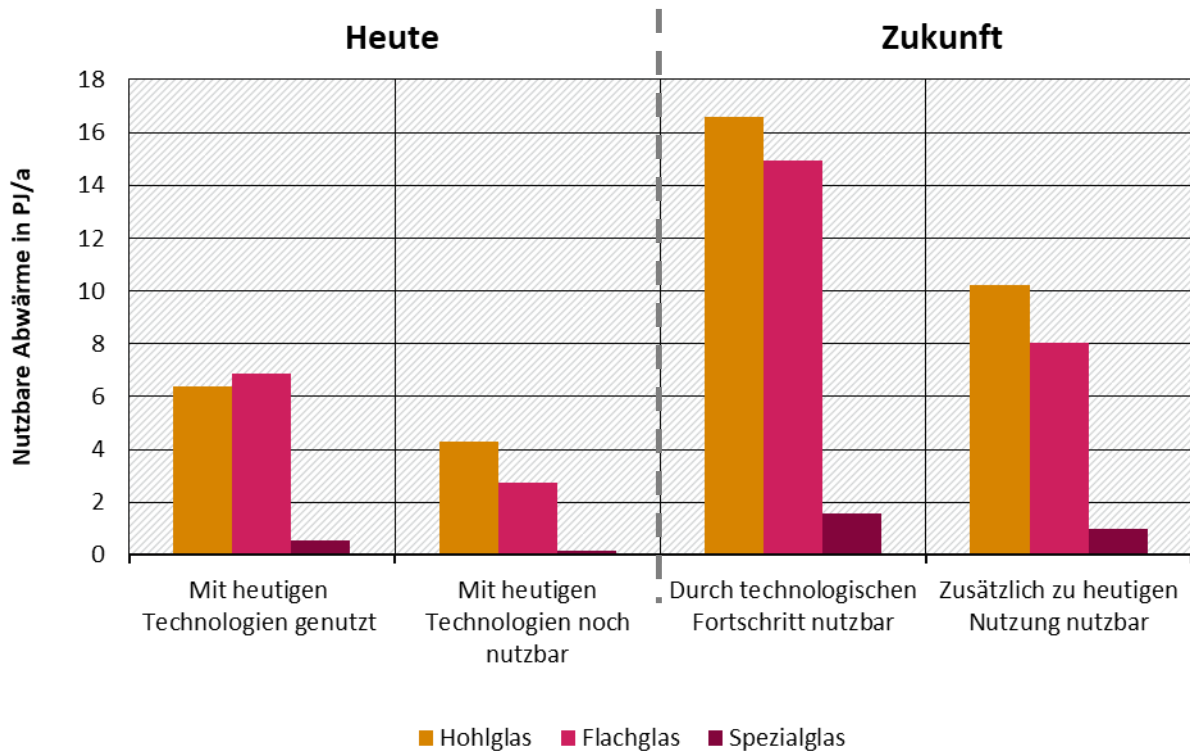


Die absoluten Abwärmepotenziale der Spezialglasindustrie sind deutlich geringer. Dies liegt vor allem an der geringen Jahrestonnage von weniger als 400.000 Tonnen (2017), aber auch an einem hohen Anteil an nicht nutzbaren diffusen Abwärmeströmen.

Nutzbare Abwärme heute und in Zukunft

Um die identifizierten Abwärmepotenziale in den drei größten Glasbranchen in Relation zum Status Quo zu setzen, zeigt Abbildung 36 auf der linken Hälfte der Grafik, wie viel Abwärme je Branche bereits mit heutigen Abwärmetechnologien genutzt wird und wie viel heute mit den gleichen Technologien noch nutzbar wäre. Die rechte Seite der Grafik hingegen bildet die zukünftige Perspektive ab. Diese beinhaltet die Abwärmemenge je Branche, die durch technologischen Fortschritt insgesamt nutzbar sein wird und setzt diese in Beziehung zur heutigen Nutzung.

Abbildung 36: Nutzbare Abwärme heute und in Zukunft in PJ/a



Aus heutiger Sicht nutzen die Hohlglas- und die Flachglasindustrie schon ähnlich große absolute Abwärmemengen. Im Gegensatz dazu wird in der Spezialglasindustrie kaum Abwärme zurückgeführt und genutzt. In allen drei Branchen kann mit heutigen Technologien noch Abwärme genutzt werden. Das größte noch heute hebbare Potenzial kann dabei in der Hohlglasindustrie mit knapp 4,3 PJ gehoben werden. Das durch technologischen Fortschritt nutzbare Abwärmepotenzial entspricht der Abwärme aus der technischen Perspektive und ist, wie zuvor beschrieben, für die Hohlglas- und Flachglasindustrie absolut gesehen deutlich größer als für die Spezialglasindustrie. Vergleicht man die nutzbare Abwärmemenge in der technischen Perspektive mit der heutigen realen Nutzung, ist der größte Unterschied für die Hohlglasindustrie und die Flachglasindustrie zu erkennen. So können in der Hohlglasindustrie rund 10,2 PJ zusätzlich zu der heutigen Nutzung genutzt werden und in der Flachglasindustrie knapp 8,1 PJ. In der Spezialglasindustrie kann hingegen nur knapp 1,0 PJ in der Zukunft zusätzlich zur heutigen Nutzung genutzt werden.

Betrachtet man durchschnittliche Umwandlungseffizienzen, wird deutlich, dass nur etwa 30 % der Abwärmemenge nutzbar gemacht werden kann. Das sind in Zukunft zusätzlich etwa 3,1 PJ der Abwärme in der Hohlglasindustrie, 2,4 PJ in der Flachglasindustrie und etwa 0,3 PJ in der Spezialglasindustrie.

Um zu verstehen, inwiefern die Abwärmepotenziale aus heutiger Sicht nutzbar sind, wird im folgenden Kapitel auf die am weitesten verbreiteten Abwärmetechnologien eingegangen.

5 Abwärmotechnologien

5.1 Wichtigste Technologien im derzeitigen Einsatz

In der deutschen Glasindustrie sind derzeit verschiedene Abwärmotechnologien im Einsatz, die entweder thermische Energie erzeugen oder elektrische Energie aus den Abwärmeströmen des Schmelzprozesses gewinnen. Basierend auf einer Inventarisierung der HVG sind die wichtigsten heute genutzten Technologien:

- Abhitzeessel, zur Dampferzeugung bzw. in den meisten Fällen zur Stromerzeugung
- Wärmetauscher, zur Erwärmung von Brauchwasser und Heizwasser bzw. für Fernwärme
- Wärmeverschiebesysteme, zum Schutz des Gewebefilters zur Abgasreinigung und anschließenden Wiedererwärmung zum Erhalt des natürlichen Kaminzuges und Vermeidung der Unterschreitung des Säuretaupunktes)
- Gemenge- bzw. Scherbenvorwärmer
- Organic Rankine Cycle (ORC) und Motoren zur Stromerzeugung

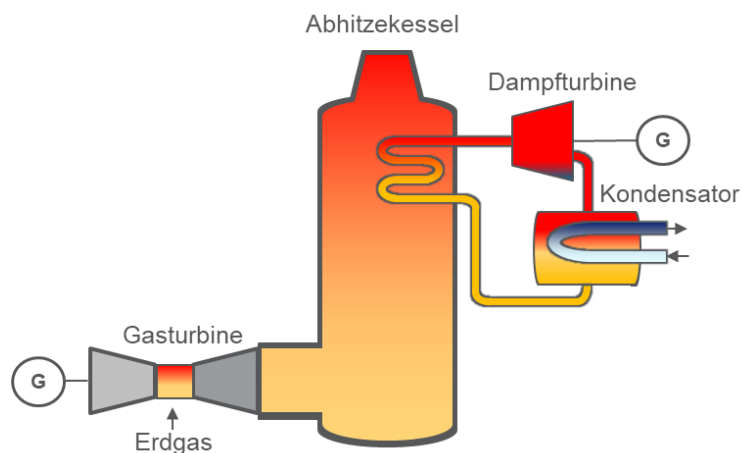
Es sind durchaus andere Technologien denkbar, die beispielsweise mechanische Energie in Form von Druckluft erzeugen. Diese sind jedoch derzeit noch nicht implementiert.

In den nächsten Unterkapiteln sollen die momentan wichtigsten Abwärmotechnologien anhand von Steckbriefen näher beschrieben werden.

5.1.1 Abhitzeessel

Abhitzeessel gehören mit Wärmetauschern zu den am häufigsten eingesetzten Technologien zur Abwärmennutzung. Abbildung 37 zeigt eine schematische Darstellung und das Funktionsprinzip.

Abbildung 37: Schematische Darstellung eines Abhitzeessels [32]



Der Abhitzeessel bezieht die Energie zur Dampferzeugung aus einem vorgeschalteten Prozess. In der schematischen Darstellung in Abbildung 37 ist dem Kessel eine Gasturbine vorgeschaltet. In der Glasindustrie wäre dies das Schmelzaggregat mit dem Verbrennungsraum und dem heißen Abgas. Der erzeugte Dampf kann mithilfe einer Dampfturbine als Prozess- oder Heizdampf, zur Stromerzeugung oder als Fernwärme genutzt werden.

Die Wirtschaftlichkeit eines Abhitzeessels hängt von dem zur Verfügung stehenden Wärmegefälle und dem Wärme- bzw. Energiebedarf der Produktionsstätte einschließlich der Umgebung ab. Im Falle regenerativ betriebener Anlagen wird die Abwärme zumeist zur Vorwärmung der Verbrennungsluft genutzt. Ein besonders hohes Temperaturgefälle steht bei direkt befeuerten Glasschmelzöfen mit

Rekuperatoren zur Luftvorwärmung zur Verfügung, insbesondere wenn Abhitzeessel und Rekuperator kombiniert werden können. Daneben kann die notwendige Heizfläche durch einen intensiven Wärmeübergang aufgrund der hohen Temperaturen vermindert werden [33].

Tabelle 9: Steckbrief Abhitzeessel

Steckbrief: Abhitzeessel	
Zweck	Dampferzeugung (Stromerzeugung & Heizwärme)
Typischer Einsatz	Vor dem Elektro- bzw. Gewebefilter; in seltenen Fällen hinter dem E-Filter
Temperaturband	Abgas: 400 – 1.000 °C
Anzahl Standorte / Anlagen	11
Verbreitungsgrad (Branchen)	Kann sowohl in der Behälterglas-, Flachglas- und Spezialglasindustrie eingesetzt werden, wird jedoch bislang hauptsächlich in der Flachglasbranche eingesetzt [13]
Nachteile	- Nicht hinter abscheidenden Filtern einsetzbar, da Temperaturband zu niedrig - Nicht wirtschaftlich bei Temperaturen des Abgaseintritts in den Kessel von unter 400 °C. In diesem Fall ist es vorteilhafter, die Abwärme zur Vorwärmung von Speisewasser, zur Erzeugung von Warmwasser oder Vorwärmung von Gebläsewind zu nutzen [34] - Wartungsintensiv aufgrund des hohen Staubgehalts des Rohgases vor dem Filter und der dadurch häufigen Abgasreinigung, um den Wärmeübergang effektiv zu halten. - Zusätzliche Korrosionsgefahren bei schwerölbeheizten Schmelzwannen über Schwefelgehalt des Brennstoffs bei Nichtachtung der Säuretaupunkte [33] (perspektivisch vernachlässigbarer Einsatz schwerölbeheizter Wannen)
Vorteile	- Etablierte Technologie - Kann anstelle eines Abkühlsystems zur Abkühlung von Abgasen vor Eintritt in den Filter genutzt werden, um Glasschmelzöfen mit filternden Abscheidern ausrüsten zu können [33] - Kann bei Oxyfuel-Wannen eingesetzt werden [13]
Wirtschaftlichkeit	- Hohe Investitions- und Unterhaltskosten
Perspektiven	- Einsatz abhängig von Effizienz, Stromkosten und benachbarten Wärmesenken

5.1.2 Wärmetauscher

Wärmetauscher sind die mit Abstand meist eingesetzte Technologie zur thermischen Wiederverwertung von Abwärme. Wärmetauscher erlauben die Übertragung von Wärme von einem warmen Medium auf ein kälteres Medium. Das Funktionsprinzip wird in Abbildung 38 skizziert. Bei den meisten Wärmetauschern werden gleichzeitig ein kaltes und ein warmes Medium an einer gemeinsamen Übertragungsfläche vorbeigeleitet. Der Wärmestrom, der dabei übertragen wird, hängt dabei von der mittleren Temperatur zwischen den beiden Medien, den Wärmedurchgangskoeffizienten des Wärmetauschers und der Größe der Übertragungsfläche ab.

