



Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Masterarbeit



Energetische Betrachtung einer Glashütte
zur Behälterglasherstellung

Gregor Josef Gunnar Berger, BSc

Mai 2019

Masterarbeit

Energetische Betrachtung einer Glashütte zur Behälterglasherstellung

erstellt am

Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Vorgelegt von:

Gregor Berger, BSc
1035183

Betreuer:

Dipl.-Ing. Daniel Egger
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch

Leoben, 18.05.2019



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 18.05.2019

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'g.berger', written over a horizontal line.

Unterschrift Verfasser/in
Gregor Josef Gunnar, Berger
Matrikelnummer: 01035183

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Es wird ausdrücklich festgehalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

Danksagung

Ich möchte mich bei meinen Betreuern Dipl.-Ing. Daniel Egger und Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch bedanken, die mich beim Verfassen der Arbeit unterstützt haben und mich auf der richtigen Spur gehalten haben. Des Weiteren möchte ich mich auch bei Dipl.-Ing. Dr.mont. Christoph Spijker für seine Expertisen im Bereich der Messtechnik bedanken.

Ebenso gilt mein Dank meinen Ansprechpartnern bei Stölzle Oberglas Dipl.-Ing.(FH) Birgit Schalk, Dipl.-Ing.(FH) Thomas Mayrold und Volker Skrbinek, die mir erst durch ihre Informationen das Verfassen dieser Arbeit ermöglicht haben.

Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin, die mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat und meiner Familie, die mich während meines Studiums unterstützt hat.

Kurzfassung:

Aufgrund der hohen Temperaturen im Herstellprozess von Glas ist dieser sehr energieintensiv. In dieser Arbeit wurde die Glashütte Stölzle Oberglas in Köflach mit einem ganzheitlichen und systematischen Ansatz energetisch betrachtet. Dafür wurde der Produktionsprozess genau beschrieben und auf dieser Basis Energieströme identifiziert und in einem Prozessbild dargestellt. Wegen der unzureichenden Datenlage war es nicht möglich eine Energiebilanz für den Herstellprozess von Glas zu berechnen und so wurde ein Leitfaden zum Erfassen der fehlenden Daten und zur Bilanzierung der einzelnen Aggregate im Herstellprozess entworfen. Auf Basis der vorhandenen Daten wurden ungenutzte Abwärmepotentiale von Abgasen, die während des Herstellprozesses anfallen, bewertet. Außerdem wurden Maßnahmenvorschläge zur Steigerung der Energieeffizienz in der Glashütte Stölzle Oberglas erarbeitet.

Abstract:

The production process of glass consumes a high amount of energy, due to the high temperatures in the process. In this work the glassworks Stölzle Oberglas in Köflach was considered energetically with a holistic and systematic approach. The production process was described detailed and based on this, the energy flows were visualized in a process picture. Due to insufficient data, it was not possible to calculate an energy balance for the manufacturing process of glass and so a guideline for recording the missing data and for balancing the individual aggregates in the manufacturing process was designed. Based on available data, unused waste heat potentials of exhaust gases were evaluated, which accrue during the manufacturing process. In addition, recommendations for measures to increase the energy efficiency in the glassworks Stölzle Oberglas were developed.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Allgemeine Formelzeichen	V
Akronyme.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
1 Einleitung	13
1.1 Glasherstellung in Österreich.....	14
1.2 Stölzle-Oberglas GmbH.....	19
2 Der Werkstoff Glas	21
2.1 Chemischer Aufbau, Struktur und Eigenschaften.....	21
3 Stand der Technik bei Stölzle Oberglas.....	23
3.1 Produktionsprozess	23
3.1.1 Gemengehaus	27
3.1.2 Glaswannen.....	30
3.1.2.1 Abgaszug.....	37
3.1.3 Arbeitswannen und Feeder	38
3.1.4 IS-Maschinen.....	40
3.1.5 Transport	45
3.1.6 Kühlöfen.....	46
3.1.7 Kaltes Ende	49
3.1.8 Querschnittsprozesse	50

3.2	Energieströme	51
3.2.1	Gemengehaus	52
3.2.2	Glaswannen	52
3.2.2.1	Abgaszug	53
3.2.3	Arbeitswannen	54
3.2.4	Feeder	54
3.2.5	IS-Maschinen	54
3.2.6	Transport	55
3.2.7	Kühlöfen	56
3.3	Energieverbrauch des heißen Endes	56
3.3.1	Elektrischer Energieverbrauch	56
3.3.2	Erdgasverbrauch	57
3.3.3	Gesamtverbrauch	59
3.3.4	Glaswannen	60
4	Energiebetrachtung des heißen Endes	63
4.1	Berechnungsgrundlage	63
4.1.1	Bilanzierung von Energieströmen	63
4.1.2	Berechnung der spezifischen Wärmekapazität von Abgasen	65
4.1.3	Abschätzung des Messfehlers bei Temperaturmessungen	69
4.1.4	Berechnung des Wärmestroms bei Wärmeübertragern	70
4.1.4.1	Berechnung des inneren Wärmeübergangskoeffizienten	71
4.2	Leitfaden zur Erstellung der Energiebilanz	72
4.2.1	Fehlende Daten zur Bilanzierung	72
4.2.2	Möglichkeiten zur Erhebung der fehlenden Daten	75
4.2.2.1	Temperatur	75
4.2.2.2	Massenstrom	77
4.2.2.3	Elektrischer Energieverbrauch	79
4.2.3	Prioritätenliste	80
4.3	Messkampagne	81
4.4	Energieeffizienz bei Stölzle Oberglas	85
4.4.1	Arbeitswannen und Feeder	86
4.4.1.1	Bilanzierung von Arbeitswanne 2	86
4.4.1.2	Bilanzierung von Feeder 21	88
4.4.1.3	Energieinhalt im Abgas von Arbeitswannen und Feeder	90
4.4.2	Rohgaswärmeübertrager	92

4.4.2.1	Wärmeinhalt Rohgas	92
4.4.2.2	Umsetzungskonzept Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager.....	93
4.4.3	Maßnahmenvorschläge zur Steigerung der Energieeffizienz am Standort Köflach..	97
4.4.3.1	Abgas.....	97
4.4.3.2	Kühlöfen.....	98
4.4.3.3	Formenkühlung und Vertiflow.....	98
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	99
	Literaturverzeichnis	101

Allgemeine Formelzeichen

A	Fläche [m ²]
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [J/kg K]
$c_{p,m}$	mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [J/kg K]
D, d	Durchmesser [m]
F	Sichtfaktor [-]
H_u	unterer Heizwert [J/kg]
i	Laufende Nummer für Teilflächen beim Schwerlinienverfahren [-]
k	Wärmedurchgangskoeffizient eines Rohres [W/m K]
L	Luftmenge [m ³ oder kg]
l	Länge [m]
\dot{m}	Massenstrom [kg/s]
m	Masse [kg]
MM	Molekularmasse [kg/mol]
n	Anzahl der Teilflächen beim Schwerlinienverfahren [-]
Nu_m	mittlere Nusselt-Zahl [-]
P	elektrische Leistung [W]
p	Druck [Pa oder bar]

Pr	Prandtl-Zahl [-]
\dot{Q}	Wärmestrom [W]
\dot{q}	Wärmestromdichte [W/m ²]
R, r	Radius [m]
R	universelle Gaskonstante [J/mol K]
R_i	spezifische Gaskonstante [J/kg K]
Re	Reynolds-Zahl [-]
T, ϑ	Temperatur [°C oder K]
t	Zeit [s]
\dot{V}	Volumenstrom [m ³ /s]
V	Volumen [m ³]
v, w	Geschwindigkeit [m/s]
W_{el}	elektrische Energie [J]
X	Anteil [-]
y_i	Schwerelinienabstand [m]
α	Wärmeübergang [W/m ² K]
$\Delta\vartheta_m$	Logarithmische Temperaturdifferenz [K]
ΔT_H	Temperaturdifferenz beim Eintritt in einen Gegenstromwärmeübertrager [K]
ΔT_K	Temperaturdifferenz beim Austritt aus einen Gegenstromwärmeübertrager [K]
ε	Emissionskoeffizient [-]
λ	Luftüberschuss [-]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/m K]
ρ	Dichte [kg/m ³]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante [W/m ² K ⁴]
ν	kinematische Viskosität [m ² /s]

Akronyme

EZH	elektrische Zusatzheizung
HVG	Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e. V.
Jhd.	Jahrhundert
KÖ	Kühlöfen
Mrd.	Milliarden
TPT	Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Produktion der Glasindustrie in Tonnen und Veränderung im Vorjahr in % [1]	16
Abbildung 1-2: Sammlung und Recycling von Glasverpackungen in Österreich in 1.000 Tonnen [1].....	18
Abbildung 1-3: Stölzle-Oberglas GmbH Köflach [7]	20
Abbildung 3-1: Schema Behälterglasherstellung [9]	24
Abbildung 3-2: Prozessbild des heißen Endes mit Stoffströmen von Stölzle Oberglas	25
Abbildung 3-3: Plan heißes Ende - Weißglas	26
Abbildung 3-4: Plan heißes Ende - Braunglas	27
Abbildung 3-5: Mischer S-1500 von Fejmert [11].....	29
Abbildung 3-6: Kratzförderer [12].....	30
Abbildung 3-7: Glasschmelze in einem Wannenofen (vereinfacht) [8].....	32
Abbildung 3-8: Regenerative Querbrennerwanne [2].....	32
Abbildung 3-9: Mögliche Brennerdüsenanordnung [2]	33
Abbildung 3-10: Regenerative U-Flammenwanne [13].....	34
Abbildung 3-11: Draufsicht Wanne 4	35
Abbildung 3-12: Seitenansicht Glaswanne 4	36
Abbildung 3-13: Wannen Kühlung Wanne 4.....	37

Abbildung 3-14: Abgaszug bei Stölzle Oberglas	37
Abbildung 3-15: Charakteristischer Viskositäts-Temperaturverlauf [14]	38
Abbildung 3-16: Arbeitswanne zwischen Feeder 22 und Feeder 23	39
Abbildung 3-17: Feeder 41	40
Abbildung 3-18: Schneidwerk für Glastropfen.....	41
Abbildung 3-19: IS-Maschine von Stölzle Oberglas GmbH.....	41
Abbildung 3-20: Behälterglasherstellung im Blas-Blas-Verfahren [15]	42
Abbildung 3-21: Formen mit (links) und ohne Vertiflow (rechts).....	44
Abbildung 3-22: Einzelaggregate Transport Linie 21	45
Abbildung 3-23: Theoretisch abgeschätzte und praktisch einstellbare Kühlkurven für die Kühlung von Kalk- und Bleiglas [14].....	47
Abbildung 3-24: Seitenansicht Kühlofen Linie 20.....	47
Abbildung 3-25: Legende Ströme	51
Abbildung 3-26: Ströme Gemengehaus.....	52
Abbildung 3-27: Ströme Glaswanne 2	53
Abbildung 3-28: Ströme Arbeitswanne 2	54
Abbildung 3-29: Ströme Feeder 21.....	54
Abbildung 3-30: Ströme IS-Maschine 21 und 23.....	55
Abbildung 3-31: Ströme Transport 21	55
Abbildung 3-32: Ströme Kühlofen 21	56
Abbildung 3-33: Durchschnittlicher elektrischer Energieverbrauch [kWh/Monat]	57
Abbildung 3-34: Durchschnittlicher Erdgasverbrauch [Nm ³ /Monat].....	58
Abbildung 3-35: Durchschnittlicher Gesamtenergieverbrauch [MWh/Monat]	60
Abbildung 3-36: Energieverbrauch Glaswanne 2.....	61
Abbildung 3-37: Energieverbrauch Glaswanne 4.....	62
Abbildung 4-1: Typischer Verlauf der spezifischen Wärmekapazität idealer Gase [16].....	65
Abbildung 4-2: Energiebilanz Thermoelement im Abgas	69
Abbildung 4-3: Temperaturmessung eines Mediums an der Rohraußenseite.....	76

Abbildung 4-4: Emissionsreferenzierung von Glasbehältern.....	77
Abbildung 4-5: Anordnung der Messpunkte nach dem Schwerlinienverfahren für n=5 Teilflächen [19].....	78
Abbildung 4-6: Temperaturerfassung Abgas von Arbeitswannen und Feeder	82
Abbildung 4-7: Messpunkte für Abgastemperaturerfassung bei Arbeitswannen und Feeder Weißglas	82
Abbildung 4-8: Messpunkte für Abgastemperaturerfassung bei Arbeitswannen und Feeder Braunglas	83
Abbildung 4-9: Ursache für Messfehler bei der Abgastemperaturerfassung bei Weißglas	84
Abbildung 4-10: Absaugpyrometer	85
Abbildung 4-11: Ursache für Messfehler bei der Abgastemperaturerfassung bei Braunglas .	85
Abbildung 4-12: Spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur für drei Gläser [20].....	87
Abbildung 4-13: Leistungsbilanz Arbeitswanne 2 in % der Brennstoffwärmeleistung.....	88
Abbildung 4-14: Leistungsbilanz Arbeitswanne 2 in % der Wärme im austretenden Produktstrom.....	88
Abbildung 4-15: Leistungsbilanz Feeder 21 in % der Brennstoffwärmeleistung	89
Abbildung 4-16: Leistungsbilanz Feeder 21 in % der Wärme im austretenden Produktstrom	90
Abbildung 4-17: Abgaszug mit Rohgaswäremübertrager.....	92
Abbildung 4-18: Schema Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-I: Unternehmen im Fachverband Glasindustrie [3]	15
Tabelle 1-II: Industrieproduktion nach Branchen [4].....	15
Tabelle 1-III: Energetischer Endverbrauch des Sektors Industrie nach Branchen in PJ [5] ...	17
Tabelle 2-I: Chemische Zusammensetzung wichtiger Gläser als Massengehalt in % [2]	22
Tabelle 3-I: Phasen bei der Bildung der Glasschmelze [8].....	30
Tabelle 3-II: IS-Maschinen bei Stölzle Oberglas	42
Tabelle 3-III: Formenkühlung bei Stölzle Oberglas	43
Tabelle 3-IV: Vertiflow bei Stölzle Oberglas.....	44
Tabelle 3-V: Kühlöfen bei Stölzle Oberglas	48
Tabelle 3-VI: Betriebsparameter der Zonen der Kühlöfen bei Stölzle Oberglas	48
Tabelle 3-VII: Übersicht Druckluftkompressoren.....	50
Tabelle 3-VIII: Übersicht Kältetrockner	50
Tabelle 3-IX: Übersicht Vakuumpumpen	51
Tabelle 3-X: Erdgasverbrauch Kühlöfen	59
Tabelle 4-I: Daten zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität idealer Gase [16]	66
Tabelle 4-II: Luftbestandteile [16]	67
Tabelle 4-III: Fehlende Daten Glaswanne 2.....	73
Tabelle 4-IV: Fehlende Daten IS-Maschine 21	74

Tabelle 4-V: Fehlende Daten Transport 21.....	74
Tabelle 4-VI: Fehlende Daten Kühlöfen 21.....	75
Tabelle 4-VII: Prioritätenliste	80
Tabelle 4-VIII: Gemessene Abgastemperaturen bei Arbeitswanne und Feeder.....	83
Tabelle 4-IX: Daten zur Bilanzierung von Arbeitswanne 2.....	86
Tabelle 4-X: Leistungsbilanz Arbeitswanne 2.....	87
Tabelle 4-XI: Daten zur Bilanzierung von Feeder 21.....	89
Tabelle 4-XII: Leistungsbilanz Feeder 21.....	89
Tabelle 4-XIII: Abschätzung des Erdgasverbrauchs der Feeder.....	90
Tabelle 4-XIV: Daten zur Berechnung des Abwärmepotentials von Arbeitswannen und Feeder	91
Tabelle 4-XV: Abwärmepotential des Abgases von Arbeitswannen und Feeder.....	91
Tabelle 4-XVI: Abwärmepotential des Abgases der Glaswannen.....	93
Tabelle 4-XVII: Teilstrecken Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager.....	94
Tabelle 4-XVIII: Wärmestrom je Teilstrecke.....	94
Tabelle 4-XIX: Stoffwerte Luft für Berechnung des inneren Wärmeübergangs [16].....	95
Tabelle 4-XX: Innerer Wärmeübergang.....	95
Tabelle 4-XXI: Wärmedurchgangskoeffizient Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager.....	96
Tabelle 4-XXII: Übertragener Wärmestrom im Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager.....	96

1 Einleitung

Der Werkstoff Glas ist mehrere tausend Jahre alt und hat sich bewährt. Glas ist sehr stabil, widerstandsfähig und lässt sich in fast jede beliebige Form bringen. Es eignet sich ideal als Verpackungsmaterial für Lebensmittel, da es gasdicht und geschmacksneutral ist. Des Weiteren ist es inert und geht keine Wechselwirkung mit anderen Stoffen und Materialien ein. Auch die Lichtdurchlässigkeit ist eine sehr wichtige Eigenschaft des Werkstoffes Glas. Durch Isolierfenster, die aus zwei Glasscheiben zwischen denen sich ein Gas befindet bestehen, kann ein Wohnraum hell gestaltet werden, bei gleichzeitiger ausreichender Wärmedämmung. Die Rohstoffe aus denen sich Glas zusammensetzt, Sand, Soda und Kalk, kommen in großen Mengen in der Natur vor. Die Eigenschaften des fertigen Glasprodukts können durch verschiedene Mischungsverhältnisse dieser Rohstoffe und durch Zumischen verschiedener Zuschlagstoffe eingestellt werden. [1]

Die gefertigten Glasprodukte können in folgende Kategorien unterteilt werden: [2]

- Behälterglas
- Flachglas (Floatglas)
- Wirtschaftsglas (Gebrauchsglas) – Trinkgläser, Tischzubehör, Dekoartikel, usw.
- Chemisch-technisches Glas
- Optisches Glas
- Glasfasern

Das Glas für diese Produkte wird hergestellt indem die jeweiligen Rohstoffe in einem Schmelzofen erhitzt werden, bis sie sich ab einer Temperatur von ca. 1.600 °C zu einer zähen Glasschmelze verbinden. Anschließend kann die Glasschmelze in Form gezogen, gepresst oder geblasen werden und erstarren. Aufgrund der hohen Temperaturen im Herstellprozess

von Glas, ist dieser sehr energieintensiv. Die hohen Glasverarbeitungstemperaturen führen auch zu hohen Wärmeverlusten im Produktionsprozess. [1]

Stölzle-Oberglas GmbH produziert seit dem 19. Jhd. Verpackungsglas in Köflach und hat sich auf die Produktion von Kleinglasverpackungen spezialisiert. In dieser Arbeit soll das heiße Ende des Produktionsbereichs energetisch betrachtet werden, mit dem Ziel die Energieflüsse im Produktionsprozess zu bilanzieren. Außerdem sollen auch Möglichkeiten vorgestellt werden, den bestehenden Abgaszug in Hinblick auf Energieeffizienz zu verbessern. Ebenso soll in dieser Arbeit der Produktionsprozess der Behälterglasherstellung dargestellt werden, mit dem Hintergrund neuen Mitarbeitern bei Stölzle Oberglas den Einstieg zu erleichtern.

1.1 Glasherstellung in Österreich

Die Glasherstellung fällt in Österreich in die Sektion Industrie der Wirtschaftskammer Österreich und dort in den Fachverband Glasindustrie (204). Dem Fachverband gehören ca. 50 Unternehmen an, welche in der industriellen Glaserzeugung bzw. Glasveredelung tätig sind. Es werden drei Produktionsbereiche unterschieden:

- Glashütten:
 - Diese schmelzen Glasrohstoffe ein und erzeugen daraus eine breite Palette verschiedenster Glasprodukte. Die Vielfalt reicht dabei von Kristallschmuck, mundgeblasenen Kristallkaraffen und hochwertigen Trinkgläsern über Verpackungsglas, Spezialgläser für die Automobilindustrie bis hin zur Glasdämmwolle. (ca. 5.800 Beschäftigte)
- Glasbe- und glasverarbeitende Unternehmen:
 - Diese Betriebe kaufen im Ausland gefertigtes Floatglas zu und veredeln es zu Isolierglas, Verbundsicherheitsglas, Einscheibensicherheitsglas und Solargläsern. (ca. 1.200 Beschäftigte)
- Gablonzer:
 - Dazu zählen vor allem Bijouteriehersteller und Unternehmen, welche Modeschmuck erzeugen. (ca. 200 Beschäftigte) [1]

Die zuvor genannten 50 Mitglieder im Fachverband Glasindustrie kommen durch Mehrfachzählungen zustande, da manche Unternehmen mehrere Tätigkeitsfelder haben oder in mehreren Bundesländern tätig sind. Eliminiert man diese Mehrfachzählung verbleiben 30 Unternehmen im Fachverband Glasindustrie. In diesen Unternehmen wurden im Jahr 2017 insgesamt 7.243 Angestellte und Arbeiter beschäftigt. [3]

Der Großteil der Unternehmen sind kleine und mittlere Betriebe mit weniger als 250 unselbstständigen Beschäftigten. Wie aus **Tabelle 1-I** zu entnehmen ist, haben lediglich vier Unternehmen in Österreich mehr als 250 Beschäftigte und gelten damit als große Unternehmen. Die folgenden drei großen Unternehmen sind im Bereich der Glashütte tätig:

- D. Swarovski KG
- Stölzle Oberglas GmbH
- Vetropack Austria GmbH

Tabelle 1-I: Unternehmen im Fachverband Glasindustrie [3]

Unternehmen 2017 nach Unternehmensgrößenklassen *		
Unternehmensgrößenklasse *	Anzahl	Anteil in %
0 - 9	10	33,3
10 - 49	5	16,7
50 - 249	11	36,7
250 und mehr Beschäftigte	4	13,3
SUMME	30	100,0

Tabelle 1-II: Industrieproduktion nach Branchen [4]

Fachverband ²	Abgesetzte Produktion, Mrd. EUR					
	2000	2005	2010	2015	2016	2017
Maschinen-, Metallwaren- und Gießereiindustrie	17,56	23,79	30,66	35,97	35,43	37,11
Elektro- und Elektronikindustrie	12,23	11,79	13,41	14,48	16,18	17,44
Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen	2,31	4,05	6,41	13,62	12,20	16,91
Chemische Industrie	10,26	11,38	13,03	14,46	14,41	14,86
Fahrzeugindustrie	6,83	11,72	10,55	13,52	13,71	14,65
Nahrungs- u. Genussmittelindustrie (Lebensmittelindustrie)	6,61	7,40	8,68	9,84	9,91	9,85
Mineralölindustrie	6,22	6,86	8,98	8,10	7,23	8,31
Bergwerke und Stahl	3,65	6,16	6,63	7,20	6,70	8,07
Holzindustrie	5,37	6,23	7,06	7,45	7,70	7,87
Bauindustrie	4,01	4,63	5,03	5,64	5,81	6,45
NE-Metallindustrie	1,98	2,03	3,74	4,00	3,88	4,52
Papierindustrie	3,62	3,30	3,55	3,53	3,50	3,51
Stein- und keramische Industrie	2,80	3,18	3,18	3,19	3,19	3,34
Textil-, Bekleidungs-, Schuh- und Lederindustrie	3,78	3,77	2,94	3,09	2,99	2,97
Produkte aus Papier & Karton	1,61	1,82	2,17	2,44	2,44	2,50
Glasindustrie	1,07	1,34	1,29	1,21	1,18	1,17
INDUSTRIE INSGESAMT ³	89,88	109,43	127,32	147,74	146,47	159,54

Laut Wirtschaftskammer Österreich wurden vom Fachverband Glasindustrie im Jahr 2017 Produkte im Wert von 1,17 Mrd. € umgesetzt, wie aus **Tabelle 1-II** zu entnehmen ist. Damit ist dieser Fachverband am letzten Platz in der abgesetzten Produktion im Sektor Industrie. Das bedeutet, dass dieser Fachverband den geringsten Umsatz mit ihren verkauften Produkten erzielt hat.

Man erkennt, dass die abgesetzte Produktion im Fachbereich Glasindustrie in den letzten Jahren rückläufig ist. Um das genauer zu untersuchen, zeigt **Abbildung 1-1** die gesamten produzierten Mengen und die produzierten Mengen in ausgewählten Tätigkeitsbereichen im Fachverband Glasindustrie über die letzten Jahre. Verpackungsglas macht mit ca. 420.000 t im Jahr 2017 mit Abstand den größten Anteil an der Produktion von Glas aus. Es ist auch erkennbar, dass die Produktionsmengen hier nicht so stark gesunken sind, wie in den anderen Tätigkeitsbereichen. Der Umstand, dass sich seit dem Jahr 2017 der Ruf von Verpackungen aus Kunststoffen verschlechtert hat, könnte wieder für einen aufsteigenden Trend in der Verpackungsglasindustrie sorgen.

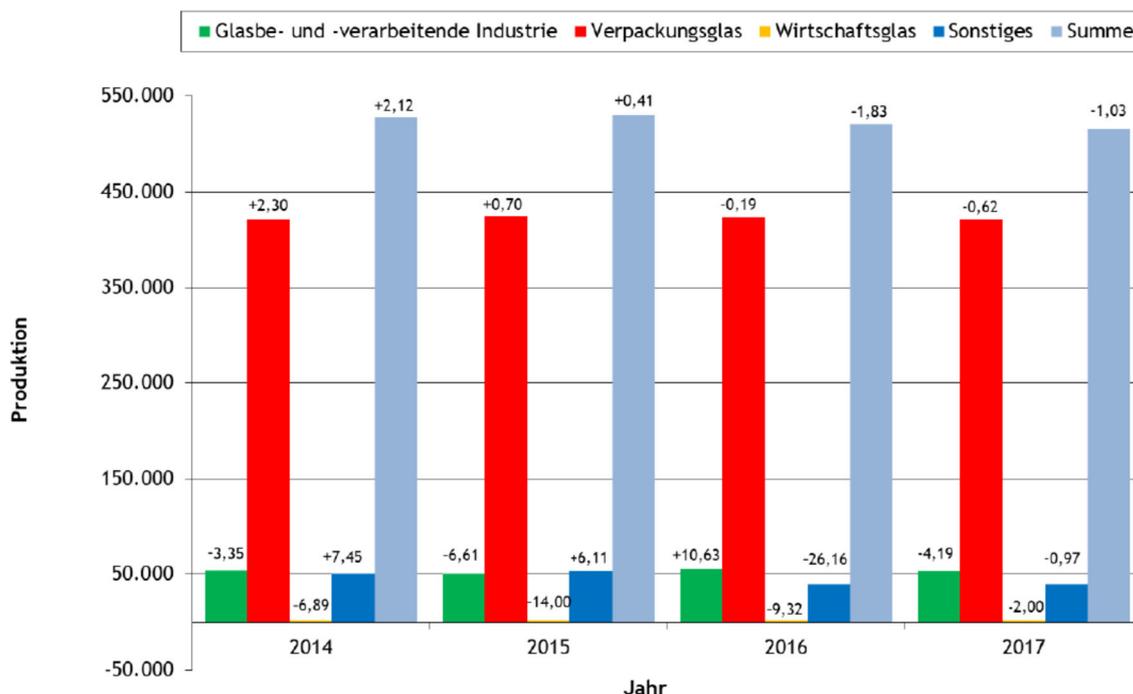


Abbildung 1-1: Produktion der Glasindustrie in Tonnen und Veränderung im Vorjahr in % [1]

Wie viele Branchen im Sektor Industrie, ist die Branche Glasindustrie sehr energieintensiv. Wie in **Tabelle 1-III** dargestellt, betrug der Verbrauch dieser Branche und der Branche Steine und Erden 37 PJ im Jahr 2017. Das entspricht 10,9 % des Gesamtverbrauchs des Sektors Industrie.