Abbildung 38: Funktionsprinzip Wärmetauscher (eigene Darstellung)

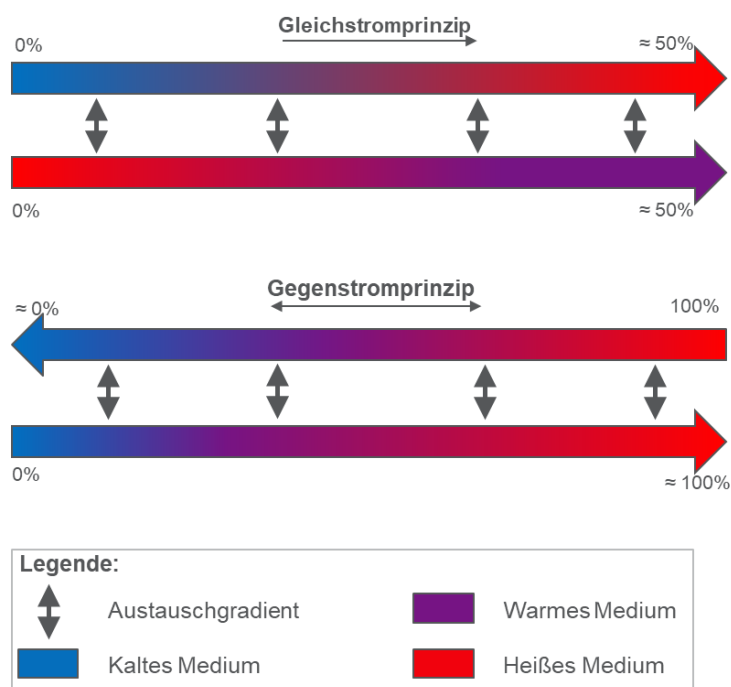


Tabelle 10: Steckbrief Wärmetauscher

Steckbrief: Wärmetauscher	
Zweck	Rückführung thermischer Energie aus Rauch- und Abgasen zur Heiß/Warmluft oder Warmwassererzeugung
Typischer Einsatz	Vor und nach dem Filter, vorwiegend nach dem Filter
Temperaturband	Abgas: 100 – 400 °C (1.000 °C aus Werkstoffperspektive)
Anzahl Standorte / Anlagen	28
Verbreitungsgrad (Branchen)	- Rohrbündel-Wärmetauscher genutzt bei Behälterglas (Oxyfuel, und U-Wanne, regenerativ) - Rohrregister-Wärmetauscher genutzt bei Flachglas (Seitenbrenner, regenerativ) und Spezialglas (Seitenbrenner, regenerativ) [13]
Nachteile	- Keine direkte Nutzung der Abwärme, sondern Umlenkung der Wärmeströme

Steckbrief: Wärmetauscher	
Vorteile	- Vielseitig einsetzbar
Kosten	- Rohrbündel-Wärmetauscher (Behälterglas, U-Wanne, regenerativ): Investitionskosten²¹ 1,67 Mio. €²², Amortisationszeit: 10 Jahre, Betriebskosten 33.500 €, geschätzte Kosten pro t Glas 2,36€/t Glas [35] - Rohrregister-Wärmetauscher (Flachglas, Seitenbrenner, regenerativ): Investitionskosten²³ 1,067 Mio. €²⁴, Amortisationszeit: 10 Jahre, Betriebskosten 70.000 €, geschätzte Kosten pro t Glas 0,79€/t Glas [35]
Perspektiven	- Perspektivisch bei diffusen Abwärmeströmen nutzbar, jedoch besteht dafür ein hoher Forschungsbedarf für Technologien, die diffuse Abwärme fassen

5.1.3 Wärmeverschiebesysteme

Bei der Verwendung von Wärmeverschiebesystemen wird an einer bestimmten Stelle im Produktionsprozess ein nicht benötigtes Temperaturniveau abgebaut und an einer anderen Stelle genutzt, um die hier benötigte Wärme wieder zur Verfügung zu stellen. Die Funktionsweise eines Wärmeverschiebesystems kann wie folgt beschrieben werden:

Wie Abbildung 39 zeigt, tritt das heiße Abgas mit 500 °C am Kammerfuß in die Abgasreinigung ein. Vor dem Gewebefilter wird das Abgas mithilfe kühlerer Abwärme hinter dem Filter über das Wärmeverschiebesystem auf 120 °C abgekühlt. Das Wärmeverschiebesystem bedient sich dabei dem Gegenstromprinzip, bei dem die Abwärmeströme vor und nach dem Filter aus entgegengesetzter Richtung aneinander vorbeiströmen und zwischen ihnen ein Wärmeaustausch stattfindet. Somit wird der Abgasstrom vor dem Filter auf die niedrigere Zieltemperatur von 120 °C abgekühlt und nach dem Filter auf die Zieltemperatur von 200 °C, die für den Kaminzug nötig ist, erwärmt. Wärmeverschiebesysteme zeichnen sich durch einen sehr hohen Wirkungsgrad aus. Die Verluste sind ausschließlich auf Verluste in der Wärmeübertragung beschränkt [36].

²¹ Kostenangaben gelten für das Jahr der Installation der Schadstoffbehandlungsanlage und sind nicht repräsentativ für die derzeitigen Kosten.

²² Die Investitionskosten des Wärmetauschers beinhalten auch Zubehör.

²³ Kostenangaben gelten für das Jahr der Installation der Schadstoffbehandlungsanlage und sind nicht repräsentativ für die derzeitigen Kosten.

²⁴ Die Investitionskosten des Wärmetauschers beinhalten auch Zubehör.

Abbildung 39: Funktionsprinzip Wärmeverschiebesystem (eigene Darstellung)

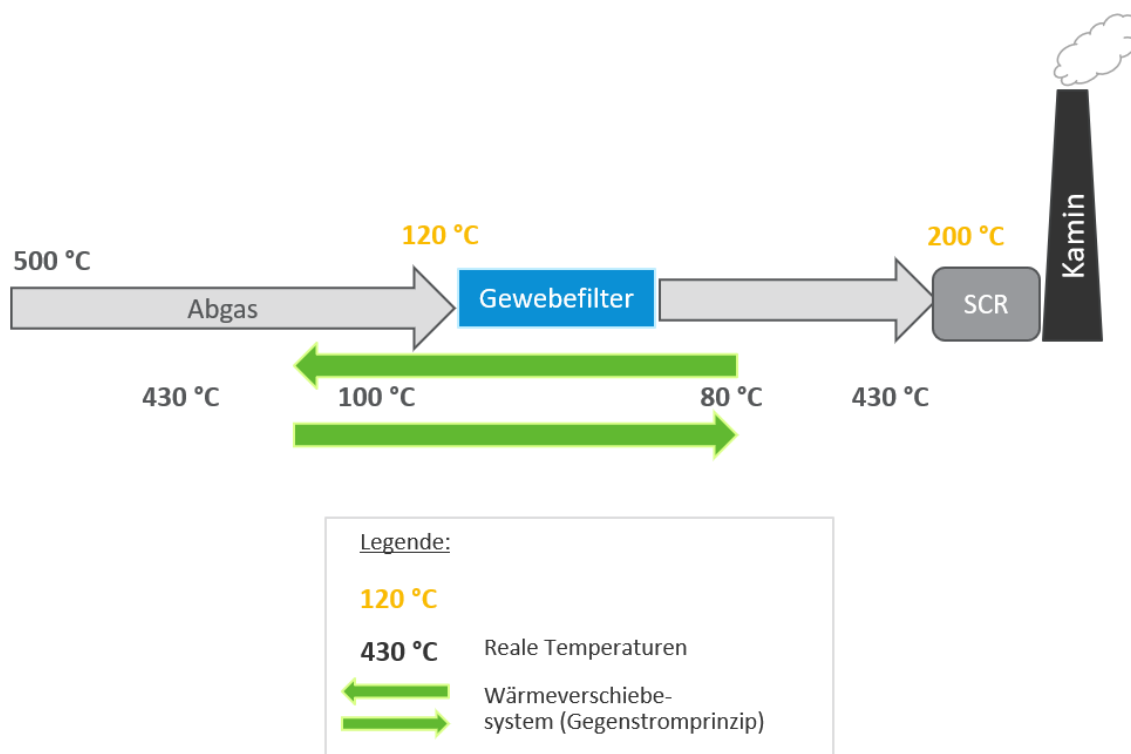


Tabelle 11: Steckbrief Wärmeverschiebesystem

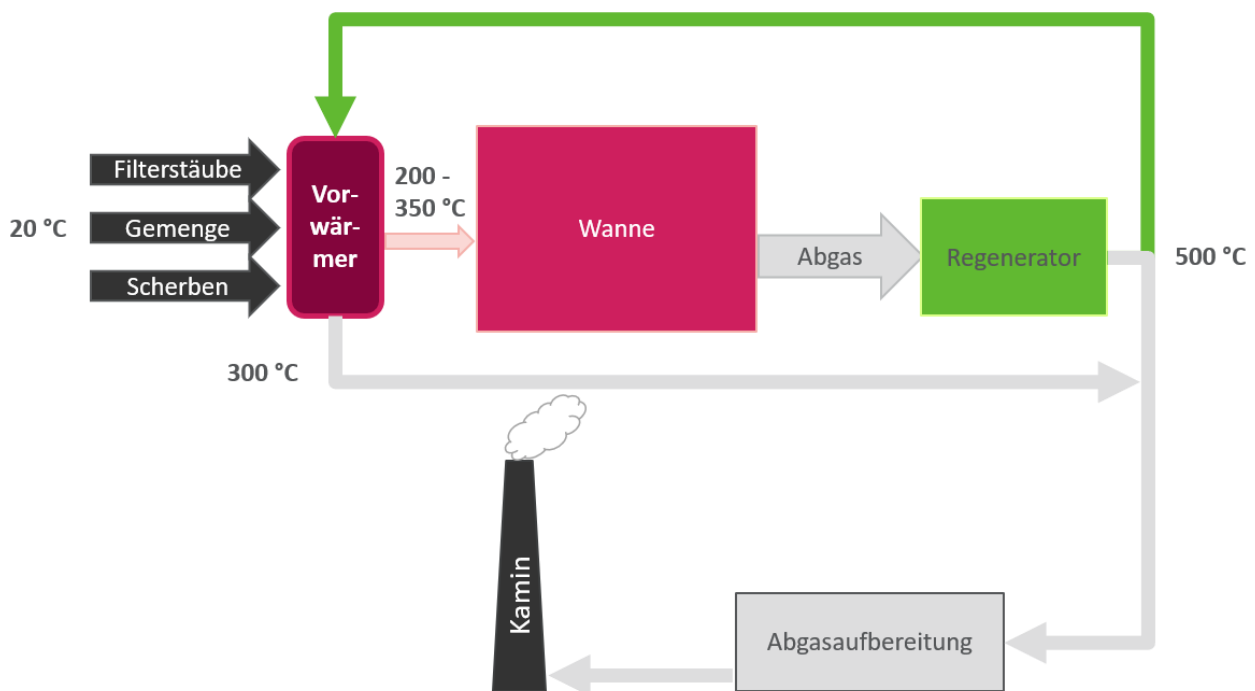
Steckbrief: Wärmeverschiebesysteme	
Zweck	Abbau eines nicht benötigten Temperaturniveaus an einer Stelle im Produktionsprozess und Nutzung dieser Wärme an einer anderen Stelle
Typischer Einsatz	Vor und nach dem Filter
Anzahl Standorte / Anlagen	3 Anlagen
Verbreitungsgrad (Branchen)	- Bisher nur Spezialglasbranche
Nachteile	- Effizienzverluste - Nicht effizient einsetzbar, wenn bereits Wärme vor dem Filter genutzt wird
Vorteile	- Sehr hoher Wirkungsgrad [36] - Einsparung von Primärenergieträgern
Wirtschaftlichkeit	- Kosten vergleichbar mit denen der Wärmetauscher (zwei Wärmetauscher benötigt) - Nutzungszweckabhängig (Wärmerück“gabe“ vor SCR, Wärmerückgewinnung, Kaminzugherstellung)
Perspektiven	- Geeignetes Modul um Abwärmestrecke zu optimieren

5.1.4 Gemengevorwärmung

Gemenge- und Scherbenvorwärmung dienen der Vorwärmung des Schmelzgutes, sparen Energie und erhöhen die Tonnage aufgrund einer erhöhten Schmelzdurchsatzleistung [13]. Wie in Abbildung 40 erkennbar ist, wird das System von Wärmetauschern in den Modulen von dem heißen Abgas des Ofens durchströmt und erwärmt so das Gemenge. Dabei werden die Feuchtigkeit und der entstehende Staub kontrolliert abgeführt und das Gemenge bewegt sich in Richtung des Einlegers. Zusätzlich werden die Wärmetauscher aktiviert und zerkleinern Restverklumpungen und gewährleisten so einen problemlosen Mengenetransport [37].