Tabelle 1-III: Energetischer Endverbrauch des Sektors Industrie nach Branchen in PJ [5]

Fachverband	Endenergieverbrauch						
	2000	2005	2010	2015	2016	2017	
	[PJ]	[PJ]	[PJ]	[PJ]	[PJ]	[PJ]	Anteil
Papier und Druck	61	69	71	68	72	76	22,5%
Chemie und Petrochemie	34	37	42	43	44	45	13,3%
Eisen- und Stahlerzeugung	34	32	34	37	35	37	10,9%
Steine und Erden, Glas	32	38	36	36	37	37	10,9%
Maschinenbau	16	21	27	26	29	30	8,9%
Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	19	22	25	27	29	29	8,6%
Holzverarbeitung	13	25	25	28	27	27	8,0%
Bau	12	22	21	20	17	18	5,3%
Sonst. Produzierender Bereich	7	10	11	11	11	12	3,5%
Nicht Eisen Metalle	6	7	7	9	9	9	2,7%
Bergbau	5	5	7	7	8	8	2,4%
Fahrzeugbau	5	7	5	5	6	7	2,1%
Textil und Leder	6	5	4	3	4	3	0,9%

Vergleicht man den Energieverbrauch mit der in **Tabelle 1-II** dargestellten abgesetzten Produktion, wird der enorme Energieaufwand für das abgesetzte Produkt in diesen beiden Branchen sichtbar. Dies und der Umstand, dass die abgesetzte Produktion in den letzten Jahren rückläufig war, verdeutlicht die Wichtigkeit von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz.

Die Glasindustrie ist auch sehr rohstoffintensiv. Der größte Rohstoffeinsatz trat 2013 bei der Herstellung von Glas, Glaswaren, Keramik u. ä. mit 20,4 Mio. t auf, gefolgt von der Bauindustrie mit 19,7 Mio. t. [6]

Dem hohen Energie- und Rohstoffeinsatz zur Herstellung von Glas steht die 100%-ige Recyclierbarkeit des Werkstoffes Glas gegenüber. Altglas kann ohne Qualitätsverlust eingeschmolzen und wiederverwendet werden. Da die Energie, die zum Aufschmelzen der Altglasscherben benötigt wird, geringer ist als die Energie für das Aufschmelzen der Rohstoffe, kann durch das Recyceln von Altglas der Energieverbrauch gesenkt werden. Die Einsparung von Energie wiederum reduziert CO₂-Emissionen bei der Verpackungsglasproduktion: *Je Einsatz von 10 % Altglas können 3 % Energie und 7 % CO₂-Emissionen bei der Neuproduktion eingespart werden.* [1]

Im Jahr 2017 wurden in Österreich 239.770 t Altglas gesammelt und verwertet. Das entspricht einem Anstieg gegenüber dem Vorjahr um 4.100 t. **Abbildung 1-2** zeigt die

recyclten Glasmengen vom Jahr 1982 bis zum Jahr 2017. Die Recyclingquote in Österreich liegt bei über 80 % und damit deutlich über dem EU-Durchschnitt mit 70 %. [1]

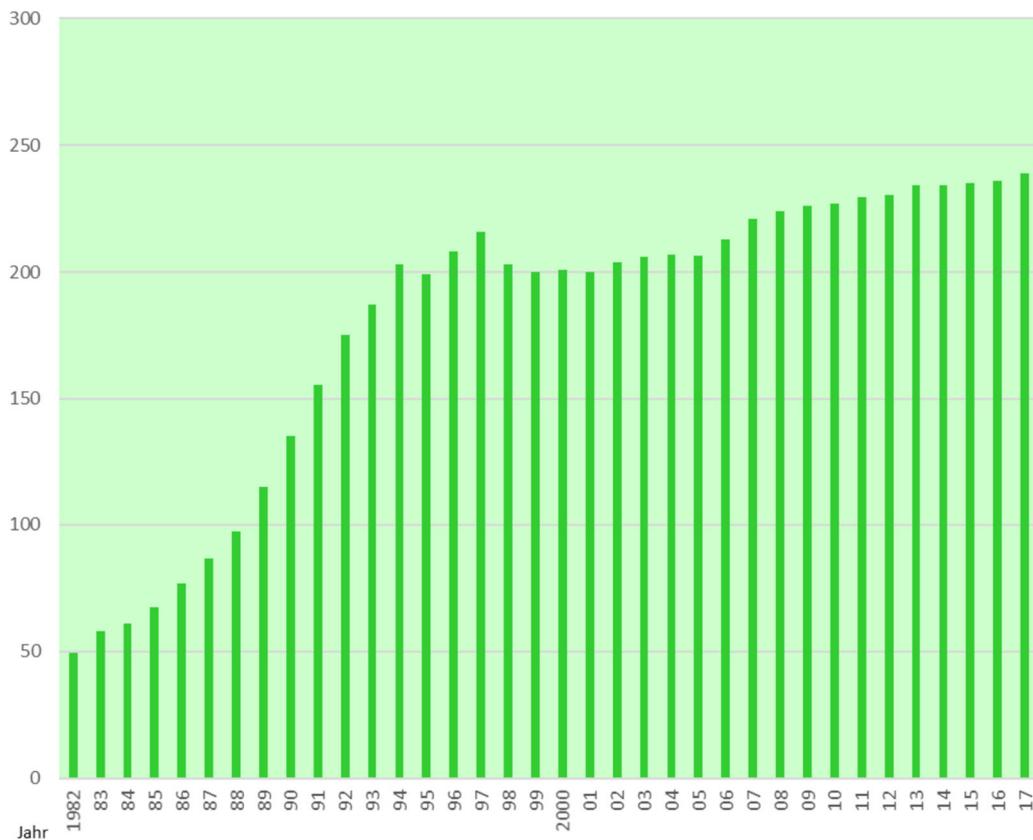


Abbildung 1-2: Sammlung und Recycling von Glasverpackungen in Österreich in 1.000 Tonnen [1]

Durch das Glasrecycling können jährlich Rohstoffe und Energie im Ausmaß von rund

- 168.000 t Quarzsand
- 54.000 Tonnen Kalk und Dolomit
- 42.000 Tonnen Soda
- 588.000 m³ Abbauvolumen
- 230.000.000 kWh elektr. Energie
- 6.000.000 m³ Erdgas

eingespart werden. [1]

1.2 Stölzle-Oberglas GmbH

Stölzle-Oberglas GmbH wurde im Jahr 1871, nach Umbau einer alten Tafelglashütte, in Köflach gegründet und startete die Produktion von Verpackungsglas. Das Werk in Köflach war Teil der Stölzle Manufakturen die mehrere Glasfabriken in Österreich, Böhmen und Ungarn umfasste.

1978 fusionierte die damalige Stölzle Glasindustrie AG und die Oberglas Glashütten AG zur Stölzle-Oberglas AG. 1987 wurde die Stölzle-Oberglas AG von Dr. Cornelius Grupp (CAG-Holding) übernommen.

Ab den 90er-Jahren wurden weitere alte, traditionsreiche Glashütten gekauft und in die Stölzle Glasgruppe eingegliedert. Die Stölzle Glasgruppe umfasst mittlerweile 6 Werke:

- Stölzle-Oberglas GmbH – Österreich
- Stölzle-Union s.r.o – Tschechien
- Stölzle Flacconnage Ltd. – England
- Stölzle Czeszochowa Sp. z o.o. – Polen
- Stölzle Masnières Parfumerie SAS – Frankreich
- Stölzle Wymiarki Sp. z o.o. – Polen

Heute werden im Stammwerk und Headquarter der Stölzle Glasgruppe in Köflach Kleinglasverpackungen für Pharmaindustrie, Lebensmittelindustrie, Kosmetikindustrie sowie Miniaturen für die Getränkeindustrie produziert. Im Werk sind über 400 Mitarbeiter beschäftigt. In zwei Glaswannen werden Rohstoffe zu Glas geschmolzen, wobei eine davon Weißglas und die andere Grün- oder Braunglas produziert. An zehn Linien werden im Jahr rund 1,5 Mrd. Stück Verpackungsglas hergestellt. Das entspricht einer durchschnittlichen Tageskapazität von ca. 250 t Glas. [7]

Das Werksgelände im Ort Köflach ist in **Abbildung 1-3** abgebildet. Mit Pos. 1 ist das Gemengehaus gekennzeichnet, in dem die Rohstoffe gelagert und gemischt werden. Von dort wird das Gemenge zum heißen Ende (Pos. 2) transportiert, zu Glas geschmolzen und in Form gebracht. Im kalten Ende (Pos. 3) werden die fertigen Glasbehälter auf Beschädigungen überprüft, veredelt und verpackt.



Abbildung 1-3: Stölzle-Oberglas GmbH Köflach [7]

2 Der Werkstoff Glas

In diesem Kapitel wird allgemein besprochen, was den Werkstoff Glas ausmacht.

Glas im engeren Sinn ist definiert als anorganisches, meist oxidisches Schmelzprodukt, das durch einen Einfriervorgang ohne Auskristallisation der Schmelzphasenkomponenten in den festen Zustand überführt wird. [8]

2.1 Chemischer Aufbau, Struktur und Eigenschaften

Glas setzt sich aus einer größeren Anzahl von Oxiden zusammen. Es ist keine definierte chemische Verbindung, sondern es werden je nach Anwendungsfall verschiedene Oxide zusammengemischt. Die Hauptbestandteile sind Siliziumdioxid (SiO_2), Calciumoxid (CaO) und Natriumoxid (Na_2O). Die zur Glasherstellung verwendeten Oxide lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- Anionenoxide – Netzworkebildner: z.B.: SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3
- Alkalioxide – Flussmittel: z.B.: Na_2O , K_2O , Li_2O
- Erdalkalioxide – Stabilisatoren: z.B.: CaO , MgO , BaO , Al_2O_3

Anionenoxide, auch Netzworkebildner genannt, erstarren glasig aus einer Schmelze und bringen auch die anderen Oxide zum glasigen Erstarren. Alkalioxide setzen den Schmelzpunkt herab und vereinfachen somit die Herstellung und Verarbeitung. Sie werden deshalb auch Flussmittel genannt. Ein Glas das nur aus Anionenoxiden und Alkalioxiden besteht wäre wasserlöslich und somit unbrauchbar. Erst durch Hinzufügen von Erdalkalioxiden, auch Stabilisatoren genannt, wird das Glas wasserunlöslich. Oxide gleicher Funktion können

weitgehend untereinander ausgetauscht werden. So können verschieden physikalische und chemische Eigenschaften eingestellt werden. Eine besondere Stellung unter den Oxiden hat Tonerde (Al_2O_3), da es sowohl als Netzwerkbildner als auch als Stabilisator wirkt. Es ist deshalb in vielen technischen Gläsern enthalten. [8]

In **Tabelle 2-I** sind typische chemische Zusammensetzungen für Gläser angeführt.

Tabelle 2-I: Chemische Zusammensetzung wichtiger Gläser als Massengehalt in % [2]

Stoff	Flachglas (Floatglas)	Behälterglas	Wirtschaftsglas (Böhmisches Kristall)	Bleikristallglas	Beleuchtungsglas (Trübglas)	Chemisch-technisches Apparateglas	Optisches Glas (Borkron)	Glasfasern		
								Schleuderverfahren	Düsenblasverfahren	Textile Ziehverfahren
SiO_2	72,8	73,3	74	60	67,5	80,4	61...70	62,0	45,6	53,2
Al_2O_3	0,7	1,5	0,18	0,08	5,0	2,27	0,3...3	3,4	13,5	14,2
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$	0,09	0,06	0,02	0,02	0,15	0,03	–	0,5	15,5	0,34
CaO	8,6	9,8	5,3	–	9,4	–	< 3	8,0	10,4	22,6
PbO	–	–	2,8	24,0	–	–	–	–	–	–
MgO	3,61	0,34	–	–	–	–	–	3,7	10,3	0,42
Na_2O	13,7	14,2	5,0	1,0	13,6	3,8	< 5	14,0	3,5	0,26
K_2O	0,2	0,6	12,7	14,9	1,8	0,6	12...18	1,8	1,1	0,21
SO_3	0,3	0,2	–	–	0,2	–	–	0,2	0,1	–
F	–	–	–	–	4,0	–	–	–	–	–
B_2O_3	–	–	–	–	–	12,9	6...20	5,0	–	8,55
BaO	–	–	–	–	–	–	< 10	1,4	–	$\text{SrO} + \text{ZrO} + \text{P}_2\text{O}_5 = 0,22$

Eine der wichtigsten Eigenschaften von Glas ist die Durchlässigkeit für das sichtbare Licht. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die chemische Beständigkeit gegenüber den meisten Stoffen. Lediglich Flusssäure und alkalische Schmelzen können Glas auflösen. Des Weiteren ist Glas in fester Form nicht elektrisch leitend und wird als Isolator oder Dielektrika verwendet. Allerdings ist Glas sehr spröde und hält stoßartigen Beanspruchungen nicht stand, was beim praktischen Einsatz zu beachten ist. [8]

3 Stand der Technik bei Stölzle Oberglas

In den folgenden Kapiteln wird das Werk Stölzle Oberglas in Köflach vorgestellt.

3.1 Produktionsprozess

Bei Stölzle Oberglas werden an insgesamt zehn Linien Kleinglasbehälter für die Pharmaindustrie, Lebensmittelindustrie, Kosmetikindustrie sowie Miniaturen für die Getränkeindustrie gefertigt. Am Standort Köflach wird dazu das Glas in zwei Glaswannen aufgeschmolzen, die jeweils fünf Linien speisen. Eine Wanne produziert Weißglas und die andere je nach Auftragslage Braun- oder Grünglas. Stölzle Oberglas setzt auf Flexibilität in der Produktion, was dazu führt, dass die Tages tonnagen stark schwanken. Im Schnitt beträgt die Tages tonnage 250 t. Ein allgemeines Schema zur Behälterglasherstellung ist in **Abbildung 3-1** dargestellt.

Die Rohstoffe werden im Gemengehaus (Pos. 1) gelagert und vermischt. Von dort wird das Gemenge über Förderbänder in die Schmelzwanne (Pos. 2) befördert und zu einer Glasschmelze geschmolzen. Über Feeder (Speiser) wird die Schmelze zu den Formgebungsmaschinen (Pos. 3) transportiert, wo sie in Form gebracht wird und erstarrt. Anschließend werden die gefertigten Behälter im Kühllofen langsam abgekühlt, um innere Spannungen zu minimieren. Bei den Aggregaten von der Schmelzwanne bis zum Kühllofen spricht man vom „heißen Ende“. Die fertigen Glasbehälter werden anschließend im „kalten Ende“ veredelt, kontrolliert und verpackt.

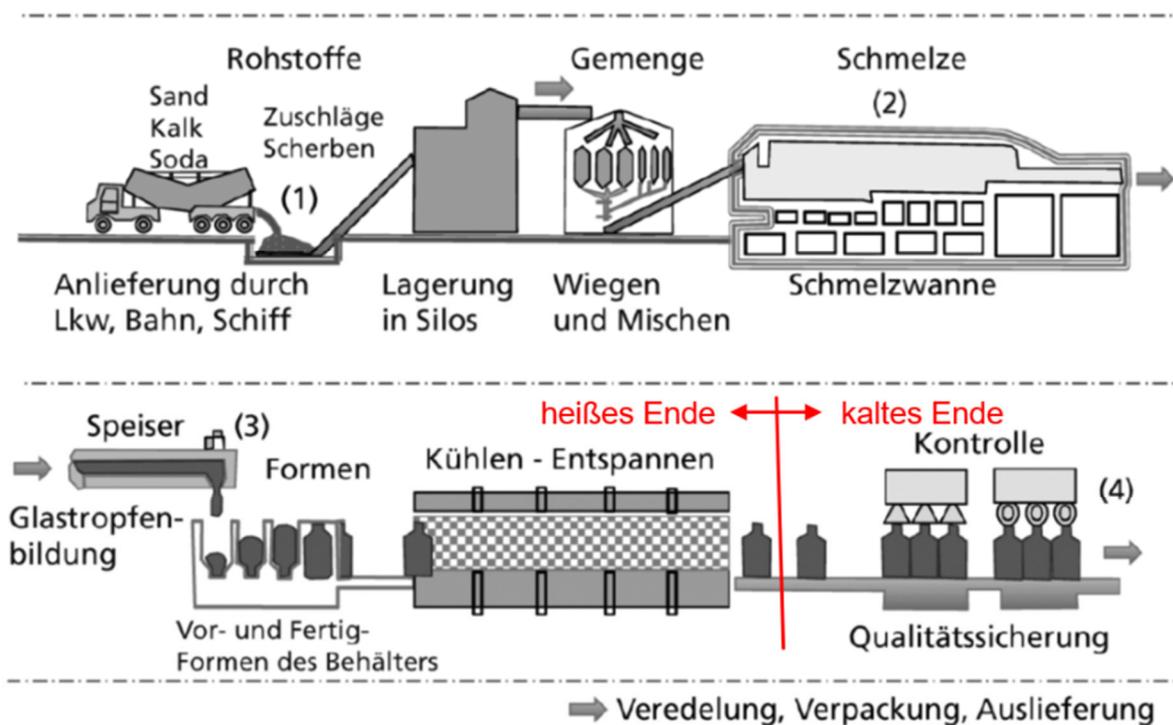


Abbildung 3-1: Schema Behälterglasherstellung [9]

Das Prozessbild des heißen Endes der Produktion mit den jeweiligen Stoff- und Energieströmen ist in **Abbildung 3-2** dargestellt. Auf die einzelnen Ströme wird später im **Kapitel 3.2** genauer eingegangen. In diesem Kapitel dient das Prozessbild dem Verständnis des Produktionsprozesses. Im Unterschied zum Schema in **Abbildung 3-1** wird im Prozessbild beim Glasschmelzentransport zwischen Arbeitswanne und Feeder unterschieden. In der Arbeitswanne wird die Glasschmelze auf die einzelnen Feeder verteilt und in diesen zu den Formgebungsmaschinen transportiert.

Die Position der einzelnen Aggregate des heißen Endes zur Produktion der weißen Glasbehälter ist in **Abbildung 3-3** dargestellt. **Abbildung 3-4** zeigt die Aggregate des heißen Endes zur Produktion der braunen und grünen Glasbehälter. Zur Vereinfachung wird im Folgenden in dieser Arbeit nur von Braunglas gesprochen, auch wenn auf diesen Linien teilweise Grünglas gefertigt wird.

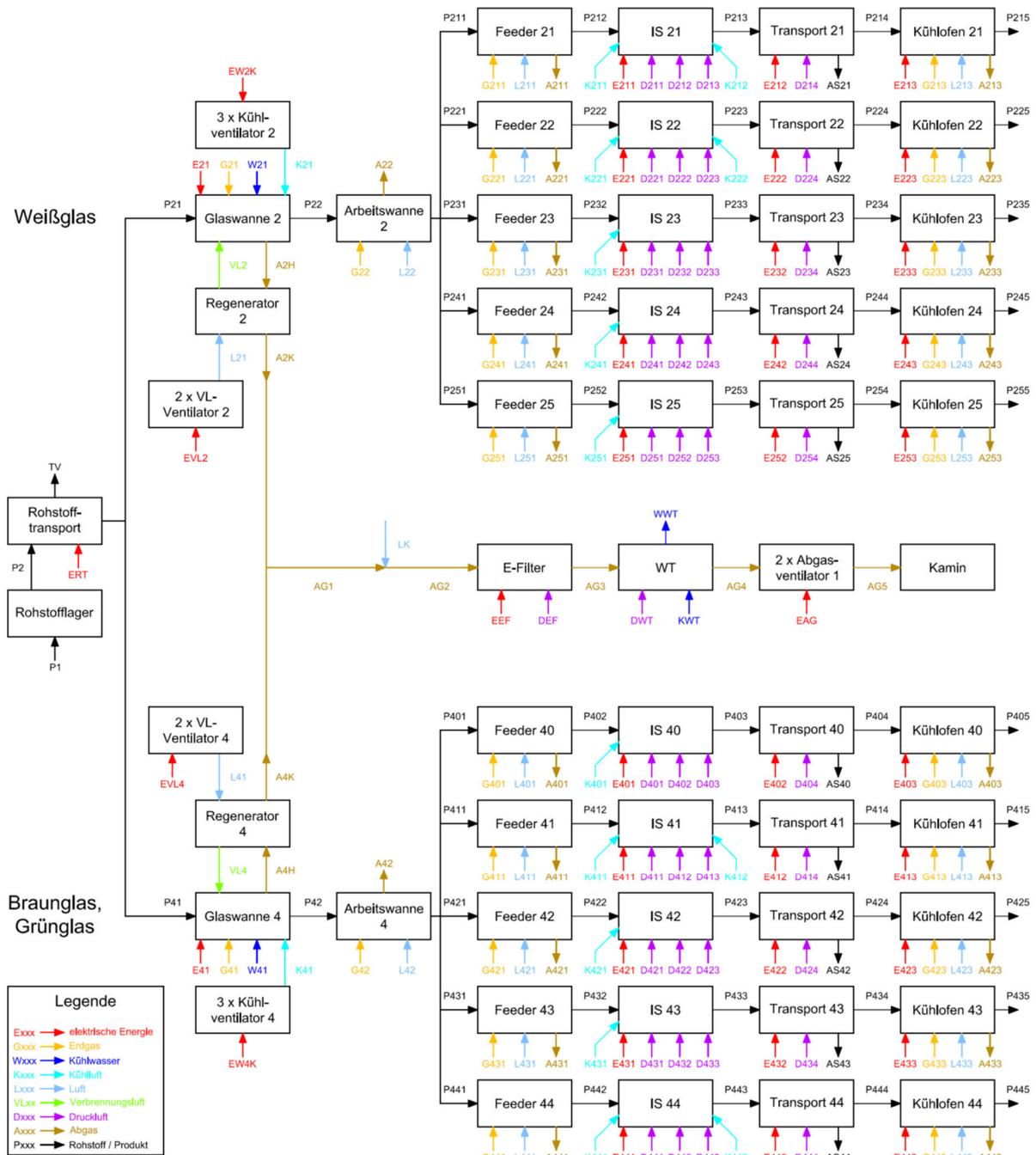


Abbildung 3-2: Prozessbild des heißen Endes mit Stoffströmen von Stölzle Oberglas

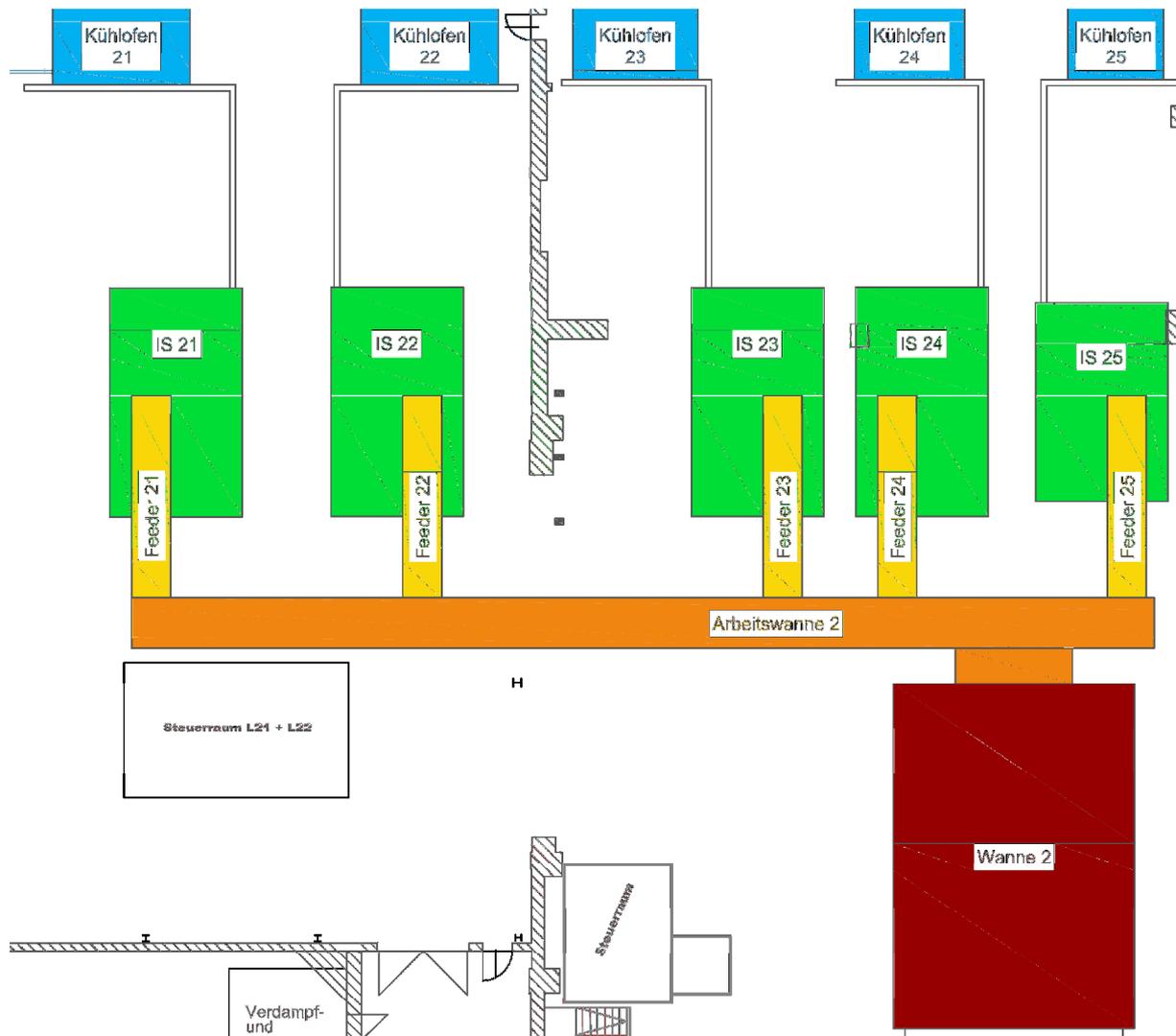


Abbildung 3-3: Plan heißes Ende - Weißglas

Beide Pläne sind nicht maßstabsgetreu und dienen nur zur Orientierung. Zur besseren Übersicht wurden die gleichen Aggregate an verschiedenen Linien gleich eingefärbt. Die Glaswannen, Arbeitswannen und Feeder befinden sich eine Ebene über den IS-Maschinen und den Kühlöfen. Sie sind über einen Gitterboden zugänglich.

Bis Februar 2018 hieß die Linie 40 noch Linie 26 und war an die Weißglaswanne angeschlossen. Außerdem ist noch eine neue Linie 20 in Planung. Sie soll links von der Linie 21 verlaufen und im März 2019 in Betrieb gehen.

Im Folgenden werden die für die Produktion notwendigen Aggregate, in der Reihenfolge wie das Produkt sie am Weg vom Rohstoff bis zum fertigen Glasbehälter durchläuft, im Detail beschrieben.



Abbildung 3-4: Plan heißes Ende - Braunglas

3.1.1 Gemengehaus

Die Rohstoffe zur Glasherstellung haben in der Regel eine Korngröße zwischen 0,01 und 2 mm. Von Vorteil ist ein gewisser Feuchtegehalt, von 3 - 4 %, damit sich die Staubentwicklung beim Transport der Rohstoffe in Grenzen hält. Auch beim Einbringen der Rohstoffe in die Glaswanne darf der Staubanfall nicht zu groß sein, da sonst die Staubpartikel ohne Umwandlung vom Abgasstrom aus der Glaswanne gezogen werden. Allerdings dürfen die Rohstoffe auch nicht zu feucht sein, denn zu viel Wasser im Rohstoff führt zu erhöhtem Energiebedarf. [8]

Im Gemengehaus befinden sich 15 Silos in denen die Rohstoffe gelagert werden. Die Anlieferung dieser erfolgt über LKWs, die die Rohstoffe pneumatisch in die Silos pumpen. Die meisten LKWs verfügen über eine eigene Druckluftanlage und es muss nur bei manchen für die pneumatische Förderung auf das werksinterne Druckluftnetz zurückgegriffen werden.

Neben den Silos befinden sich Waagen, Mischer, Förderbänder und Elevatoren im Gemengehaus. Die Waagen werden für die diskontinuierliche Dosierung der Rohstoffe verwendet. Um in kürzester Zeit möglichst genau die gewünschte Schüttgutmenge einfüllen zu können, wird der Mengenstrom, mit dem der Behälter gefüllt wird, variiert: Zunächst wird mit einem großen Mengenstrom so weit gefüllt, bis das gewünschte Gewicht fast (z.B. 95 %) erreicht ist. Der Rest wird anschließend mit einem kleinen Mengenstrom nachgefüllt.