Die Vorwärmtemperaturen sollten mindestens 270 °C betragen und maximal 500 – 550 °C (Gemengebestandteile fangen an zu reagieren). In der Praxis arbeiten die meisten Gemenge-Vorwärmer bei Vorwärmtemperaturen zwischen 275 und 325 °C [13].

Abbildung 40: Funktionsprinzip Gemengevorwärmer (eigene Darstellung)



Weltweit werden drei verschiedene Systeme zur Gemengevorwärmung eingesetzt: Die direkte Vorwärmung, die indirekte Vorwärmung und der Praxair EGB Filter. Während bei der direkten Vorwärmung die Abgase von der Abgasleitung hinter dem Regenerator in den Vorwärmer eingespeist werden und so direkt in Kontakt mit dem Rohstoffen kommen, ist die indirekte Vorwärmung im Prinzip ein Kreuzstrom-Plattenwärmetauscher, in dem das Gemenge/die Scherben indirekt vorgewärmt werden. Bei der direkten Vorwärmung wird das Gemenge bis auf rund 300 °C – 400 °C vorgewärmt, wohingegen bei der indirekten Vorwärmung nur etwa 300 °C erreicht werden [13].

Das dritte System, das laut dem BVT-Merkblatt 2013 zur Gemengevorwärmung genutzt werden kann ist der Praxair EGB Filter. Bei diesem Filter handelt es sich um ein Hybridsystem zwischen direktem Vorwärmer und einem Elektrofilter zur Staubentfernung. Dieses System kommt bisher nur in den USA zum Einsatz, nicht jedoch in Deutschland oder Europa [13].

Tabelle 12: Steckbrief Gemengevorwärmung

Steckbrief: Gemengevorwärmung	
Zweck	Vorwärmung des Schmelzgutes, Verbesserung der spezifischen Energieeffizienz (Erhöhung der Tonnage oder Energieersparnis)
Typischer Einsatz	Vor der Gemengeeinlage des Schmelzaggregates
Temperaturband	Abgas: 400 – 600 °C
Anzahl Standorte / Anlagen	8 Anlagen an 5 Standorten
Verbreitungsgrad (Branchen)	- Theoretisch an jeder bestehenden Glasschmelzwanne mit mehr als 50 % Scherben im Gemenge installierbar - Durch Einschränkung im Scherbenanteil fast ausschließlich in der Behälterglasindustrie [13]
Betriebsdaten	- Temperatur des Abgases sollte aus wirtschaftlichen Gründen mind. 450 °C betragen - Abkühlen des Abgases um 200 – 250 °C benötigt, um entsprechend hohe, effiziente Vorwärmtemperatur zu erreichen - Max. Eintrittstemperatur des Abgases von 600 °C, um Materialverbackungen zu vermeiden [13]
Nachteile	- Nicht bedenkenlos in allen Branchen einsetzbar: Aufgrund des geringen Scherbenanteils in der Flachglasproduktion, Gefahr von Verklumpung des Gemenges, kann mit zusätzlicher Aktivierung jedoch vermieden werden - Hohe Kosten - Hoher Platzbedarf - Direkte Vorwärmung (offenes System) führt zu erhöhten Staubübertragung durch Verbrennungsgase, die mit der Chargendeck im Inneren des Ofens in Berührung kommen. Die feinen Partikel können sich auf der Oberfläche des Regenerators ablagern und zu Verschmutzungen der Regeneratorkontrollgeräte führen [38] [13] - Wartungsintensiv und erhöhter Reinigungsbedarf des Regenerators durch erhöhte Staubemissionen bei direkter Vorwärmung; führt zu steigenden Kosten [13] - Steht in Konkurrenz zur direkten Wärmerückgewinnung über den Regenerator (Beide Systeme nutzen ein überschneidendes Temperaturfenster)
Vorteile	- Einsparungen von 10 – 15 % [39] des Energieträgerbedarfs der Wanne im Vergleich zu vor dem Einsatz

Steckbrief: Gemengevorwärmung	
	- Bei einer Vorheizung des Gemenges auf 300 °C kann die Schmelzdurchsatzleistung einer bestehenden Schmelzwanne um 10 – 15 % erhöht werden, ohne Beeinträchtigung der Lebensdauer der Wanne [13] - Verringerung der spezifischen brennstoffbedingten Emissionen (CO₂ aufgrund der spezifischen Energieeinsparungen und NO_x durch geringeren Brennstoffbedarf und niedrigere Schmelzofentemperaturen) - Direkte Vorwärmung (offenes System): Verminderung der sauren Komponenten im Abgas (SO₂, HF, HCl) [13]: Rohstoffe als Absorbentien aktiv
Kosten	- Variieren stark je nach Kapazität der Wannen und Vorwärmer - Beispiel 1: Regenerative Querbrenner-Wanne mit Kapazität von 350 t/d: Investitionskosten: 2,5 Mio. € inkl. Anpassungen der Gemengeeinlegemaschine Järl. Betriebskosteneinsparungen ca. 820 000 €²⁵ [35] - Beispiel 2: Wanne mit Kapazität von 450 t/d: Erhöhung des Durchsatzes von 450 auf 500 t/d sowie Energieeinsparung Investitionskosten: 3,4 Mio. € Energiekosteneinsparungen: 1,1 Mio. € pro Jahr (Amortisationszeit hier 3 J.) [35] - Um erhöhte Durchsatzkapazität nutzen zu können, Investitionen in Ausrüstung und Infrastruktur nach der Wanne nötig; Kosten insb. in Bezug auf Maschinenkapazitäten können erheblich sein [13]
Perspektiven	- Ausgereifte Technologie, die einsatzbereit ist - Perspektivische Technologie bei baulichen Restriktionen der Kammereffizienz

5.1.5 ORC-Anlagen

Außerhalb von Deutschland kommen ORC-Anlagen immer häufiger zum Einsatz, speziell in der Flachglasindustrie, da hier die größten Schmelzaggregate zum Einsatz kommen. Wie in Abbildung 41 gezeigt, basiert die ORC-Technologie auf dem typischen thermodynamischen Kreislaufprozess zur Dampferzeugung. Ein organisches Arbeitsmedium, mit niedrigerem Siedepunkt als Wasser, wird durch den zugeführten Abwärmestrom unter Druck verdampft. Analog zu einem konventionellen Dampfkraftwerk wird der Dampf bis auf Kondensationsdruck entspannt und vollständig verflüssigt. Mit der dabei abgegebenen Arbeit wird eine stromerzeugende Turbine betrieben. Anschließend bringt eine Pumpe das Kondensat wieder auf Verdampfungsdruck.

²⁵ Annahme eines Brennstoffpreises von 9,40 € pro GJ Nettoheizwert

Abbildung 41: Funktionsprinzip ORC-Anlage (eigene Darstellung)

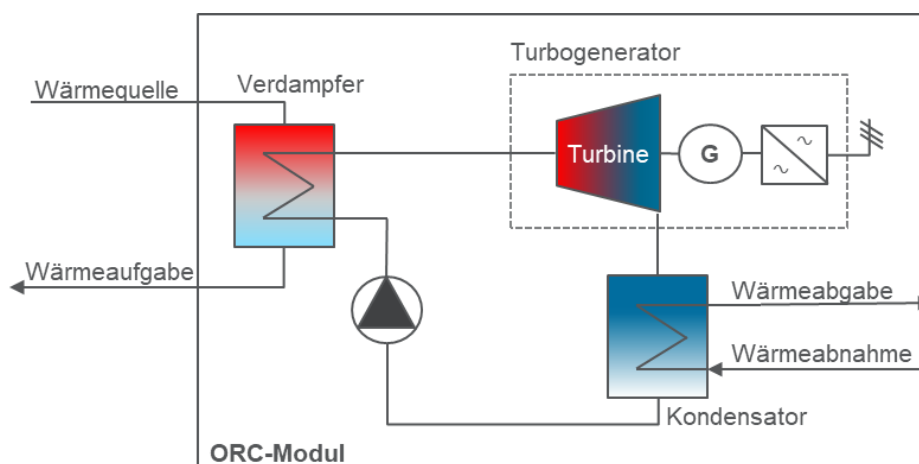


Tabelle 13: Steckbrief ORC-Anlage

Steckbrief: ORC-Anlage	
Zweck	Stromerzeugung
Typischer Einsatz	Meist nach dem Filter aufgrund höherer Staubbelastung vor dem Filter
Temperaturband	Abgas: 200 – 400 °C (höher rein technologisch möglich)
Anzahl Standorte / Anlagen	1 aktive Anlage (mehrere inaktive)
Verbreitungsgrad (Branchen)	Flachglasindustrie, da die größeren Volumenströme des Abgases zu einer besseren Wirtschaftlichkeit beitragen
Nachteile	- Hohe Anschaffungskosten - Lautstärke des Überdruckventils - Wartungsintensiv
Vorteile	- Nutzung eines breiten Temperaturfensters möglich - Keine Abnahmelimitation bei elektrischer Umwandlung von Abwärme - Aufgrund des niedrigen Siedepunktes des Arbeitsfluids bereits bei Temperaturen von 100 °C (z. B. in Kombination mit Wärmetauscher) - Geringe Korrosionsgefahr aufgrund fehlender Kondensation und damit eine hohe Lebensdauer von bis zu 30 Jahren [40] - Sehr kompakt aufgrund einer hohen Flüssigkeitsdichte [40] - Kein Wasseraufbereitungssystem und Entlüfter benötigt [40]
Kosten	Zwischen 2.000 €/kW (5.000 kW Anlage) und 4.000 €/kW (80 kW Anlage) [40]
Perspektiven	- Knowhow-Aufbau erforderlich für reibungslosen Betrieb und weitere Verbreitung

5.2 Aktueller Stand – Einsatz von Abwärmerückgewinnungstechnologien

Die folgende Tabelle zeigt die verschiedenen Abwärmerückgewinnungstechnologien, die neben einem Regenerator oder Rekuperator an deutschen Glasherstellungsstandorten zum Einsatz kommen. Für jede dieser Technologie wird die Anzahl der Standorte angegeben, an denen diese Technologie genutzt wird.

Tabelle 14: Bereits genutzte Technologien der Wärmerückgewinnung²⁶

Technologie	Anzahl Anlagen
Wärmetauscher	30
Abhitzeessel	11
Vorwärmer	8
BHKW/KWK	2
ORC	1
Wärmeverschieber	3
SUMME	55

In Deutschland gibt es 93 Hüttenstandorte. An diesen können eine oder mehrere Anlagen zur Wärmerückgewinnung installiert sein. An manchen Orten werden die Abgasströme mehrerer Wannen zusammengefasst und somit zusammen behandelt, z.B. indem derselbe Filter angeschlossen ist. Jede Wanne am Standort kann aber auch mit einem eigenen Abgasbehandlungssystem versehen sein. Daher sind generelle Aussagen zur Zahl der Standorte mit einer Abwärmerückgewinnungstechnologie nicht möglich.

Aus Tabelle 14 geht jedoch hervor, dass Wärmetausche am häufigsten zum Einsatz kommen, gefolgt von Abhitzeesseln. Während Abhitzeessel vorwiegend in der Flachglasindustrie zum Einsatz kommen, werden Gemengevorwärmer bisher ausschließlich in der Behälterglasindustrie verwendet, da nur hier der Mindestscherbenanteil von 50 % im Gemenge erreicht wird.