Das Prozessziel eines Mischvorganges ist der Abbau von Eigenschaftsunterschieden vor allem hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung, Partikelgrößenverteilung und der Feuchte mit einer möglichst weitgehenden Annäherung an den besten vorstellbaren Zustand, den man als vollständige Zufallsmischung bezeichnet. Um dieses Ziel zu erreichen, können folgende Aggregate eingesetzt werden: [10]

- Rotierende Mischbehälter, in denen das Mischgut umgewälzt wird
- Mischbehälter, in denen die Mischgutbewegung durch rotierende Agitationsorgane (Mischwerkzeuge) erzwungen wird
- Pneumatische Mischer, in denen die Fluidisierung und Umwälzung des Mischguts mittels eines strömenden Gases bewirkt wird
- Bunkermischer bzw. Silomischer, in denen vor allem der Schüttgutfluss für das Hervorbringen der Mischwirkung ausgenutzt wird

In der Glasindustrie werden hauptsächlich Mischbehälter mit rotierenden Agitationsorganen verwendet. Diese sind durch einen feststehenden Mischbehälter, in dem eine oder mehrere liegende bzw. stehende Wellen rotieren, charakterisiert. An den Wellen sind Mischwerkzeuge befestigt, die das Mischgut zwangsweise bewegen. Die Variationsbreite hinsichtlich der konstruktiven Gestaltung ist bei diesen Mixern außerordentlich groß. [10]

Bei Stölzle Oberglas werden Mischer der Type S-1500 von Fejmert verwendet. Wie in **Abbildung 3-5** dargestellt, besteht dieser Mischer aus einem Mischbehälter und einem schnell rotierenden Rührwerk. Der Mischbehälter weist einen Durchmesser von 2,86 m und eine Kapazität von 1.500 l auf. Das Rührwerk wird von zwei Elektromotoren mit einer Gesamtleistungsaufnahme von 46,2 kW über ein Getriebe angetrieben.



Abbildung 3-5: Mischer S-1500 von Fejmert [11]

Die Förderbänder und Elevatoren dienen dem kontinuierlichen Gemengetransport zu den jeweiligen Glaswannen. Da die Förderhöhe beim Gemengetransport mit Förderbändern begrenzt ist, wird das Gemenge mit Elevatoren vom Kellergeschoss in die Ebene der Glaswannen gefördert. Unter Elevatoren versteht man ein senkrecht verbautes Förderband, das Lamellen oder Taschen aufweist, die einen senkrechten Gemengetransport ermöglichen.

Neben den Aggregaten, die den Gemengetransport zu den Glaswannen ermöglichen, wird dem Gemengehaus auch die Scherbenrückführung zugeordnet. Dabei werden fertige Glasprodukte, die aufgrund nicht genügender Qualitätsanforderungen aus der Produktionsstraße ausgemustert wurden, über Scherbenkratzer, Rüttelrinnen, Förderbänder, Scherbenbrecher und Elevatoren als Prozessscherben wieder der Produktion zugeführt.

Ein Kratzförderer besteht aus einer mit Wasser gefüllten Wanne, in der Lamellen über zwei umlaufende Bänder über den Wannensboden bewegt werden, wie in **Abbildung 3-6** dargestellt. Die ausgemusterten, heißen Glasprodukte werden im Wasserbad abgekühlt und von den Lamellen weiterbefördert.



Abbildung 3-6: Kratzförderer [12]

Bei einer Rüttelrinne handelt es sich im Wesentlichen um einen Schwingförderer. Dabei wird eine Rinne, die in die gewünschte Transportrichtung geneigt ist, über einen Unwuchtmotor in Vibration versetzt und so das Gut befördert.

3.1.2 Glaswannen

Das Schmelzen des Gemenges zu Glas findet in drei Phasen statt. Zuerst entsteht die Rauhschmelze, die bei höherer Temperatur in die Feinschmelze übergeht. Vor der Weiterverarbeitung muss die Glasschmelze noch abstehen. Die drei Phasen und ihre chemisch-physikalischen Vorgänge sind in **Tabelle 3-I** dargestellt.

Tabelle 3-I: Phasen bei der Bildung der Glasschmelze [8]

Schmelzphasen		Temperatur [°C]	chem.-phys. Vorgang
Rauhschmelze	Silikatbildung	800-900 (Soda)	Entstehung silicat. Schmelzen
	Glasbildung	bis 1200	restl. Sand löst sich in Silikaten
Feinschmelze	Läuterung	1400-1480	Entgasung (CO ₂ , SO ₂ , O ₂ ,)
(Blankschmelze)	Homogenisierung	1400-1480	Durchmischung
Abstehen	Abstehen	bis ca. 1200	Abkühlung

Die Rauhschmelze entsteht ab 800-900 °C. Bei diesen Temperaturen zersetzen sich Hydrate, Carbonate, Sulfate und Nitrate und es bilden sich Silikate. Anschließend findet die eigentliche Glasbildung statt, in der sich der restliche Quarz in Silikate löst. Dieser Vorgang ist

bei ca. 1.200 °C abgeschlossen. Es entsteht eine von Gasblasen durchsetzte und in der chemischen Zusammensetzung inhomogene Glasmasse.

Ab einer Temperatur von 1.400 °C ist die Löslichkeit der Gase im Glas so weit herabgesetzt, dass es zu einer fast restlosen Entgasung kommt. Dieser Vorgang wird Läuterung genannt und kann durch die Zugabe von Läuterungsmittel unterstützt werden, indem der Zersetzungsdruck der gebundenen Gase erhöht wird. Der einzige Vorgang der für den Konzentrationsausgleich in der Glasschmelze sorgt, ist die Diffusion, da aufgrund der großen Zähigkeit der Glasschmelze und der geringen Strömungsgeschwindigkeiten der Glasschmelze in der Glaswanne keine Turbulenzen und damit keine konvektive Durchmischung auftritt. Die Diffusionsgeschwindigkeit kann allerdings durch hohe Temperaturen und Auftreten von Scherströmungen erhöht werden. Somit sorgen die hochsteigenden Gasblasen und die Scherwirkung der Glasströmung für eine intensive Homogenisierung der Glasschmelze und es entsteht die Feinschmelze. Zur Gewährleistung einer vollständig blasenfreien Glasschmelze wird die Glasschmelze in der Praxis auf bis zu 1.600 °C erhitzt.

In der Absteckphase kühlt die Glasschmelze ab, bis die geeignete Viskosität zur Weiterverarbeitung erreicht wird. [2, 8]

Für die Herstellung von Massengläsern, wie Flachglas oder Behälterglas, werden kontinuierlich arbeitende Wannenöfen eingesetzt. Bei Wannenöfen wird zwischen zwei Bereichen unterschieden, der Schmelzwanne, in der die Rohstoffe zu Glas geschmolzen werden und der Arbeitswanne, in der die Glasschmelze entnommen und verteilt wird. Diese zwei Bereiche sind durch eine Einschnürung voneinander getrennt. Die einzelnen Phasen des Schmelzvorgangs finden im Wannenofen zur gleichen Zeit in verschiedenen Bereichen der Schmelzwanne statt. Dieser Vorgang ist in **Abbildung 3-7** vereinfacht dargestellt. Die größere Wanne, mit der Gemengeeingabe, stellt die Schmelzwanne und die kleinere auf der rechten Seite die Arbeitswanne dar.

Wannenöfen werden im Allgemeinen mit Erdgas oder Heizöl S beheizt. Dabei streichen die Flammen dicht über die Glasschmelze und beheizen diese vorwiegend durch Wärmestrahlung. Je nach Brenneranordnung wird in *U-Flammenwannen*, für kleine und mittlere Wannenöfen mit Tagestonnagen zwischen 100 und 500 t, und *Querbrennerwannen*, für große Wannenöfen mit Tagestonnagen über 500 t, unterschieden. [8]

Bei Stölzle Oberglas werden zwei gasbeheizte, regenerative U-Flammenwannen eingesetzt. Aus Gründen der Vollständigkeit werden folgend Querbrennerwanne und U-Flammenwanne beschrieben.

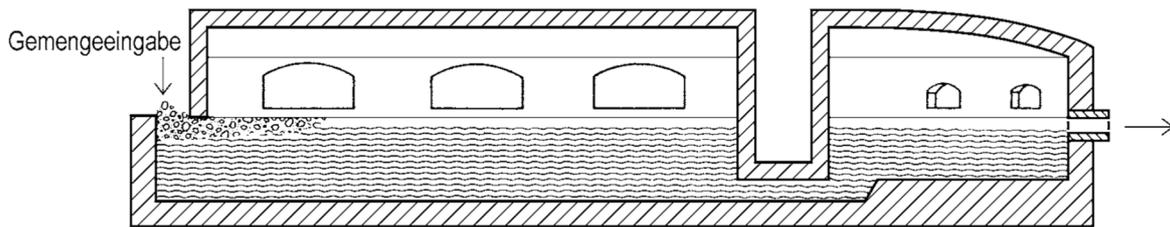
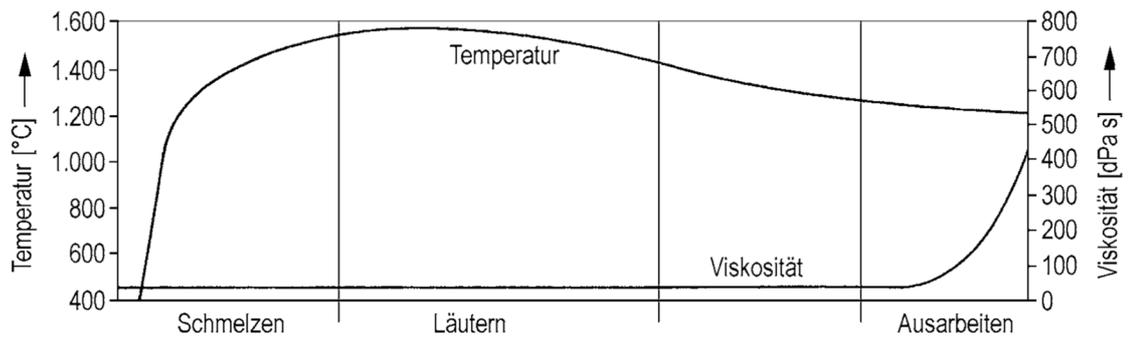


Abbildung 3-7: Glasschmelze in einem Wannenofen (vereinfacht) [8]

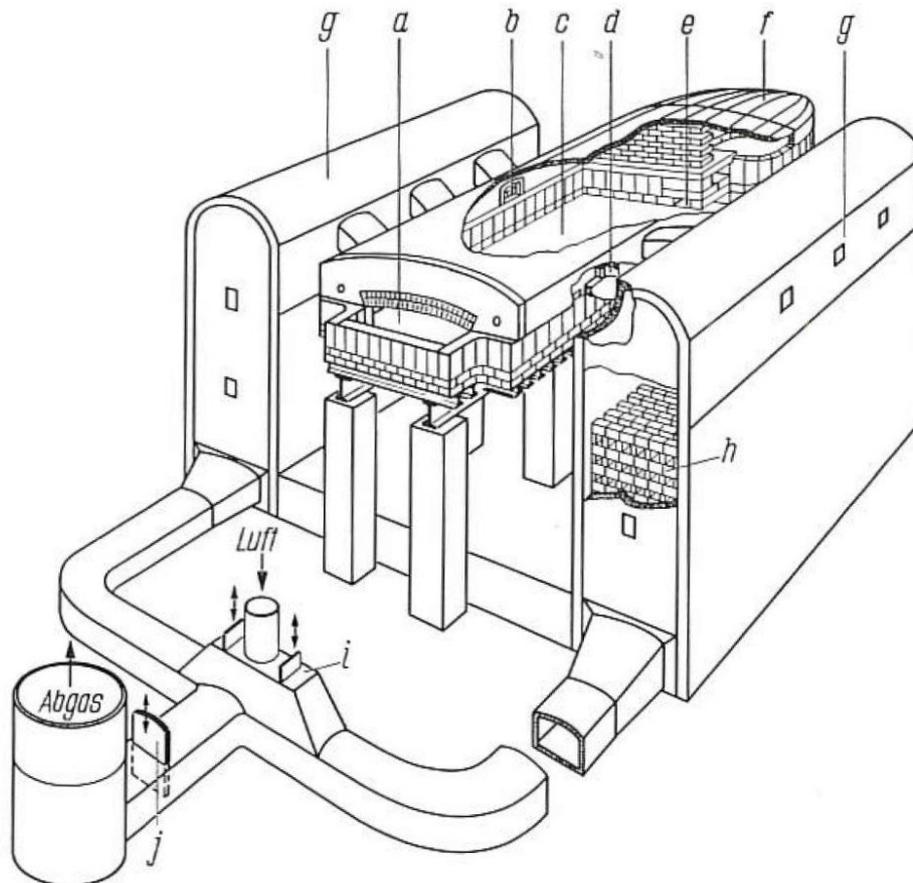


Abbildung 3-8: Regenerative Querbrennerwanne [2]

In **Abbildung 3-8** ist eine regenerative Querbrennerwanne dargestellt. Die Brenner (Pos. b,d) sind an der Längsseite, quer zur Glasflussrichtung, angeordnet. Die Verbrennungsluft wird in einer der beiden Regeneratorkammern (Pos. g) vorgewärmt und mit dem Brenner eingeblasen. Die Brennerdüse kann im, über oder unter dem Verbrennungsluftstrom angeordnet sein, wie in **Abbildung 3-9** ersichtlich.

Das Abgas wird auf der gegenüberliegenden Seite abgesaugt und über die andere Regeneratorkammer geleitet. Dort gibt es Wärme an die Kammergitterung (Pos. h) ab und wird selbst abgekühlt. Wenn die eine Regeneratorkammer von der Verbrennungsluft abgekühlt wurde, werden mit Hilfe von Wechselschiebern (Pos. i) Verbrennungsluft- und Abgasstrom über die jeweils andere Regeneratorkammer geleitet. Die Verbrennungsluft wird nun von der Regeneratorkammer, die zuvor vom Abgas erhitzt wurde, erwärmt.

Die Rohstoffe werden im Einlegevorbau (Pos. a) aufgegeben, in der Schmelzwanne (Pos. c) aufgeschmolzen und über den Durchlass (Pos. e) in die Arbeitswanne (Pos. f) geleitet.