5.3 Zukünftige Entwicklungen

Bisher wurde bei der Verwendung von Oxy-Fuel-Wannen auf Wärmerückgewinnung verzichtet. Im Jahr 2010 wurde ein Verfahren, das die Abwärme auch von Oxy-Fuel Wannen nutzen kann entwickelt. Bis heute wurde das Verfahren erst in zwei Pilotprojekten angewendet.

Das sogenannte OPTIMELT™ Verfahren nutzt ähnliche Regeneratoren, die herkömmlich an einer regenerativen Wanne zum Einsatz kommen. Die verwendete Wärmerückgewinnungstechnologie OPTIMELT™ Thermo-Chemical Regenerator (TCR) wandelt ein Gemisch aus Erdgas und dem rückgeführten Rauchgas mithilfe der gespeicherten Abwärme in ein heißes Synthesegas um. Die Umwandlung passiert dabei durch die endotherme Reaktion von Erdgas mit Wasserdampf und CO₂, bei der H₂ und CO als heißer Synthesekraftstoff entsteht [41]. Das TCR-System wird bei Atmosphärendruck und ohne separate Dampferzeugung und Katalysatoren betrieben. Die Regeneratoren im OPTIMELT™-Verfahren sind dabei nur etwa ein Drittel so groß wie die luftbetriebenen Regeneratoren [42]. Dementsprechend können sie auch an kleineren Standorten installiert werden.

²⁶ Quelle: HVG Berichte & Datenbanken und Umweltberichte der Unternehmen; Erfassungszeitraum bis 2018

Die Verwendung des OPTIMELT™ Verfahren soll etwa 20 % Energieeinsparung im Vergleich zu Oxy-Fuel-Wannen und 30 % bei Umrüstung von Schmelzöfen mit regenerativer Luftvorwärmung erzielen [41]. Die Höhe der Energieeinsparungen hängt jedoch von mehreren Faktoren ab. So werden höhere Einsparungen z. B. bei einem größeren Schmelzofen, einer besseren Isolation, einer höheren Rauchgastemperatur oder einer höheren Ziehgeschwindigkeit erreicht. Ein höherer Scherbenanteil im Gemenge führt jedoch aufgrund eines geringeren Wärmeeintrags und weniger Gemengegase zu geringeren Energieeinsparungen [42].

Bis zum heutigen Zeitpunkt wurde das OPTIMELT™-Verfahren mit zwei unterschiedlichen Wannen im Rahmen von Pilotprojekten verwendet, das eine Mal mit einer Rekuperativ-Wanne und das andere Mal mit einer Oxy-Fuel-Wanne. Im Jahr 2014 wurde das TCR-System in Pavisa (Mexiko) an einem rekuperativen Schmelzofen mit 50 Tonnen täglicher Schmelzleistung installiert und gestartet. Insgesamt traten keine gravierenden technischen Probleme auf und die Glasqualität konnte gehalten werden. Im Vergleich zur Oxy-Fuel Wanne konnten die CO₂-Emissionen gesenkt und im Durchschnitt 16 % der eingesetzten Energie gespart werden. Die Höhe der anderen Schadstoffe (NO_x, SO_x, CO, etc.) beliefen sich auf ein ähnliches Niveau wie bei einer Oxy-Fuel Wanne [42] [41].

Im Jahr 2017 wurde im Rahmen eines zweiten Projektes in Leerdam (Niederlande) das OPTIMELT™ Verfahren für einen der größten Hersteller von Glasgeschirr installiert. Die betreffende Oxy-Fuel-Wanne war diesmal mit über 100 Tonnen täglicher Schmelzleistung größer. Im Rahmen des Projektes wurde die Wanne in zwei Betriebszuständen betrieben: Im Oxy-Fuel-Betrieb (Verbrennung von Erdgas mit Sauerstoff) und im OPTIMELT™-Verfahren (Verbrennung des Synthesegases aus dem Regenerator mit Sauerstoff). Die Auswertung des Libbey Projektes rund zwei Jahre nach Beginn zeigt, dass im Vergleich zur vorher installierten rekuperativen Wanne im OptiMelt-Betrieb 53 % des Energieeinsatzes gespart werden konnte und im Vergleich zum Oxy-Fuel-Betrieb der Wannen immerhin 13,5 % (Stand: Mai 2019). Bezüglich der Emissionen wurde 16 % weniger CO₂, ca. 5 % weniger NO_x und etwa 17 % weniger SO_x ausgestoßen als bei der Oxy-Fuel Wanne. Die Glasqualität konnte auch in diesem Projekt beibehalten werden [43].

Zwar zeigten die beiden bisherigen Pilotprojekte, dass deutliche Einsparungen sowohl im Energieeinsatz als auch in den Emissionen erzielt werden konnten, nur waren die Energieeinsparungen im Vergleich zur Oxy-Fuel Wanne nicht so hoch, wie zunächst erwartet. Die nächsten Entwicklungsschritte sehen daher folgende drei Änderungen vor [43]:

- Eine Minimierung des Lufteintritts
- Bessere Isolierung von schrägen Leitungen und Türen, da Wärmeverluste am Regenerator die rückgewinnbare Energie begrenzen
- Änderung des traditionellen Regenerator-Designs in eine integrierte äußere Stütz- und Dichtungsstruktur, da sich das bisherige Design schlecht versiegeln lässt und hohe Wärmeverluste an den Tragwerken und schrägen Leitungen entstehen

6 Barrieren

Für die Identifizierung der Barrieren waren Expertengespräche und Interviews mit Energiemanagern und Anlagenherstellern eine der maßgeblichen Quellen. Wie bereits in Kapitel 3.5.2 eingeführt, können diese in unterschiedlichen Kategorien zusammengefasst werden, die im Folgenden näher beschrieben und erläutert werden. Tabelle 15 gibt einen Überblick zu den bestehenden Barrieren.

Tabelle 15: Barrieren für eine verstärkte Abwärmenutzung in der Glas- und Mineraldaserindustrie

Kategorie	Barriere
Wirtschaftlich	Hohe Amortisationszeiten der Abwärmenutzungstechnologien
	Kundeneinschätzung zur Wirtschaftlichkeit
	Fehlende Lebenszyklusanalysen
Regulatorisch	Fehlende (Förder-)Anreize (Aussage mehrerer Interviewpartner)
	Belastung von Abwärmeverstromung durch EEG-Umlage und Steuern
	Lärmschutzbestimmungen (Einzelfall)
Technisch	Komplexität der technischen Umsetzung (es muss der ganze Prozess betrachtet werden)
	Nachträgliche Anpassungen des Abwärmenutzungskonzepts sind nur bedingt möglich
	Mangel an Technologien zur Nutzung von diffuser Abwärme
	Unzulängliche Technologiereife hinsichtlich der besonderen Rahmenbedingungen der Glasindustrie, bspw. bei ORC-Anlagen
Strukturell	Limitierte Abnahmepotenziale

6.1 Wirtschaftliche Barrieren

Die in den Interviews und Expertengesprächen bedeutsamsten Barrieren zur Implementierung von Abwärmenutzungstechnologien sind finanzieller Natur. Zusatz- oder spätere (nicht im Rahmen einer Hauptreparatur ausgeführten) Anlagenbauten und damit verbundene Investitionen müssen in der (Glas-)Industrie in der Regel eine Amortisierung von maximal 2-3 Jahren vorweisen. In wenigen Ausnahmen werden für Energieprojekte auch Amortisationszeiten von 4-5 Jahren angesetzt. Im Austausch mit Industrieexperten und Energiemanagern hat sich das einheitliche Bild abgezeichnet, dass an diesem Kriterium viele Projekte zur erweiterten/vollständigen Abwärmenutzung scheitern. Alle wirtschaftlichen Lösungen seien bereits umgesetzt und alle weiteren Optionen werden stetig auf ihre finanzielle Umsetzbarkeit geprüft, häufig jedoch mit ausbleibendem Erfolg. Dies liege häufig an regulatorischen Rahmenbedingungen, die zu ungünstigen Kostenbewertungen führen. Regulatorische Barrieren werden aber als gesonderter Punkt im Folgenden betrachtet.

In der Literatur bestätigt sich dieses Bild. Allerdings werden noch weitere Gründe für das Scheitern einer neuen/ergänzenden Abwärmeinstallation genannt. Einer der Gründe ist die fehlende Kundenakzeptanz von Projekten, deren Amortisationszeit die statische Amortisationszeit von 2-3 Jahren übersteigt. Die meisten Kunden setzen sich weniger mit der dynamischen Amortisationszeit der Technologiehersteller auseinander, sondern orientieren sich eher an statistischen Amortisationszeiten. Daher

würden viele Kunden selbst rentable Technologieentwicklungen, deren Amortisationszeiten 3 Jahre übersteigen, nicht akzeptieren. Da die Glasproduzenten daran interessiert sind, dass ihre Kunden die Investitionskosten mittragen, passt das Management seine Entscheidungen häufig an die Kundeneinschätzung an [23].

Hinzu kommt eine fehlende Lebenskostenanalyse. Würden die Glashersteller jegliche Kosteneinsparungen über den Lebenszyklus der neuen Technologie berücksichtigen, kämen deutlich mehr Abwärmetechnologien zum Einsatz, als es bisher der Fall ist. Für das Management vieler Glashersteller ist jedoch die absolute Höhe der Investitionssumme von größerer Bedeutung als die Energiekosten während des Glasherstellungsprozesses [23]. Scheinbar wird bislang der Abwärmennutzung von Seiten des Managements eine eher nachrangige Priorität eingeräumt.

6.2 Regulatorische Barrieren

Sowohl die Industrie als auch Anlagenhersteller von Abwärmennutzungstechnologien bemängelten fehlende Anreize zur Umsetzung von Energieeffizienzprojekten, um den wirtschaftlichen Barrieren entgegen zu wirken. Neue Technologien, speziell im Energiesektor, sind häufig durch hohe Anfangsinvestitionen charakterisiert. Dies wirkt sich negativ auf deren Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus, da gerade die anfänglichen Investitionskosten durch die Diskontierung stark ins Gewicht fallen.

Optionen, um Energieprojekte mit längeren Amortisationszeiten umzusetzen, z. B. über Contracting-Modelle oder Inanspruchnahme von Fördergeldern, scheinen derzeit nur begrenzte Wirkung zu entfalten. Contracting-Modelle sind häufig mit weiteren Hürden, wie fehlendem Vertrauen zum Anbieter oder begrenzter Verfügbarkeit, verbunden. Die Bewerbung um Fördergelder wird darüber hinaus oft als zu aufwendig bewertet und lohnt sich nur für Großprojekte.

Für Technologien zur Stromerzeugung wurde zudem die EEG-Umlage und die Besteuerung von Eigenstromproduktion häufig als Grund genannt, warum Investitionen in derartige Technologien ausbleiben. Ein anderes konkretes Beispiel waren Lärmeinhaltungsgrenzen bei einem bestimmten Systemzustand an einem Standort nahe einem Siedlungsgebiet, die den Betrieb einer ORC-Anlage auf Dauer nicht ermöglichten.

Als weitere Barriere werden von Verbänden, Forschungseinrichtungen und Unternehmen häufig auch die geforderten Produkt- und Prozesseigenschaften genannt. So wird z. B. bei Autoglas die Qualität über die maximal erlaubte Anzahl von Lufteinschlüssen definiert. Um diese Anzahl gering zu halten, bedarf es eines hohen Energieaufwandes im Schmelzprozess, der aus den genannten Qualitätsgründen nicht zu stark gesenkt werden sollte [23]. Grundsätzlich sollte der Energieeintrag in der Schmelze nicht durch Sparmaßnahmen beeinflusst werden, da der Energieeintrag von der verwendeten Technologie und der Qualitätsanforderung des Produktes abhängt. Diese Barriere betrifft jedoch ausschließlich Abwärmerückgewinnungstechnologien, die einen direkten Einfluss auf den Schmelzprozess haben.

6.3 Technologische Barrieren

Eine wichtige Erkenntnis aus den Interviews und Expertengesprächen ist, dass ein Abwärmennutzungskonzept immer ganzheitlich (die gesamte Prozesskette betrachtend) zu verstehen ist. In den Unternehmen müssen bewusste Entscheidungen getroffen werden, zu welchen Teilen die Abwärmennutzung thermisch, elektrisch, mechanisch oder chemisch erfolgen soll. Darauf basierend müssen geeignete Technologien ausgewählt und implementiert werden. Im Idealfall schöpft das Abwärmekonzept dann die gesamten nutzbaren Abwärmepotenziale aus. Nachträgliche Änderungen an diesem Konzept sind dann nur noch unter erschwerten Bedingungen möglich, da neue Abwärmesenken bereits installierte Technologien negativ beeinflussen können. Auch Energieeffizienzmaßnahmen an der „Vorderseite“ der Prozesskette, z. B. Optimierung an der Schmelzwanne, können zu erheblichen Änderungen in der Abwärmennutzung, z. B. durch Reduzierung anfallender Abwärme, führen. Im Extremfall führt eine

kontinuierliche Elektrifizierung des Produktionsprozesses zu einem kompletten Schwinden des Abwärmepotenzials. Diese Zusammenhänge machen verständlich, warum zuweilen trotz bestehender Potenziale keine zusätzliche Nutzung dieser stattfindet. Ein Eingriff könnte das bestehende Nutzungskonzept nachteilig beeinflussen.

Das Fraunhofer ISI weist zudem darauf hin, dass in vielen Anlagen schlichtweg nicht genug Platz für die Installation einer zusätzlichen Abwärmerückgewinnungstechnologie ist. Demnach sind fehlende bauliche Möglichkeiten oft ein wesentlicher Grund für die Entscheidung gegen die zusätzliche Nutzung von weiterer Abwärme [23].

Ein weiterer Aspekt sind technologische Grenzen in der Nutzung der diffusen Abwärmenutzung. Energiemanager geben häufig an, dass nicht nur deren Quantifizierung eine große Herausforderung ist, sondern auch, bis auf wenige Ausnahmen, keine technische Lösung bekannt sei, die sich die nicht-gefasste Abwärme zu Nutzen macht. Aufgrund Ihrer geringeren Energiedichte und aufwendigen Einsammlung ist es in der Regel günstiger, diffuse Abwärme zu vermeiden, statt sie zu nutzen. Dies ist auch im Sinne der allgemein geltenden Abwärmekaskade „Vermeiden – Reduzieren – Nutzen“. Viele Unternehmen und Energiemanager setzen daher eher auf Investitionen in verbesserte Wärmedämmung der Flächen und Leitungen, an denen sie abgestrahlt wird, statt sich über deren Nutzung Gedanken zu machen.

Als letzter Aspekt, der unter diese Barriere eingestuft werden kann, wurde in den geführten Interviews häufig eine unzulängliche Technologiereife angemerkt. Konkret seien ORC-Anlagen noch häufig zu laut und deren Wirkungsgrade nicht hoch genug sowie der Wartungsaufwand auf Grund der Abgasrandbedingungen (Staubfracht) zu hoch, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten. Ein Staubverdichter zur Erzeugung von Druckluft ist derzeit laut den Befragten Anlagenbetreibern noch nicht implementierungsfähig, da die Technologie derzeit noch kein konstantes Druckniveau aufrechterhalten kann.

6.4 Strukturelle Barrieren

Ein letzter struktureller Aspekt sind limitierte Abnahmepotenziale, das heißt das Vorhandensein von ausreichenden Wärmesenken. Liegt die Produktionsanlage in einem Industriestandort mit vielen Wärmeabnehmern kann das vollständige, gefasste Abwärmepotenzial über Wärmeverteilnetzwerke direkt weitergeleitet und genutzt werden. Ist dies jedoch nicht der Fall, stellt sich die Frage, welchen Wärmesenken die rückgewonnene Abwärme zugeführt wird, speziell wenn der Wärmebedarf am Standort selbst bereits ausreichend gedeckt ist. Ist die Entfernung zu Wärmeabnehmern sehr groß, können insbesondere die verbundenen hohen Investitionen eine Barriere für die Umsetzung der Maßnahme sein [23].

Die Fragestellung der limitierten Abnahmepotenziale ist aber auch eine technologiespezifische. So gab mindestens einer der Energiemanager an, Potenzialstudien über verschiedene Technologien durchgeführt zu haben. Ein Ergebnis daraus war, dass Technologien zur Erzeugung von Prozesskälte durch Absorptionskältemaschinen zwar eine sinnvolle Alternative für die Abwärmenutzung sein können, der Kältebedarf am Produktionsstandort aber zu gering sei und somit das volle Abwärmepotenzial nicht ausschöpfen würde. Technologien zur Abwärmenutzung, die Wärme oder Kälte geführt sind, sind ohnehin zudem meist saisonalen Schwankungen ausgesetzt und daher eher anfällig für diese Barriere. Technologien zur Stromerzeugung hingegen sind weniger anfällig für diese Barriere.

7 Empfehlungen

In diesem Kapitel wird zunächst der Status quo der regulatorischen Rahmenbedingungen im Bereich Abwärmenutzung umrissen. Dafür werden die bestehenden direkten und indirekten Maßnahmen zusammengefasst und näher beleuchtet. Vor dem Hintergrund des Kapitels 6 werden daraufhin mögliche Ansätze diskutiert, die den Barrieren entgegenwirken können.

7.1 Status quo der regulatorischen Rahmenbedingungen

Bereits heute ist eine Reihe von Maßnahmen regulatorisch implementiert, um die Industrie bei der Überwindung der genannten und weiteren Barrieren zu unterstützen. Tabelle 16 gibt eine Übersicht zu zentralen bestehenden Maßnahmen, die eine Abwärmevermeidung und -nutzung direkt oder indirekt unterstützen.

Tabelle 16: Auswahl direkter und indirekter Maßnahmen zur Unterstützung der Abwärmevermeidung und -nutzung

Maßnahme	Inhalt
Förderprogramm „Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft“ - Modul 1: Querschnittstechnologien (direkte Maßnahme)	Wahlweise Investitionszuschuss oder zinsverbilligter Kredit für Investitionen in energieeffiziente Technologien, inkl. Anlagen zur Abwärmenutzung bzw. Wärmerückgewinnung (Link zu weiterführenden Informationen)
Förderprogramm „Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft“ - Modul 4: Energiebezogene Optimierung von Anlagen und Prozessen (direkte Maßnahme)	Wahlweise Investitionszuschuss oder zinsverbilligter Kredit für systemische Optimierungen durch eine Kombination verschiedenster Effizienzmaßnahmen, inkl. Investitionen zur Nutzung von Abwärme (Link zu weiterführenden Informationen)
Wettbewerb Energieeffizienz (direkte Maßnahme)	Investitionszuschuss für investive Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Unternehmen basierend auf einem Förderwettbewerb (Link zu weiterführenden Informationen)
Energieberatung im Mittelstand (direkte Maßnahme)	Geförderte Energieberatung (Link zu weiterführenden Informationen)
Förderprogramm „Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft“ - Modul 3: MSR-Technik, Sensorik und Energiemanagement-Software (indirekte Maßnahme)	Förderung des Erwerbs und der Installation von Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, Sensorik sowie Energiemanagement-Software zur Einbindung in ein Energie- oder Umweltmanagementsystem (Link zu weiterführenden Informationen)
Initiative Energieeffizienznetzwerke (indirekte Maßnahme)	Gezielter Austausch von Unternehmen und externen Experten zur Steigerung der Energieeffizienz (Link zu weiterführenden Informationen)
Energieaudits und Energiemanagementsysteme, nach §§ 8 ff. EDL (indirekte Maßnahme)	Verpflichtende Durchführung von Energieaudits in Nicht-KMU (Link zu weiterführenden Informationen)

Maßnahme	Inhalt
Energieforschungsrahmenprogramm (indirekte Maßnahme)	Forschung und Entwicklung im Bereich zukunftsweisender Energietechnologien (Link zu weiterführenden Informationen)

Die zentrale Maßnahme für die Implementierung von Abwärmenutzung ist das Förderprogramm „Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft“, in das u. a. die frühere separate Förderung der Abwärmerichtlinie integriert wurde. [44] Das Programm besteht aus vier Modulen, die jeweils unterschiedliche Förderschwerpunkte haben. Drei der Module sind dabei für Abwärmenutzungskonzepte relevant, siehe Tabelle 16. Modul 1 fördert einzelne Investitionen in Querschnittstechnologien, worunter auch Anlagen zur Abwärmenutzung bzw. Wärmerückgewinnung zählen. Modul 3 fördert den Erwerb und die Installation von Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, Sensorik sowie Energiemanagement-Software, was Abwärmenutzungskonzepte indirekt unterstützt. Modul 4 deckt energiebezogene systemische Optimierungen von Anlagen und Prozessen ab, worin Investitionen zur Nutzung von Abwärme, zur Einspeisung in Wärmenetze oder Verstromung von Abwärme enthalten sein können. Die Antragsteller haben bei der Art der Förderung die Wahl zwischen Investitionszuschüssen, die über das BAFA abgewickelt werden, und zinsvergünstigten Krediten, die die KfW anbietet. Die Förderquote der Zuschüsse beträgt bis zu 40 % der förderfähigen Investitionskosten. Die zinsgünstigen Kredite gewähren einen Tilgungszuschuss von bis zu 55 %. [45].

Direkte Förderung für Investitionen in Abwärmenutzungskonzepte können Unternehmen auch im Rahmen des Wettbewerbs Energieeffizienz erhalten, dem Nachfolgeprogramm zu „STEP up!“. Hier werden im Rahmen eines Wettbewerbs um das jährliche Förderbudget diejenigen Projekte gefördert, die die höchste Fördereffizienz aufweisen, das heißt die höchsten Emissionseinsparungen pro „Förder-Euro“ erbringen.

Weitere relevante bestehende Maßnahmen sind unter anderem die Energieberatung im Mittelstand, im Rahmen derer hochwertige Energieaudits für kleine und mittlere Unternehmen mit einem Zuschuss von 80 % der Beratungskosten, aber höchstens 6.000 Euro, gefördert werden. Für einen systematischen und zielgerichteten Erfahrungsaustausch zwischen Unternehmen bietet die Initiative Energieeffizienznetzwerke eine geeignete Plattform. Die Glasindustrie ist mit sieben Netzwerken (Rennsteigenergie, GlasNET, EffiNet@SCHOTT, GlasNET 2.0 und Rennsteigenergie2.0) über den BV-Glas vertreten [46].

7.2 Ideale Rahmenbedingungen und der Weg dorthin

Aus Sicht der Industrie ist der zentrale Aspekt von idealen Rahmenbedingungen eine Förderlandschaft, die es ermöglicht die Investitionskosten der Unternehmen zu senken und so die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen herstellt. Zusätzlich sollten sich aus dem regulatorischen Rahmen keine unnötigen Einschränkungen ergeben.

Für die in Kapitel 6 genannten Barrieren besteht eine Vielzahl an möglichen Lösungswegen, Tabelle 17 gibt hierzu einen Überblick. Viele der Lösungsansätze sind bereits verfügbar oder werden derzeit angeregt.

Tabelle 17: Barrieren bei der Abwärmenutzung und mögliche Lösungsansätze

Kategorie	Barrieren	Lösungsansätze
Wirtschaftlich	Hohe Amortisationszeiten der Abwärmenutzungstechnologien	Information und Beratung der Unternehmen Nutzung bestehender Förderprogramme Kostensenkung durch Weiterentwicklung & Etablierung der Technologien CO ₂ -Bepreisung oder andere verpflichtende Maßnahmen
Regulatorisch	Fehlende (Förder-)Anreize (Aussage mehrerer Interviewpartner)	Information und Beratung der Unternehmen zu bestehenden Förderprogrammen und Vorteilen der Abwärmenutzung
	Belastung von Abwärmeverstromung durch EEG-Umlage und Steuern	EEG-Umlagenbefreiung beim Eigenverbrauch von Strom aus sekundären Stromerzeugungsanlagen
	Lärmschutzbestimmungen (Einzelfall)	Weiterentwicklung der Technologie
Technisch	Komplexität der technischen Umsetzung (es muss der ganze Prozess betrachtet werden)	Beratung und Betreuung durch externe Experten, bspw. Energieberater Fort- und Weiterbildung des Personals Modulare Umsetzung, soweit möglich
	Nachträgliche Anpassungen des Abwärmenutzungskonzepts sind nur bedingt möglich	Modulare Umsetzung, soweit möglich
	Mangel an Technologien zur Nutzung von diffuser Abwärme	Entwicklung und Erprobung von geeigneten Technologien im Rahmen von geförderten Forschungsprojekten
	Unzulängliche Technologiereife, bspw. bei ORC-Anlagen	Weiterentwicklung der Technologie unterstützt durch Forschungsförderung
Strukturell	Limitierte Abnahmepotenziale	Ausweitung von Wärmenetzen Abwärmeverstromung

7.2.1 Überwinden wirtschaftlicher Barrieren

Die Durchführung von Effizienzmaßnahmen wird nie zum Kerngeschäft des produzierenden Gewerbes gehören. Zudem wird der Anspruch der Industrie an die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen auch perspektivisch in Konflikt zu den Amortisationszeiten aufwendigerer Maßnahmen stehen. Gleichzeitig gibt es weiterhin aber eine Vielzahl an Maßnahmen, deren Wirtschaftlichkeit auch aus Industrieperspektive gewährleistet ist oder durch eine Förderung angepasst werden kann, die von Unternehmen aufgrund anderer Hemmnisse aber weiterhin nicht gehoben werden.