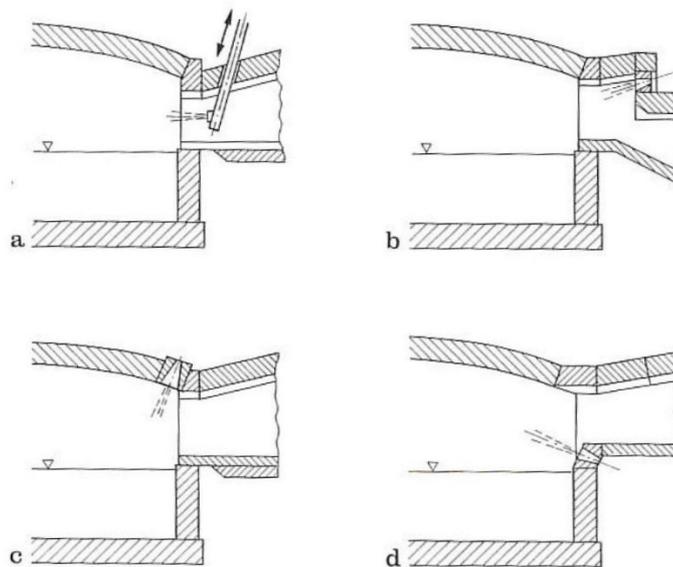


Abbildung 3-9: Mögliche Brennerdüsenanordnung [2]

Vor allem bei Querbrennerwannen muss die Brennerausrichtung, die Rohstoffaufgabe und die Feuchte der Rohstoffe richtig gewählt werden, da eine ungünstige Kombination zu einer Staubproblematik im Abgas führen kann. Bei trockenen Rohstoffen in Verbindung mit einer ungünstigen Brennerausrichtung werden Staubpartikel, die bei der Rohstoffaufgabe freigesetzt werden, vom Abgasstrom erfasst und abgesaugt.

Eine regenerative *U-Flammenwanne* wird in **Abbildung 3-10** dargestellt. Die Verbrennungsluft wird in einer Regeneratorkammer erwärmt und mit dem Brennstoff an der Stirnseite einbracht. Das Abgas wird an der Stirnseite durch die andere Regeneratorkammer

abgezogen. Die Rohstoffe werden seitlich über einen Einlegevorbau, dem sogenannten *Doghouse*, eingebracht. Die homogenisierte Glasschmelze wird an der anderen Stirnseite ausgetragen. Auch hier wird die Verbrennungsluft über einen Regenerator vorgewärmt.

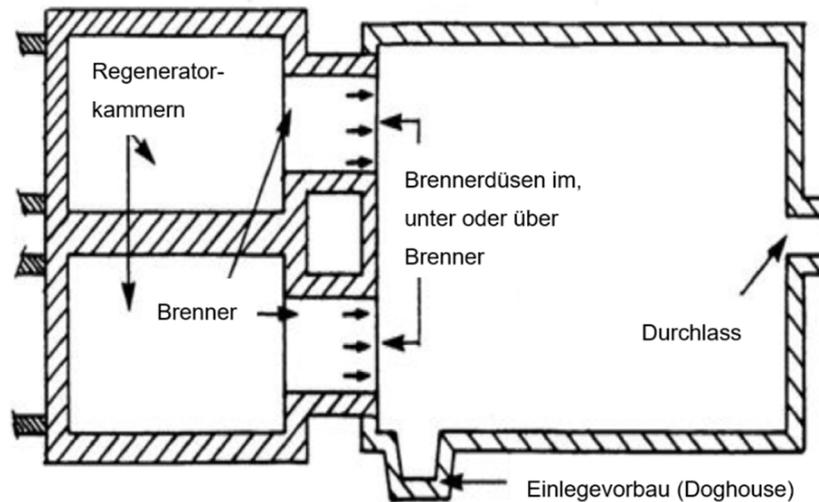


Abbildung 3-10: Regenerative U-Flammenwanne [13]

Wannenöfen können neben den Brennern über eine elektrische Zusatzheizung (EZH), in Form von Elektroden, welche in die Glasschmelze reichen, verfügen. Mit Hilfe der Elektroden kann die Wärme gezielt in der Glasschmelze selbst erzeugt werden. Je nach den Gegebenheiten kann die Wärme im Schmelz- oder im Läuterungsbereich oder in beiden Bereichen gleichzeitig erzeugt werden. Somit ermöglicht eine EZH einen sehr flexiblen Betrieb. Einen Nachteil stellen die hohen Investitionskosten und die erheblich höheren Energiekosten gegenüber fossilen Brennstoffen dar. Kleinere Wannen für Spezialgläser können auch vollständig elektrisch beheizt werden. [2, 8]

Bei Stölzle Oberglas wird Glas in zwei gasbeheizten, regenerativen U-Flammenwannen mit EZH geschmolzen. Die durchschnittliche Lebensdauer einer Glaswanne, man spricht hier von der Wannenreise, beträgt 15 - 20 Jahre. Wanne 2 wurde im Juli 2013 mit einer Schmelzwannenfläche von 67 m² und Wanne 4 im August 2014 mit einer Schmelzwannenfläche von 54 m² gebaut.

Von Februar 2018 bis August 2018 hatte Wanne 2 eine durchschnittliche Tagestonnage von 137 t und Wanne 4 von 118 t Glas pro Tag. In dieser Zeit musste das Gewölbe von Wanne 2 einer Durchschnittstemperatur von 1.472 °C, mit Spitzentemperaturen von bis zu 1.570 °C, standhalten. Das Gewölbe von Wanne 4 wurde mit einer Durchschnittstemperatur von 1.524 °C und Spitzentemperaturen von bis zu 1.580 °C noch stärker belastet.

In **Abbildung 3-11** ist die Draufsicht und in **Abbildung 3-12** ist die Seitenansicht von Glaswanne 4 dargestellt. Da der Aufbau beider Glaswannen sehr ähnlich ist, gilt die folgende Beschreibung auch für Glaswanne 2. Auffällig ist das Größenverhältnis zwischen Regenerator (Pos. 1) und Schmelzwanne. Der Regenerator muss so groß ausgeführt werden um eine ausreichende Luftvorwärmung zu ermöglichen. Laut Literatur sollte das Verhältnis von Gitterheizfläche des Regenerators zur Schmelzfläche der Glaswanne im Bereich von 25 - 45 liegen. [2]

Die vorgewärmte Verbrennungsluft wird über den Brennerhals (Pos. 2), der über den Brennstoffdüsen (Pos. 3) angeordnet ist, eingeblasen. Neben den Erdgasbrennern verfügt die Glaswanne über eine elektrische Zusatzheizung. Die Elektroden (Pos. 4) werden an der Fassung von einem geschlossenen Wasserkreislauf gekühlt um sie vor Überhitzung zu schützen. Die genaue Lage der Elektroden kann aus der Draufsicht der Glaswanne in **Abbildung 3-11** entnommen werden.

Die Glaswanne verfügt auch über einen sogenannten *Wall* (Pos. 5). Dieser sorgt, in Verbindung mit den kurz davor positionierten Elektroden dafür, dass sich eine rückwärts laufende Strömungswalze ausbildet, die wiederum die Durchmischung fördert. Die fertige Glasschmelze wird über den Durchlass in die Arbeitswanne (Pos. 6) geleitet. Die Rohstoffaufgabe erfolgt seitlich über das Doghouse (Pos. 7).

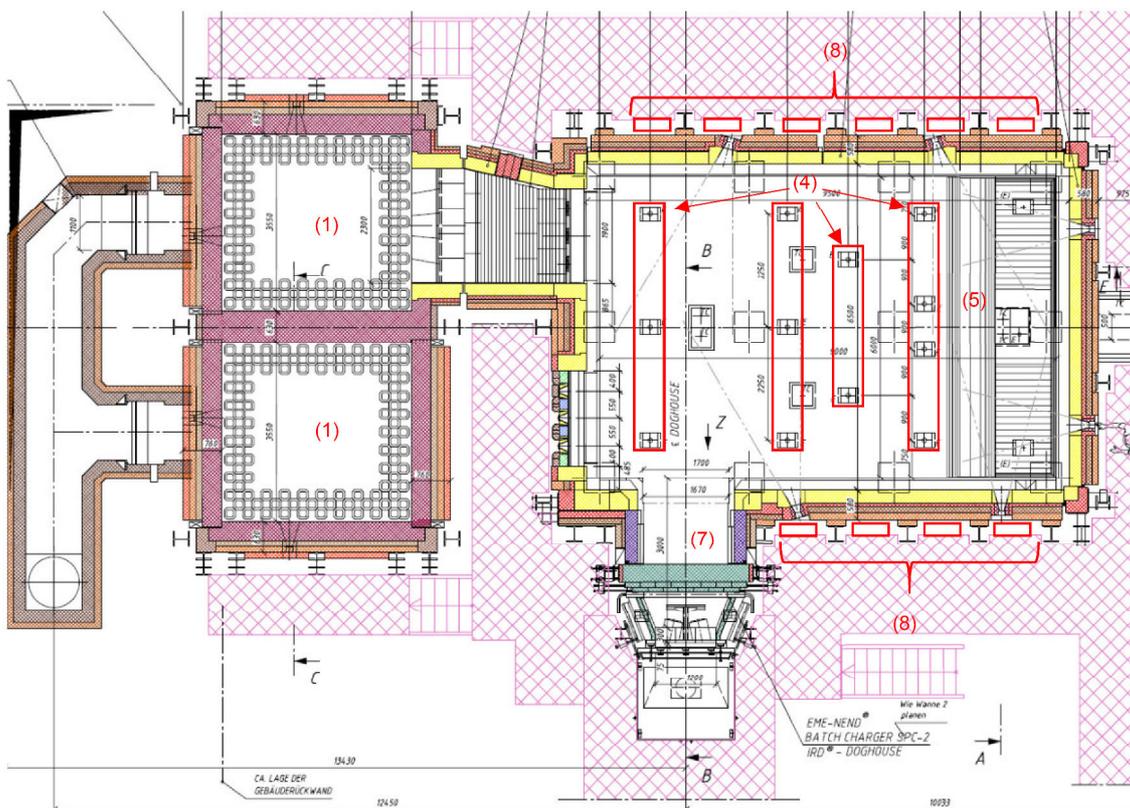


Abbildung 3-11: Draufsicht Wanne 4

Um die Lebensdauer der Glaswannen zu erhöhen werden sie von außen mit Luft gekühlt. Die Kühlluft wird von jeweils drei Ventilatoren bereitgestellt, über Düsen (Pos. 8) von außen an die Glaswannenwand geblasen und strömt anschließend in die Halle, wie in **Abbildung 3-13** dargestellt.



Abbildung 3-13: Wannenkühlung Wanne 4

3.1.2.1 Abgaszug

Das Abgas aus beiden Wannen wird im jeweiligen Regenerator abgekühlt und gibt dabei Wärme über das Regeneratormaterial an die im Gegenstrom geführte Verbrennungsluft ab. Anschließend wird das Abgas beider Wannen in einem Sammelkamin zusammengeführt und über einen Elektrofilter geleitet, wie in **Abbildung 3-14** dargestellt.

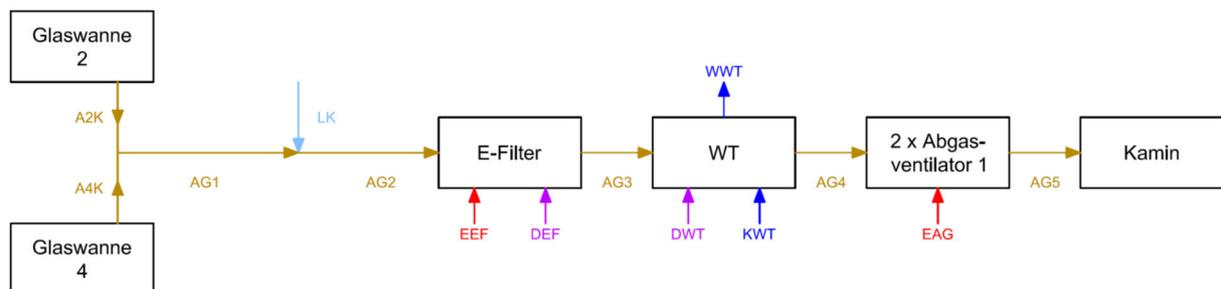


Abbildung 3-14: Abgaszug bei Stölzle Oberglas

Der Elektrofilter ist auf eine Maximaltemperatur von 420 °C ausgelegt und die Temperatur des Abgases im Sammelkamin (AG1) beträgt, je nach Tonnage, 460 - 530 °C. Um die Temperatur des Abgases zu senken wird vor dem Filter über eine offene Klappe Frischluft angesaugt. Nach der Entstaubung im Elektrofilter wird dem Abgas in einem Wärmeübertrager

Wärme entzogen. Die gewonnene Wärme wird ins Fernwärmenetz Köflach eingespeist. Das abgekühlte Abgas wird anschließend über zwei Abgasventilatoren in den Kamin geleitet und an die Umgebung abgegeben.

3.1.3 Arbeitswannen und Feeder

Die Aufgabe der Verteilung und des Transports der Glasschmelze wird von Arbeitswannen und Feeder übernommen. Die Lage und der Verlauf dieser Aggregate können aus **Abbildung 3-3** und **Abbildung 3-4** entnommen werden.

Die Arbeitswannen verteilen die Glasschmelze auf die einzelnen Feeder, die die Glasschmelze zur jeweiligen Formgebungsmaschine leiten. Bei beiden Aggregaten handelt es sich um Transportkanäle aus Feuerfestmaterialien, wobei die Kanäle der Arbeitswanne etwas größer ausgeführt sind, da sie aufgrund ihrer Verteilfunktion eine größere Menge an Glasschmelze transportieren. Am Ende jedes Feeders befindet sich eine Sammelschüssel, in der durch Öffnungen an der Unterseite Glasstränge gebildet werden, die von einem Schneidwerk in Glaspfropfen geschnitten werden. Aus diesen Glaspfropfen werden von den Formgebungsmaschinen die Glasprodukte geformt. Der Durchfluss der Glasschmelze wird über die Viskosität der Glasschmelze geregelt, welche von der Temperatur der Glasschmelze abhängig ist, wie in **Abbildung 3-15** dargestellt.