Neben einer verstärkten Information und Beratung von Unternehmen (siehe dazu auch Abschnitt 7.2.2) ist es denkbar, vor allem perspektivisch, auch mit anderen Maßnahmen die wirtschaftlichen Barrieren zu adressieren. So könnten Unternehmen durch eine ausgeweitete CO₂-Bepreisung oder andere verpflichtende Maßnahmen „zu ihrem Glück gezwungen werden“. So wurde in anderen Ländern, zum Beispiel in Italien, im Themenkomplex Energieeffizienz ein Handel mit „weißen Zertifikaten“ eingerichtet. Unternehmen sind verpflichtet, bestimmte Effizienzziele zu erreichen. Tun sie das nicht,

müssen sie stattdessen Zertifikate zukaufen. Über den Preis der Zertifikate kann so eine weitere Komponente der „Wirtschaftlichkeit“ für Unternehmen erzwungen werden.

Um Potenziale mit kurzen Amortisationszeiten zu heben, die im Rahmen von Energieaudits identifiziert, von den Unternehmen aber nicht umgesetzt werden, ist es denkbar, eine verpflichtende Umsetzung der identifizierten Maßnahmen zu fordern. Unternehmen sollten nur mit einer fundierten maßnahmenpezifischen Begründung von einer verpflichtenden Umsetzung befreit werden können. Im Rahmen eines solchen Prozesses können beide Seiten lernen. Der Regulator wird auf relevante Hemmnisse in den Unternehmen aufmerksam und die Unternehmen können unter anderem auf bestehende Förderprogramme hingewiesen werden.

7.2.2 Überwinden regulatorischer Barrieren

Einige Interviewpartner bemängelten fehlende (Förder-)Anreize. Hierzu hat sich in ähnlichen Kontexten bewährt, die Unternehmen zu bestehenden Förderprogrammen (siehe Tabelle 16) zu informieren und sie zu der Umsetzung von konkreten Maßnahmen in ihrem Unternehmen durch Experten beraten zu lassen. Auch im Kontext der Abwärmenutzung gibt es zunehmend gute Unterstützung und Beratung, beispielsweise durch Hausbanken. Zudem spezialisiert sich eine steigende Anzahl an Energieberatern auf dieses Thema. Zusätzlich kann es hilfreich sein, auch die Hersteller von relevanten Technologien über die bestehenden Förderprogramme zu informieren, sodass auch diese an die Unternehmen herantreten können.²⁷

Ebenso können eine Weiterentwicklung und Ergänzung der bestehenden Maßnahmen regulatorische Barrieren abbauen. Eine denkbare Maßnahme wäre beispielsweise den Eigenverbrauch von Strom aus sekundären Stromerzeugungsanlagen, die Abwärme nutzen, von der EEG-Umlage zu befreien. Dies könnte Effizienzmaßnahmen wie ORC-Anlagen zur Wirtschaftlichkeit führen.

7.2.3 Überwinden technologischer Barrieren

Die technologischen Barrieren können in zwei Arten aufgeteilt werden: in nur bedingt sowie gut auflösbare Hemmnisse.

Da Abwärmenutzungskonzepte sich am Status quo der Prozesse und Energieeinsätze in den Unternehmen orientieren und dahingehend optimiert werden, haben nachträgliche Änderungen am Gesamtsystem, bspw. durch den Einsatz energieeffizienterer Technologien, immer auch einen Effekt auf das Abwärmenutzungskonzept. Diesem Effekt kann nur bedingt begegnet werden. So können bei der Erstellung des Abwärmenutzungskonzept mögliche künftige Änderungen der Gesamtanlage berücksichtigt und das Abwärmenutzungskonzept so weit wie möglich modular gestaltet werden, was eine nachträgliche Anpassung erleichtern kann.

Auf der anderen Seite bestehen Hemmnisse, denen gut begegnet werden kann. So können unausgereifte und neuartige Technologien im Rahmen von geförderten Forschungsprojekten weiterentwickelt und erprobt werden. Fehlendes internes Wissen kann durch das Hinzuziehen externer Berater und die Weiterbildung des eigenen Personals ausgeglichen werden. Der Austausch mit Best Practice Anlagen, beispielsweise bei ORC-Anlagen, und anderen Unternehmen, beispielsweise im Rahmen der Energieeffizienznetzwerke, kann die Umsetzung im eigenen Unternehmen fördern. Ein wichtiger Aspekt scheint hierbei eine Sammlung von positiven Umsetzungsbeispielen zu sein, da für viele vielversprechende Technologien noch immer Skepsis ab- und Vertrauen aufgebaut werden muss.

²⁷ Siehe hierzu auch S. 96 ff von Fraunhofer ISI et al. (2019) Evaluierung und Weiterentwicklung des Energieeffizienzfonds. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/evaluierung-und-weiterentwicklung-des-energieeffizienzfonds.html>

8 Literaturverzeichnis

- [1] „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Klimaschutzplan 2050,“ [Online]. Available: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_kurz_f_bf.pdf. [Zugriff am 24 Februar 2017].
- [2] Umweltbundesamt, *Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen*, Dessau, 2018.
- [3] BMU, Arbeitsgruppe IK III 1, „Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik,“ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin, 2018.
- [4] B. Fleischmann, K. Arnold, G. Holtz und et al., „Flexibilitätspotenziale und -perspektiven in der Behälterglasherstellung S. 73 - 95,“ In: F. Ausfelder, A. Seitz, S. von Roon (Hrsg.): *Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie - Methodik, Potenziale, Hemmnisse*. Dechema, Frankfurt am Main, 2018.
- [5] B. Fleischmann, „Flexibilitätspotenziale und -perspektiven der Glasindustrie bezüglich des Einsatzes erneuerbarer elektrischer Energie. S. 108 - 113,“ In: F. Ausfelder, A. Seitz, S. von Roon (Hrsg.): *Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie II - Analysen, Technologien, Beispiele*. Dechema, Frankfurt am Main, 2019.
- [6] B. Fleischmann, „Glasherstellung (Massenglas). S. 627 - 643,“ In: A. Sauer, E. Abele, H. U. Buhl (Hrsg.): *Energieflexibilität in der Deutschen Industrie*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2019.
- [7] B. Fleischmann, „Neuer Ansatz zur Bilanzierung des Energieeinsatzes bei der GLasherstellung und der Versuch der geschlossenen Darstellung von Kennzahlen zum Energieverbrauch aus der Produktionstechnik und aus statistischen (Wirtschafts-) Daten,“ *dgg journal*, Bd. 17, Nr. 3, pp. 11-22, 2018.
- [8] H. Jebsen-Marwendel und R. Brückner, „Temperaturabhängigkeit der Viskosität,“ in *Glastechnische Fabrikationsfehler*, Berlin, Springer-Verlag, 1980.
- [9] H. Scholze, „Viskosität,“ in *Glas-Natur, Struktur und Eigenschaften*, Berlin, Springer-Verlag, 1988.
- [10] SCHOTT, *Schott Technische Gläser - Physikalische und chemische Eigenschaften*, Mainz: SCHOTT, 1999.
- [11] Fachbereich Umweltschutztechnik, „VDI 2578 - Emissionsminderung - Glashütten,“ VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss, 2017.
- [12] Verallia, „Faszination Glas - Glasproduktion,“ 2019. [Online]. Available: <https://de.verallia.com/faszination-glas/glasproduktion>. [Zugriff am Juli 2019].

- [13] Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau, „Merkblatt über die Besten Verfügbaren Techniken (BVT) bei der Glasherstellung“, European Commission, 2013.
- [14] VDI 2578, *Emissionsminderung Glashütten*, 2017-05.
- [15] VDI 3469-1, *Emission control: Production and processing of fibrous materials - Fibrous dusts – Fundamentals, Overview*, Verein Deutscher Ingenieure, 2007.
- [16] M. Hagen, „Katalytische Filter zur Entstickung - Verfahren und Beispiele“, in *Gemeinsame Sitzung der Fachausschüsse 2 und 6 der DGG*, Würzburg, 2017.
- [17] B. M. Scalet, M. Garcia Munos, A. Q. Sissa, S. Roudier und L. Delgado Sancho, „Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass“, Joint Research Centre of the European Commission, 2013.
- [18] BV Glas e.V., „BV Glas Zahlen & Fakten“, 2019. [Online]. Available: <https://www.bvglas.de/zahlen-fakten/>. [Zugriff am 15 Juli 2019].
- [19] BV Glas e.V., „Publikationen“, [Online]. Available: <http://www.bvglas.de/presse/publikationen/Jahresberichte>. [Zugriff am 24 Februar 2019].
- [20] BV Glas e.V., „Jahresbericht 2017“, BV Glas, Düsseldorf, 2017.
- [21] B. Fleischmann, „Energieverbrauch der deutschen Glasindustrie“, in *HVG Fortbildungskurs 2010 - Energieverbrauch und Energierückgewinnung in der Glasindustrie*, Offenbach am Main, Verlag der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft, 2010, pp. 1-38.
- [22] Statistisches Bundesamt, *Energieverbrauchsdaten*, Wiesbaden, 2017.
- [23] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), „Energieverbrauch und CO2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente“, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2013.
- [24] S. Laux, H. Kobayashi und e. al, „Optimelt regenerative heat recovery for oxy-fuel fired glass furnaces“, *Glass Worldwide*, Nr. 85, pp. 98-99, Juni 2019.
- [25] J. De Diego und e. al, „Optimelt set to reduce emissions at Libbey's oxy-fuel fired furnace“, *Glass International*, Bd. 40, Nr. 7, pp. 75-78, 2017.
- [26] M. Van Valburg, „LIFE OPTIMELT - Demonstration of thermochemical reforming of natural gas for reducing GHG emissions in Energy Intensive Industries“, European Commission LIFE15 CCM/NL/000121, 15 07 2016. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=5684. [Zugriff am 25 10 2019].
- [27] PRAXAIR, Inc., „Life Optimelt“, Praxair Technology, Inc., 2017. [Online]. Available: <https://lifeoptimelt.com>. [Zugriff am 25 10 2019].

- [28] L'Air Liquide S.A., „Industrial results - Heat Recovery characteristics“, L'Air Liquide S.A., 2019. [Online]. Available: <https://www.oxyfuel-heatrecovery.com/results/industrial-results-heat-recovery-characteristics>. [Zugriff am 25 10 2019].
- [29] AGC Glass Europe SA, „Hot oxycombustion furnace design“, AGC Glass Europe SA, 2019. [Online]. Available: <https://www.agc-glass.eu/en/sustainability/production-process-and-technologies/hot-oxycombustion-furnace-design>. [Zugriff am 25 10 2019].
- [30] H.-J. Voss, „Glas,“ in *Chemische Technik. Band 8: Ernährung, Gesundheit, Konsumgüter*, Weinheim, Dittmayer, R. et al. (Hrsg.): Winnacker Kückler; Wiley-VCH Verlag, 2005.
- [31] F. Bruch, „Abwärmenutzung eines Kupolofens. Umweltinnovationsprogramm BMU Vorhaben 20119. UBA-FB AP 20119,“ Juni 2011. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abwaermenutzung-eines-kupolofens>. [Zugriff am 24 10 2019].
- [32] HEA - Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V., „Der GuD-Prozess,“ [Online]. Available: http://www.energiewelten.de/elexikon/lexikon/seiten/htm/0302_Kombination_von_Gas_und_Dampfturbinen_GuD_Prozess.htm. [Zugriff am 12 11 2019].
- [33] W. Trier, *Glasschmelzöfen: Konstruktion und Betriebsverhalten*, Springer-Verlag, 2013.
- [34] L. Springer, *Die Fortschritte der Glastechnik in den letzten Jahrzehnten*, Vieweg+Teubner Verlag, 1925.
- [35] K. Gitzhofer, „German contribution to the review of the reference document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry,“ UBA: UFOPLAN-Ref.-No. FKZ: 205 44 324/02. Hüttentechnisch Vereinigung Der Deutschen Glasindustrie e.V., Offenbach, 2007.
- [36] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „Process heat in industry and commerce,“ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2016.
- [37] EME GmbH, „Vorwärmung für Behälterglas - Eine rasante Entwicklung zum Erfolg,“ 2019. [Online]. Available: http://www.eme.de/de/gemengevorwaermung/vorwaermung_fuer_behaelterglas.html. [Zugriff am 3 März 2019].
- [38] G. Dolianitis, D. Giannakopoulos, C. Hatzilau, S. Karellas, E. Kakaras, E. Nikolova, G. Skarpetis, N. Christodoulou, N. Giannoulas und T. Zitounis, „Waste heat recovery at the glass industry with the intervention of batch and cullet preheating,“ *Thermal Science*, Bd. 20, p. 79, 2016.
- [39] ZIPPE Industrieanlagen GmbH, „ZIPPE Gemengevorwärmung - Nachhaltigkeit, die sich bezahlt macht,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.zippe.de/gemenge-vorwaermung/>. [Zugriff am 4 16 September 2019].
- [40] S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef und V. Lemort, „Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 22, Nr. June 2013, pp. 168-186, 2013.

- [41] A. J. S. E. J. L. C. J. L. G. J. L. S. J. W. K. J. B. R. J. F. A. a. K. H. Gonzalez, „Optimelt™ Regenerative Thermo - Chemical Heat Recovery for Oxy - Fuel Glass Furnaces,“ in *75th Conference on Glass Problems*, Columbus, The American Ceramic Society, 2015.
- [42] S. Laux, U. Iyoha, R. Bell, A. Francis, K. Wu, H. Kobayashi, J. de Diego und I. Praxair, „Enhanced Furnace Energy Efficiency with OPTIMELT TCR System,“ in *Glasstec*, Düsseldorf, 2016.
- [43] J. de Diego, M. van Valburg, F. Schuurmans, E. Sperry und J. Vetter, „Operation data from OPTIMELT™ Heat Recovery System on a Tableware Glass Furnace at Libbey Leerdam,“ in *Joint Meeting of DGG – USTV*, Nürnberg, 2019.
- [44] K. f. W. KfW, „Kredit 294 - KfW-Energieeffizienzprogramm – Abwärme,“ 2017. [Online]. Available: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/EE-Abw%C3%A4rme-\(294\)/#](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/EE-Abw%C3%A4rme-(294)/#). [Zugriff am 10 August 2018].
- [45] K. f. W. KfW, „Zuschuss 494 - KfW-Energieeffizienzprogramm – Abwärme Investitions-zuschuss,“ 2017. [Online]. Available: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/EE-Abw%C3%A4rme-Zuschuss-\(494\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/EE-Abw%C3%A4rme-Zuschuss-(494)/). [Zugriff am 10 August 2018].
- [46] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „Initiative Energieeffizienz Netzwerke,“ [Online]. Available: <https://www.effizienznetzwerke.org/initiative/unsere-netzwerke/>. [Zugriff am 13 11 2019].
- [47] J. G. Wüning und A. Milani, *Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen. Grundlagen - Brennertechnik - Anwendungen*, Essen: Vikan Verlag, 2007.
- [48] R. Günther, *Verbrennung und Feuerung*, Berlin: Springer Verlag, 1974.
- [49] N. Peters, „RWTH Aachen Technische Verbrennung. Vorlesungsskript,“ März 2010. [Online]. Available: https://www.itv.rwth-aachen.de/fileadmin/LehreSeminar/TechnischeVerbrennung/Technische_Verbrennung_Diplom.pdf. [Zugriff am 26 August 2019].
- [50] R. Conradt, „Thermodynamics of glass melting,“ in *Fiberglass and Glass Technology*, Berlin, Springer, 2010.
- [51] L. Heuser und S. F. Bartolomey, „Calorimetric characteristics of DGG 1 glass and melt. Poster basierend auf Projektarbeit "Kalorimetrische Bestimmung der Wärmekapazität-Temperatur-Verlaufs des Standardglas DGG-I zwischen 298 und 1673 K. RWTH Aachen, Inst. für Gesteinshüttenkunde 02/2016,“ in *90. Glastechnischen Tagung*, Goslar, 2016.
- [52] B. Fleischmann, „150 Jahre Siemens Glasschmelz-Wannenöfen in Deutschland,“ *dgg journal*, pp. 9-13, Mai/Juni 2017.
- [53] „Deutsche Emissionshandelsstelle,“ [Online]. Available: https://www.dhst.de/ShareDocs/Downloads/Archiv/Zuteilung_2008-2012/NAP%20II/20130228-NAP-Tabelle.pdf?__blob=publicationFile. [Zugriff am 23 Februar 2017].

- [54] B. f. W. u. A. BAFA, „Förderung von Querschnittstechnologien,“ 2016. [Online]. Available: http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Querschnittstechnologien/querschnittstechnologien_node.html. [Zugriff am 10 August 2018].
- [55] B. f. U. N. u. n. S. BMU, „Projektionsbericht 2017 für Deutschland,“ BMU, 2017.
- [56] B. f. W. u. E. BMWi, „Förderstrategie Energieeffizienz und Wärme aus erneuerbaren Energien,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin, 2017.
- [57] H. V. d. D. G. e. (. HVG, Fortbildungskurs 2010 - Energieverbrauch und Energierückgewinnung in der Glasindustrie, 2010.
- [58] S. Hirzel, B. Sontag und C. Rohde, „Industrielle Abwärmenutzung,“ Fraunhofer ISI, 2013.
- [59] G. Dr.-Ing. Falk, Universität des Saarlandes, 23 November 2017. [Online]. Available: <https://docplayer.org/68226983-Handout-vorlesung-glas-grundlagen-hohl-und-flachglasherstellung.html>. [Zugriff am 26 Juni 2019].
- [60] H. Kobayashi, „Thermochemical regenerative heat recovery process“. USA Patent 6113874, 5 September 2000.
- [61] VDI-Richtlinie 4670, Thermodynamische Stoffwerte von Feuchter Luft und Verbrennungsgasen, Berlin: Beuth Verlag, 2003.
- [62] K. Gitzhofer, „Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes zur effizienten Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung. Schlussbericht. Förderkennzeichen 206 42 300/02. Teilvorhaben 02: Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Glas- und Mineralfas,“ Umweltbundesamt, 2008.

A. Anhang

A.1 Methodik zur Bestimmung der Abwärmeströme

Grundsätzlich lautet die Formel zur Berechnung eines Wärmestromes ΔQ

$$\Delta Q = \Delta m \cdot \Delta c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

mit Δm als Massen- oder Volumenstrom in kg bzw. $\text{m}^3_{(N)}$, c_p als isobare spezifische Wärmekapazität in $\text{J}/(\text{kg K})$ bzw. $\text{J}/(\text{m}^3_{(N)} \text{K})$ und ΔT als Temperaturunterschied in K.

Der Temperaturunterschied ΔT wird mithilfe real gemessener Temperaturen je Prozessschritt bestimmt. Die verwendeten Temperaturen geben einen repräsentativen Mittelwert an, der auf Messwerte der Unternehmen (Betriebswerte) und der HVG basiert. Eine Mittelwertbildung ist notwendig, da die Temperaturen u.a. je nach Tonnage, Farbe und Fahrweise stark variieren. Die Temperaturmessung im Abgasstrom ist im Vergleich zum Massestrom Glas komplizierter, da die üblichen Messgeräte der Unternehmen die Temperatur des Messgerätes mit einbeziehen. Die Messwerte der HVG sind hingegen deutlich genauer, da die HVG eine Messtechnik verwendet, die die reinen Medientemperaturen bestimmt (Absaugethermometer).

Der Massen- und Volumenstrom Δm bezieht sich stets auf eine Tonne verkaufsfähiges Glas und ist für die beiden Massenströme Glas und Abgas zu unterscheiden. Da die einzige verfügbare Angabe der Jahrestonnage in Tonne verkaufsfähiges Glas angegeben ist, beziehen sich alle Wärmeströme des Massenstromes Glas(-schmelze) auf eine Tonne verkaufsfähiges Glas. Der Bezug auf eine Tonne geschmolzenes Glas, wie bei der Angabe von Energieverbräuchen üblich, würde nur nach Abschätzung der geschmolzenen Tonnagen mit Hilfe des sogenannten Pack-to-melt-Ratio möglich sein. Da dieser Wert jedoch je nach Standort, Glastype, Farbe und vieler Betriebsparameter schwankt und mit einer weiteren Unschärfe in die Ergebnisse eingehen würde, bleibt nur der Bezug auf die Tonne verkaufsfähiges Glas als Alternative.

Der Volumenstrom des Abgases ist ebenfalls auf die Tonne verkaufsfähiges Glas bezogen. Ausgehend vom Energieeinsatz kann bei Annahme des Brennstoffes und einer Luftzahl $\lambda=1,05$ das Abgasvolumen zur Herstellung einer Tonne Glas angegeben werden. Dies geschieht mit Hilfe der Verbrennungsrechnung [47] [48] [49]. Auf dem Weg vom Verbrennungsraum zum Kamin nimmt das Abgasvolumen auf Grund der Falschlufte immer mehr zu. Dies wird bei den Volumenströmen pro Tonne Glas berücksichtigt. Gleichzeitig ändert sich die Wärmekapazität des Abgasstromes, die im Folgenden beschrieben wird.

Bei der Betrachtung von Gasvolumen in m^3 müssen die Temperatur und der Druck bekannt sein, um eine eindeutige Aussage zu erhalten. Daher sind die Volumenströme auf 0°C und $1.013,25 \text{ hPa}$ bezogen und werden als Normkubikmeter $\text{m}^3_{(N)}$ bezeichnet bzw. kenntlich gemacht.

Die Ermittlungsmethode der isobaren spezifischen Wärmekapazität wird im Folgenden für die beiden Massenströme beschrieben.

Spezifische Wärmekapazität von Abgasen

Die spezifische Wärmekapazität von Gasen (Abgas) hängt von der Zusammensetzung des Abgases und dem betrachteten Temperaturbereich ab. Das Abgas nach dem Verbrennungsraum der Glasschmelzwanne verändert sich auf seinem Weg durch den Regenerator, den Fuchs (Abgaskanal), den Filter und den Kamin. Sowohl die Temperatur als auch seine chemische Zusammensetzung muss daher bei der Berechnung der Wärmekapazität berücksichtigt und an die jeweilige Situation angepasst werden. Die Veränderung der Temperatur des Abgases auf seinem Weg zum Kamin kann den Sankey-Diagrammen (Abbildung 16, Abbildung 21, Abbildung 27) entnommen werden. Die Abgaszusammensetzung verändert sich vor allem auf Grund von Undichtigkeiten der einzelnen Anlagenteile und der Sauerstoff-

sowie Stickstoffanteil im Abgas steigt langsam an. Der CO₂-Anteil und die Abgasfeuchte nehmen entsprechend ab. Typische Werte für das Abgas einer Brennstoff-Luft-Befuerung bei einer U-Flammenwanne sind in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Variation der Abgaszusammensetzung und -temperaturen

Beispielhafte Messwerte der Abgaszusammensetzung und der -temperatur auf dem Weg vom Ausgang des Verbrennungsraumes zum Filterausgang für eine Verbrennung von Erdgas H (Russland) mit Luft als Oxidator.				
		Kammerkopf	Kammerfuß	Reingas
Temperatur	in °C	1.425	500	<380
O ₂	in Vol.-%	2,3	6,2	7,5
N ₂		66,9	69,2	70,4
CO ₂		12,9	10,2	9,0
H ₂ O		17,2	13,6	12,3
CO		0	0	0
SO ₂		0	0	0

CO und SO₂ sind, wenn überhaupt, nur in geringen Anteilen vorhanden und können bei einer pauschalen Betrachtung vernachlässigt werden, da sie in dieser Größenordnung praktisch keinen Einfluss auf die Wärmekapazität haben.