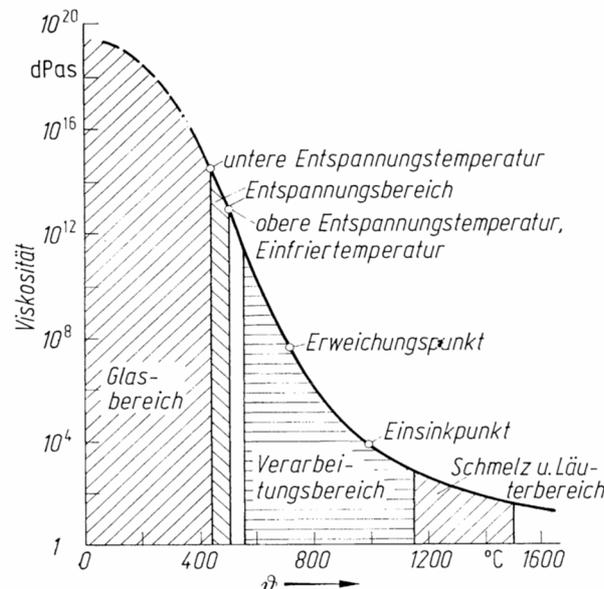


Abbildung 3-15: Charakteristischer Viskositäts-Temperaturverlauf [14]

Um die richtige Temperatur und somit die richtige Viskosität der Glasschmelze zu erreichen, werden Arbeitswanne und Feeder mit einem Erdgas-Luft-Gemisch beheizt. Sie werden dafür

in Zonen unterteilt, in denen die Temperatur der Glasschmelze eingestellt wird. Die tatsächliche Temperatur der Glasschmelze wird von, in die Schmelze ragenden, Thermoelementen erfasst.

Das Erdgas-Luft-Gemisch wird in Gasmischstationen gebildet, in denen der Sauerstoffgehalt im Erdgas-Luft-Gemisch eingestellt werden kann. Prinzipiell muss dabei zwischen Weißglas und Braunglas unterschieden werden. Der Sauerstoffgehalt für die Beheizung der Weißglasschmelze lag in der Zeit von Februar 2018 bis August 2018, je nach Auftragslage und Position an Arbeitswanne oder Feeder, bei 19,1 - 19,9 %, für die Braunglassschmelze bei 18,2 - 18,9 %. Der Sauerstoffgehalt eines Erdgas-Luft-Gemisches für eine stöchiometrische Verbrennung liegt bei 19,0 %. Das bedeutet, dass die Braunglassschmelze unter reduzierenden und die Weißglasschmelze unter oxidierenden Bedingungen beheizt wird. Das Abgas entweicht, wie in **Abbildung 3-16** ersichtlich, durch Öffnungen an der Oberseite von Arbeitswannen und Feeder in die Halle. Aufgrund der reduzierenden Bedingungen, ist bei Braunglas noch nicht das gesamte Erdgas umgesetzt und es schlagen Flammen aus diesen Öffnungen, dargestellt in **Abbildung 3-17**.



Abbildung 3-16: Arbeitswanne zwischen Feeder 22 und Feeder 23



Abbildung 3-17: Feeder 41

3.1.4 IS-Maschinen

In der Regel werden in der Behälterglasherstellung zur Formgebung *Individual-Section-Maschinen* (IS-Maschinen) verwendet. Eine IS-Maschine besteht aus mehreren, individuell arbeitenden Einheiten die Behälterglas herstellen, sogenannten *Sections*. Typische IS-Maschinen bestehen aus 6 bis 20 solcher Sections, die nebeneinander angeordnet sind. Der Vorteil der IS-Maschinen besteht darin, dass es möglich ist Wartungen an einer Einheit durchzuführen, ohne Beeinflussung der anderen Einheiten. Die Glastropfen für diese Einheit werden während der Wartung über Rinnen in ein mit Wasser gefülltes Auffangbecken eine Ebene darunter geleitet. Von dort werden sie mit einem Kratzförderer und Förderbändern mit dem restlichen Prozessausschuss zurück ins Rohstofflager geführt, aufgearbeitet und als Prozessscherben wieder dem Prozess zugeführt.

Die IS-Maschinen befinden sich direkt unter den Sammelschüsseln der Feeder. Ein Schneidwerk schneidet die, aus den Öffnungen der Sammelschüsseln austretenden, Glasstränge in Glastropfen, wie in **Abbildung 3-18** dargestellt. Das Schneidwerk wird mit einer Mischung aus Wasser und Öl gekühlt um sicherzustellen, dass es nicht überhitzt und kein Glas daran haften bleibt. [13]

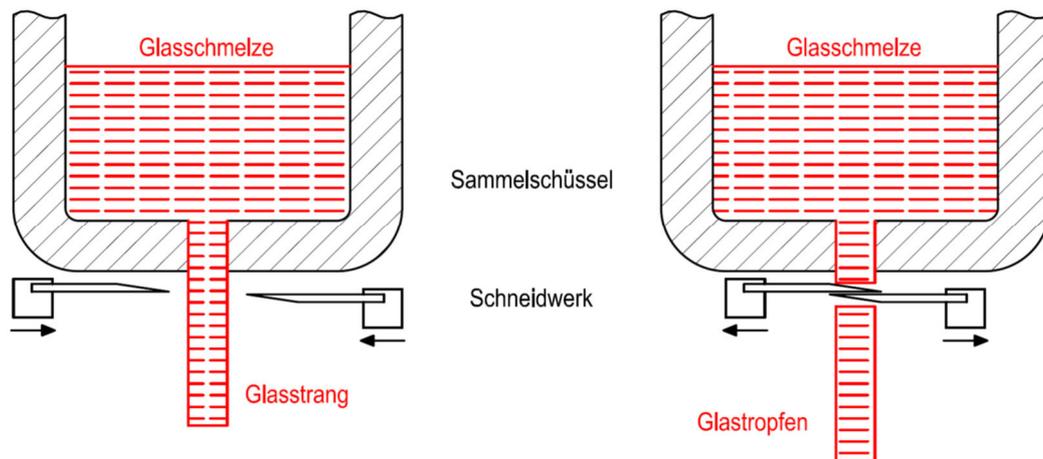


Abbildung 3-18: Schneidwerk für Glastropfen

Die von oben herabfallenden Glastropfen werden mit beweglichen Leitritten zu den jeweiligen Sections geleitet. Je nach Bauart der IS-Maschine werden in der Sammelschüssel zwei oder drei Stränge und somit mit einem Schnitt zwei oder drei Glastropfen gebildet. **Abbildung 3-19** zeigt eine IS-Maschine zur gleichzeitigen Verarbeitung von drei Glastropfen.

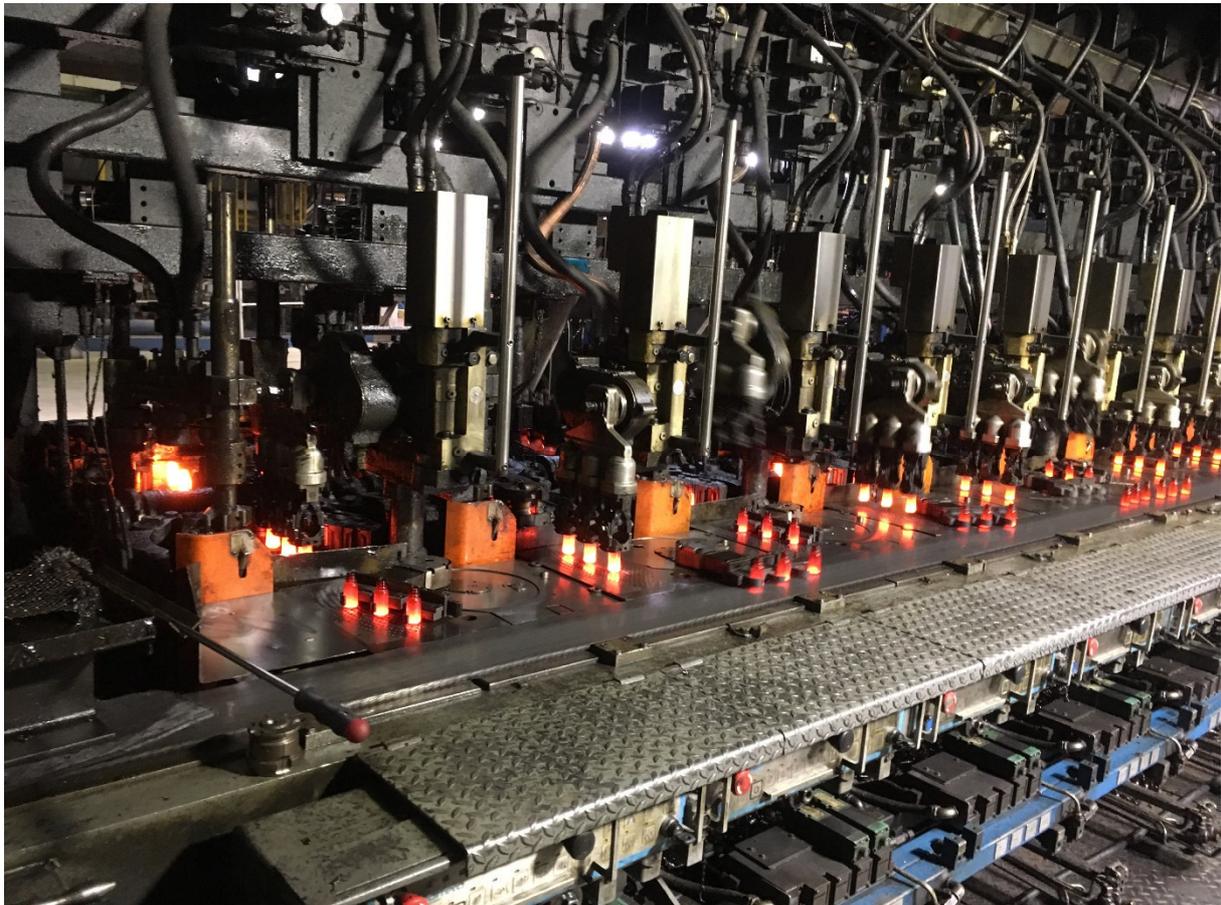


Abbildung 3-19: IS-Maschine von Stölzle Oberglas GmbH

Eine Übersicht der bei Stölzle Oberglas verwendeten IS-Maschinen mit der jeweiligen Anzahl an Stationen und Glastropfen pro Schnitt wird in **Tabelle 3-II** gezeigt.

Tabelle 3-II: IS-Maschinen bei Stölzle Oberglas

Linie	Hersteller	Stationen	Glaspfropfen pro Schnitt
21	Emhart	10	3
22	Bottero	10	2
23	Bottero	10	2
24	Bottero	10	3
25	Emhart	8	3
40	Emhart	10	3
41	Bottero	10	3
42	Bottero	8	3
43	Emhart	8	3
44	Bottero	10	3

Der Formgebungsprozess in den IS-Maschinen erfolgt über das Blas-Blas-Verfahren in zwei Schritten und ist in **Abbildung 3-20** dargestellt. Die Fertigung in zwei Schritten führt zu gleichmäßigen Wandstärken bei den fertigen Produkten.

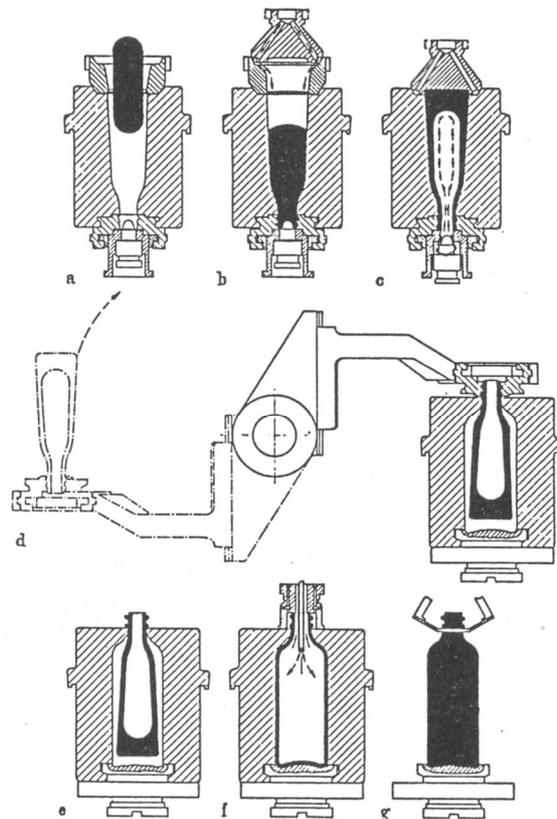


Abbildung 3-20: Behälterglasherstellung im Blas-Blas-Verfahren [15]

Der Glastropfen fällt in die Vorform (Pos. a) und wird in diese über Druckluft aus dem oben aufgesetzten Vorformboden festgeblasen (Pos. b). Anschließend wird mit Druckluft aus dem Dorn unten der sogenannte *Külbel* geblasen (Pos. c). Der Külbel wird in die Fertigform übergeben (Pos. d) und zum Produkt geblasen (Pos. e-g). Die fertigen Glasbehälter werden anschließend mit einem Schwenkarm auf ein Förderband geschoben.

Um die Formstabilität der Behälter zu gewährleisten, müssen sie während des Formprozesses auf ca. 600 °C abkühlen. Das wird durch hohe Volumina an Kühlluft bewerkstelligt, die von der *Formenkühlung* aufgebracht werden. Außerdem werden die Formen durch die Formenkühlung vor Überhitzung geschützt. Im Keller befinden sich Radialventilatoren, die den dazu benötigten Volumenstrom zur Verfügung stellen. Die Ventilatoren werden nicht geregelt und mit der maximalen Leistung betrieben. **Tabelle 3-III** zeigt die verwendeten Ventilatoren, deren Antriebsmotoren und die elektrische Antriebsleistung. Sind in der Tabelle keine Eintragungen vorhanden, existieren die Typenschilder dieser Aggregate nicht mehr oder sind nicht mehr lesbar.