Dagegen haben der Brennstoff und während des Schmelzprozesses freigesetzte Gase einen deutlichen Einfluss auf die Abgaszusammensetzung. Aus der Schmelze bzw. dem Gemenge wird beim Einschmelzen CO₂ aus den karbonatischen Rohstoffen und Wasser auf Grund der Gemengefeuchte freigesetzt und mit dem Abgas ausgetragen. Bringt der Brennstoff Stickstoff in die Verbrennung mit ein, so nimmt der Stickstoffgehalt des Abgases zu. Für Erdgas H (Nordsee) liegt der Stickstoffgehalt des Abgases direkt nach der Verbrennung oft über 71 Vol.-%. Russisches Erdgas führt direkt nach der Verbrennung in einer Glasschmelzwanne zu einem N₂-Gehalt von ca. 70 Vol.-%. Betrachtet man das Abgas aus einer Oxy-Fuel-Verbrennung, so ist dies in erster Näherung zu zwei Dritteln aus H₂O und zu einem Drittel aus CO₂ zusammengesetzt mit geringem Restsauerstoff von 1 bis 3 Vol.-% und geringen Gehalten an Stickstoff.

Die eigentliche Berechnung der spezifischen Wärmekapazität des Abgases erfolgt in diesem Bericht entsprechend der VDI-Richtlinie 4670 (02-2003) „Thermodynamische Stoffwerte von feuchter Luft und Verbrennungsgasen“. Das von der HVG entwickelte Softwaretool wurde mithilfe der in der Richtlinie enthaltenen Kontrollzusammensetzungen verifiziert.

Spezifische Wärmekapazität von Glas

Die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität von Glas und Glasschmelzen erfolgt nach der von Prof. Conradt vorgeschlagenen Vorgehensweise [50, pp. 385-412], die zur Berechnung thermodynamischer Kenngrößen allgemein anerkannt ist. Die Berechnung von c_p auf dieser Basis wurden mit Messungen für das Standardglas 1 der DGG verglichen und hat gezeigt, dass die thermodynamische Berechnung mit der Messung gut übereinstimmt [51].

Ausgehend von der Glaschemie ermöglicht die Vorgehensweise die Bestimmung der mittleren Wärmekapazität für jedes gewünschte Temperaturintervall. Die Glaszusammensetzung und die Temperatur haben auch hier einen entscheidenden Einfluss auf die Kenngröße. Basierend auf einer mittleren bzw.

typischen Glaszusammensetzung für die unterschiedlichen Fallbeispiele kann so für die Berechnung der Wärme-flüsse der entsprechende Wert der Wärmekapazität berechnet werden. Vor allem beim Passieren der Transformationstemperatur T_G ändert sich die physikalische Eigenschaft bzw. Größe.

A.2 Methodik zur Bestimmung der Abwärmepotenziale

Für die Bestimmung der Abwärmepotenziale, die in Kapitel 4.3 beschrieben werden, wurden verschiedene Begrifflichkeiten verwendet die im Folgenden beschrieben werden sollen.

Theoretisches Potenzial

Angefangen beim *theoretischen Potenzial* je Branche, entspricht dieses der Summe aller Energieträger auf der Eingangsseite, die in die Prozesskette eingebracht und die in Wärme umgewandelt werden. Das theoretische Potenzial ist in allen Sankey-Diagrammen am rechten Rand unter „Summe Eingänge“ wiederzufinden. Im Falle von Hohlglas beträgt es 5.563 MJ/t. Um das theoretische Potenzial für eine gesamte Branche hoch zu skalieren, wird das Potenzial pro Tonne verkaufsfähiges Glas mit der Jahrestonnage multipliziert. Für Hohlglas wird also 5.563 MJ/t mit der Jahrestonnage von 4.058.000 Tonnen verkaufsfähigem Glas multipliziert, was einem absoluten theoretischen Potenzial von ca. 22,57 PJ entspricht.

Technisches Potenzial

Im *technischen Abwärmepotenzial* werden die heute direkt genutzte Abwärme sowie die gefasste und nutzbare Abwärme jeweils in MJ/t zusammengefasst. Es berechnet sich aus der Abwärmemenge, die die Schmelzwanne verlässt und in die Abgasreinigung geleitet wird, abzüglich der Abwärme, die über den Kamin abgeführt wird und abzüglich der Verluste am Filter. Auch das technische Potenzial wird anschließend mit der Jahrestonnage der jeweiligen Branche multipliziert, um auf das absolute Potenzial zu kommen. Das folgende Rechenbeispiel soll die Potenzialermittlung veranschaulichen.

Rechenbeispiel 1: Technisches Potenzial in der Hohlglasindustrie

Technisches Potenzial

= Abwärme zur Abgasreinigung – Abwärme über Kamin – Verluste Filter

$$\text{Technisches Potenzial} = 3196 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} - 441 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} - 48 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} = 2707 \text{ MJ/t}$$

$$\text{Absolutes technisches Potenzial} = 2707 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} * 4058000 \text{ t} \approx 22,57 \text{ PJ}$$

Technische Perspektive

Für die Bestimmung der *technischen Perspektive* sind mehrere Annahmen zu treffen. Über alle Branchen hinweg wird angenommen, dass das technische Potenzial in Zukunft vollständig gehoben werden kann. Auch wird angenommen, dass die im Kühlwasser gefassten Abwärmeströme vollständig nutzbar sein werden. Laut Erfahrungen der HVG belaufen sich diese auf ca. 12 % der gesamten Wannenverluste. Zusätzlich kann davon ausgegangen werden, dass etwa ein Drittel bis maximal die Hälfte der diffusen Wannenverluste in Zukunft genutzt werden können, wenn alle denkbaren Technologien eingesetzt werden würden. Für die Berechnung der technischen Perspektive wurde hier ein Drittel angenommen. In der Formgebung wird angenommen, dass die verbleibenden diffusen Abwärmeströme mithilfe neuer Kühlkreisläufe zur Hälfte genutzt werden können. Zuletzt wird die Annahme getroffen, dass die Verluste am Filter vollständig durch bessere Isolation und Effizienzsteigerung vermieden werden können. Auch die technische Perspektive wird mit den Jahrestonnagen der jeweiligen Branche

multipliziert. Die Ermittlung der technischen Perspektive soll ebenfalls mithilfe eines Rechenbeispiels für die Hohlglasindustrie veranschaulicht werden:

Rechenbeispiel 2: Technische Perspektive in der Hohlglasindustrie

Technische Perspektive

$$= \text{Technisches Potenzial} + \text{gefasste Wannenverluste (Kühlwasser)} + \frac{1}{3} \\ * \text{diffuse Wannenverluste} + \frac{1}{2} * \text{Abwärme Formgebung} + \text{Verluste Filter}$$

$$\text{Technische Perspektive} = 2702 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} + 241 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} + \frac{1}{3} * 1766 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} + \frac{1}{2} * 1015 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} + 48 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} \\ \approx 4092,17 \text{ MJ/t}$$

$$\text{Absolute technische Perspektive} = 4092,17 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} * 4058000 \text{ t} \approx 18,40 \text{ PJ}$$

Heutige Nutzung

Um die ermittelten Potenziale ins Verhältnis zu der heutigen Abwärmenutzung zu setzen, muss der Nutzungsgrad einer direkten Wärmerückgewinnung (mittels Regenerator) sowie einer indirekten Abwärmerückgewinnungstechnologie (z. B. mittels Abhitzekeessel) statistisch bestimmt werden. Dafür wird zunächst für jede Branche der Anteil der regenerativen Schmelzwannen an allen Schmelzwannen ermittelt. Dies ergibt den Nutzungsgrad einer direkten Wärmerückgewinnungstechnologie. In einem zweiten Schritt wird der Nutzungsgrad einer weiteren (indirekten) Abwärmerückgewinnungstechnologie bestimmt. Dies geschieht, indem die Anzahl der zusätzlichen Abwärmerückgewinnungstechnologien pro Branche durch Anzahl der Standorte dieser Branche geteilt wird. Die Anzahl der Standorte wird verwendet, da üblicherweise an einem Standort mit mehreren Schmelzwannen nur eine zusätzliche Abwärmerückgewinnungstechnologie installiert wird und nicht an jeder Wanne eine. Die Anzahl der verschiedenen Schmelzaggregate pro Branche, die Anzahl der Standorte sowie die Anzahl der verschiedenen indirekten Abwärmetechnologien pro Branche wurden von der HVG erhoben.

Nutzungsgrade pro Branche:

$$\text{Nutzungsgrad}_{\text{Direkte Abwärmenutzung}} = \frac{\text{Anzahl regenerativer Schmelzaggregate}}{\text{Anzahl aller Schmelzaggregate}}$$

$$\text{Nutzungsgrad}_{\text{Indirekte Abwärmenutzung}} = \frac{\text{Anzahl einer indirekten Abwärmerückgewinnungstechnologie}}{\text{Anzahl der Standorte}}$$

Für die einzelnen Branchen ergibt sich ein Nutzungsgrad einer direkten Abwärmenutzung von 66 % für Hohlglas, von 80 % für Flachglas und von 17 % für Spezialglas. Der Nutzungsgrad einer indirekten Abwärmenutzung beträgt hingegen in der Flachglasindustrie 90 %, 93 % in der Flachglasindustrie und 80 % in der Spezialglasindustrie.

Die Abwärmemengen, die heute bereits genutzt werden, setzen sich aus der Abwärmenutzung mittels einer regenerativen Schmelzwanne und der indirekten Abwärmenutzung über eine weitere Abwärmerückgewinnungstechnologie zusammen. Erstere ergibt sich aus der Abwärmemenge, die pro Tonne verkaufsfähiges Glas mittels Regenerator genutzt werden kann, multipliziert mit dem Nutzungsgrad einer direkten Wärmerückgewinnungstechnologie.

Für die indirekte Abwärmenutzung muss berücksichtigt werden, dass über alle Branchen hinweg, etwa zwei Drittel der Technologien zur Wärmerückgewinnung vor dem Filter und ein Drittel nach dem Filter eingesetzt werden. So berechnet sich die indirekt genutzte Abwärme über die Abwärmemenge, die pro Tonne verkaufsfähiges Glas vor und nach dem Filter genutzt werden kann, multipliziert mit dem jeweiligen Anteil des Einsatzortes. Die Summe aus der Abwärmemenge vor und nach dem Filter wird dann mit dem Nutzungsgrad einer indirekten Abwärmerückgewinnungstechnologie multipliziert. Die Summe aus der direkten und der indirekten Abwärmenutzung pro Tonne verkaufsfähiges Glas wird schließlich mit der Jahrestonnage der jeweiligen Branche hochskaliert. Zum besseren Verständnis werden die Berechnungsformel sowie ein Rechenbeispiel im Folgenden gegeben:

Heute bereits genutzte Abwärme pro Branche:

Mit heutigen Technologien genutzte Abwärme

$$\begin{aligned}
 &= \text{Abwärme Regenerator} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{t}} \right] * \text{Nutzungsgrad}_{\text{Direkte Abwärmenutzung}} [\%] \\
 &+ \left(\text{Abwärme vor Filter} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{t}} \right] * \text{Anteil der Technologien vor Filter} [\%] \right. \\
 &+ \left. \text{Abwärme nach Filter} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{t}} \right] * \text{Anteil der Technologien nach Filter} [\%] \right) \\
 &* \text{Nutzungsgrad}_{\text{Indirekte Abwärmenutzung}} [\%] * \text{Jahrestonnage} [\text{t}]
 \end{aligned}$$

Am Beispiel der Hohlglasbranche:

Mit heutigen Technologien genutzte Abwärme

$$\begin{aligned}
 &= \left(2085 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} * 66 \% + \left(126 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} * 67 \% + 412 \frac{\text{MJ}}{\text{t}} * 33 \% \right) * 90 \% \right) * 4058000 \text{ t} \\
 &\approx 6,37 \text{ PJ}
 \end{aligned}$$