Tabelle 3-III: Formenkühlung bei Stölzle Oberglas

Linie	Art	Hersteller	Type	elektr. Leistung [kW]
21	Ventilator	Ferrari Gevent Ventilatoren	ART 1251 N1S LG90	160
	Motor	Siemens	1LE1 501-3AB53-4AB4-Z	
22	Ventilator	Ferrari Gevent Ventilatoren	ART 1251 N12S RD90	160
	Motor	Siemens	1LG4 316-4AA60-Z315L	
23	Ventilator	Gebhardt Ventilatoren	ART 1251 N12S LG90/Z	132
	Motor	Adda Antriebstechnik	C315 M74	
24	Ventilator	-	-	90
	Motor	Elin	KG 280/M4	
25	Ventilator	Ferrari Gevent Ventilatoren	VCM 1401 N1A RD90	110
	Motor	Lenze WEG	3155/M4	
40	Ventilator	Ferrari Gevent Ventilatoren	ART 1251 N15 LG90	160
	Motor	Siemens	1LG4 316-4AA60-Z315L	
41	Ventilator	Ferrari Gevent Ventilatoren	LWM-XMHD-K-440-90/2/50	-
	Motor	Siemens	-	
42	Ventilator	Ferrari Gevent Ventilatoren	VCM 1401 N1A RD90	132
	Motor	Lenze WEG	3155/M4	
43	Ventilator	Gebhardt Ventilatoren	ART 1001 N12 LG90/W	90
	Motor	Thien Co Elektromaschinenbau	02.80 M12504	
44	Ventilator	Ferrari Gevent Ventilatoren	VCM 1401 N125 RD90	200
	Motor	Siemens	1LE1 501-3AB53-4AB4-Z	

An den Linien 21, 22, 41 und 44 werden in der Regel größere Behälter produziert. Aufgrund der größeren Glastropfen und deren gespeicherter Wärme, ist hier die thermische Belastung der Formen besonders hoch. Die Formen an diesen Linien sind mit Kühlkanälen, durch die Kühlluft geleitet wird, durchzogen. Dieses System wird *Vertiflow* genannt und führt neben der Formenkühlung zusätzlich Wärme ab. **Abbildung 3-21** zeigt rechts Formen ohne und links Formen mit Vertiflow.



Abbildung 3-21: Formen mit (links) und ohne Vertiflow (rechts)

Die Aggregate die die dafür benötigte Kühlluft zur Verfügung stellen befinden sich ebenfalls im Keller und sind in **Tabelle 3-IV** dargestellt. Wie die Radialventilatoren der Formenkühlung, werden auch diese unregelt und mit voller Leistung betrieben.

Tabelle 3-IV: Vertiflow bei Stölzle Oberglas

Linie	Art	Hersteller	Name	elektr. Leistung [kW]
21	Ventilator	Ferrari Gevent Ventilatoren	FE 1121 N12A LG90	75
	Motor	Siemens	1LG4 280-4AA60-Z280S	
22	Ventilator	Ferrari Gevent Ventilatoren	FE 1121 N1A RD90	75
	Motor	Siemens	1LG4 280-4AA60-Z280S	
41	Ventilator	LWN Tornado	-	90
	Motor	Siemens	1LG6 383-2AB60-Z	
44	Ventilator	Ferrari Gevent Ventilatoren	FE 11211 N01A P01 GR.C	75
	Motor	Siemens	1LG4 280-4AA60-Z280S	

Die Formen der IS-Maschinen werden regelmäßig mit dem Trennmittel „Kleenmold 197“ bestrichen, um zu verhindern, dass Glas an ihnen haften bleibt. Die Oberflächen der Behälter des ersten Zyklus der frisch bestrichenen Formen haben Trennmittelrückstände an der Oberfläche. Aus diesem Grund werden diese Behälter ausgemustert. Die heißen Temperaturen der Formen sorgen dafür, dass Teile des Trennmittels beim Auftragen

verdampfen. Das führt zu ölhaltigen Schwaden, die in Richtung Decke aufsteigen und die darüberliegenden Aggregate mit leicht entzündlichen Öflusen verunreinigen können.

3.1.5 Transport

Das Aggregat Transport befördert die, in der IS-Maschine gefertigten, Glasbehälter zum Kühllofen, wie in **Abbildung 3-2** dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden hier fünf Einzelaggregate zu einem zusammengefasst. Da die Energieverbräuche der Einzelaggregate recht gering sind, hat dies keinen erheblichen Einfluss auf die energetische Betrachtung. Die einzelnen Aggregate sind in **Abbildung 3-22** dargestellt und werden im Folgenden beschrieben.



Abbildung 3-22: Einzelaggregate Transport Linie 21

Beim Maschinenband handelt es sich um das Förderband an der IS-Maschine, das die Glasbehälter nach deren Fertigung aufnimmt. Über Druckluft werden hier Glasbehälter mit verschmutzter Oberfläche ausgeblasen. Die ausgeblasenen Behälter fallen in den Kratzförderer im Keller und werden dem Prozess als Prozessscherben wieder zugeführt.

Die Oberfläche der gefertigten Glasbehälter wird Heißendvergütung veredelt. Es wird das Vergütungsmittel TC100 über eine Düse aufgesprüht. Je nach Temperatur der Glasbehälter kann mit einer kleinen atmosphärischen Gasflamme zugeheizt werden.

Das Querband ist ein Förderband, das 90° versetzt zum Maschinenband läuft und die Glasbehälter für den Kühllofen positioniert. Der Übergang von Maschinenband auf Querband wird Umlenkecke genannt und wird meist durch eine Metallführung bewerkstelligt. Bei großen Behältern kann dieser Übergang durch ein seitlich montiertes Förderband unterstützt werden. Um vor allem kleine Flaschen vor zu schnellem Abkühlen, aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche, zu bewahren, kann mit einer kleinen atmosphärischen Gasflamme zugeheizt werden.

Der Einschieber ist parallel zum Querband positioniert und befördert die Glasbehälter in den Kühllofen. Mit einer Schiene schiebt er die Behälter auf das Förderband des Kühllofens. Auch hier kann mit einer kleinen atmosphärischen Flamme zugeheizt werden.

3.1.6 Kühlöfen

Zu schnelles Abkühlen der gefertigten Behälter an der Umgebungsluft würde hohe thermische Spannungen im Glas erzeugen, was die Zerbrechlichkeit erhöht. Dabei muss zwischen Verschmelzungsspannungen, temporären Spannungen und Kühlspannungen unterschieden werden. Verschmelzungsspannungen treten aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Materialien im Glas auf. Neben der Viskosität ist auch die Wärmeausdehnung von Glas temperaturabhängig und somit entstehen bei einem Temperaturgradienten zwischen Glasinneren und Glasoberfläche temporäre Spannungen. Diese verschwinden wieder, wenn sich im gesamten Glas die gleiche Temperatur einstellt.

Der Abbau der Spannungen im erstarrten Glas erfolgt im Entspannungsbereich, der durch die obere und untere Entspannungstemperatur begrenzt ist, wie in **Abbildung 3-15** dargestellt. Unterhalb der unteren Entspannungstemperatur ist keine Entspannung des Glases in vernünftigen Zeiträumen mehr möglich. Der Bereich zwischen oberer und unterer Entspannungstemperatur wird auch kritischen Kühlbereich genannt. Wird Glas oberhalb der unteren Entspannungstemperatur rasch abgekühlt, bildet sich ein Temperaturgradient zwischen Glasinneren und Glasoberfläche aus. Es entstehen allerdings keine temporären Spannungen, da die Viskosität des Glases noch so gering ist, dass sich kein Spannungsfeld ausbilden kann. Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist oberhalb des Entspannungsbereichs des Glases größer als unterhalb und somit schrumpft die Glasoberfläche in einem geringeren Ausmaß als das Glasinnere. Dies führt zur Ausbildung von Kühlspannungen, die auch nach Erreichen der Raumtemperatur erhalten bleiben.

Um das zu verhindern, werden die Glasbehälter in einem Kühlöfen unter kontrollierten Bedingungen zuerst erhitzt und anschließend langsam abgekühlt. Vor allem in der kritischen Kühlzone muss die Abkühlrate, mit ca. 2 °C/min, sehr niedrig sein. Nach dem Erreichen der unteren Entspannungstemperatur kann die Abkühlung schneller erfolgen. **Abbildung 3-23** zeigt einen möglichen Temperaturverlauf für ein Kalknatronglas und ein Bleisilicatglas. [14]

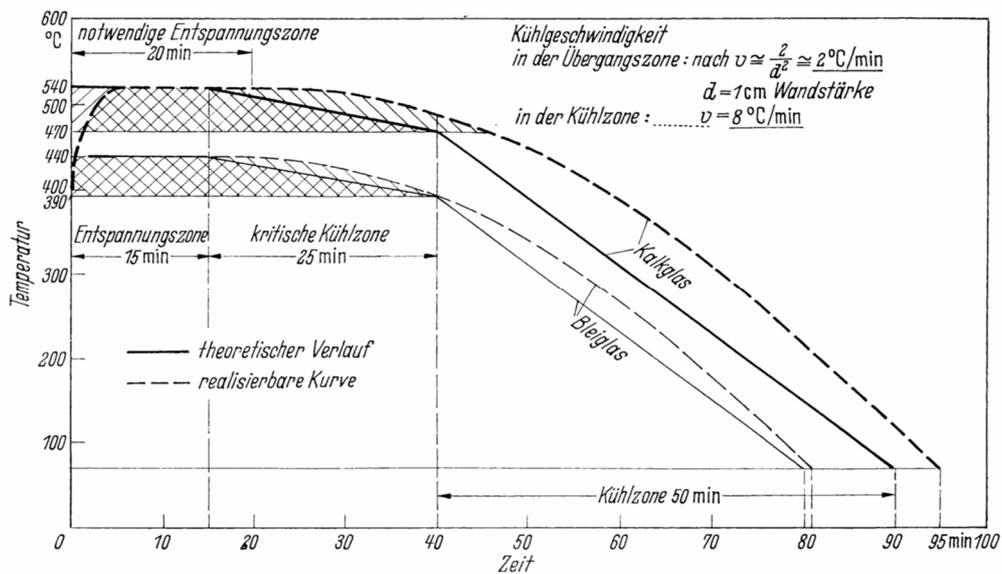


Abbildung 3-23: Theoretisch abgeschätzte und praktisch einstellbare Kühlkurven für die Kühlung von Kalk- und Bleiglas [14]

Die Kühlöfen bei Stölzle Oberglas sind als erdgasbeheizte Schachtofen ausgeführt. Auf einem Förderband werden die gefertigten Glasbehälter durch mehrere Zonen im Kühlöfen geführt, wobei jede Zone für sich geregelt werden kann. Ventilatoren an der Oberseite sorgen für eine Durchmischung der Luft und damit für eine gleichmäßige Temperatur innerhalb einer Zone. Das Abgas wird am Ende des Tunnels abgesaugt und in die Halle des heißen Endes abgegeben. Der Vorteil des Schachtofens liegt darin, dass die Brenngase der vorderen Zonen durch die folgenden Zonen geführt werden und somit weniger Erdgas für die Beheizung der folgenden Zonen benötigt wird. **Abbildung 3-24** zeigt die Seitenansicht des Kühlofens der neu geplanten Linie 20.

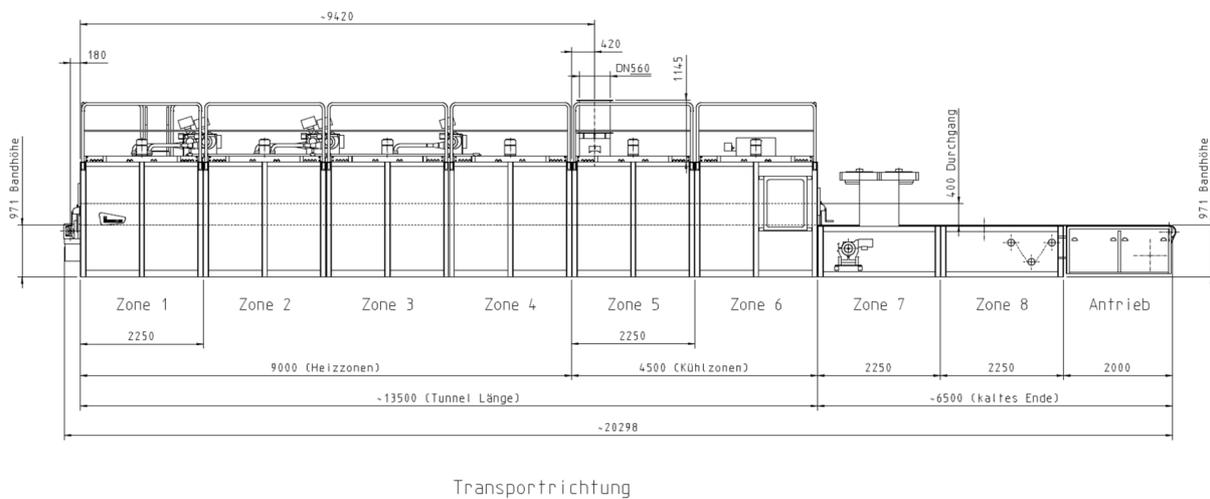


Abbildung 3-24: Seitenansicht Kühlöfen Linie 20

In der ersten Zone werden die Behälter auf 550-580 °C erwärmt und anschließend unter kontrollierten Bedingungen je nach Behältergröße auf 90-200 °C am Ende abgekühlt. Die Zonen sieben und acht liegen im, baulich vom heißen Ende abgetrennten, kalten Ende.

Tabelle 3-V zeigt die verwendeten Kühlöfen mit elektrischer Anschlussleistung und Erdgasverbrauch bei Vollast bei Stölzle Oberglas.

Tabelle 3-V: Kühlöfen bei Stölzle Oberglas

Linie	Hersteller	Type	elektr. Leistung [kVA]	Erdgas [m ³ /h]
21	Antonini	L07W 360/40/21	45	12
22	Antonini	L07W 360/40/21	45	12
23	Ernst Pennekamp GmbH	Anr. 21364	25	14
24	Ernst Pennekamp GmbH	Anr. 33590	25	14
25	Ernst Pennekamp GmbH	Anr. 21363	25	14
40	Ernst Pennekamp GmbH	Anr. 12562	25	14
41	Antonini	L07W 360/40/21	45	12
42	Ernst Pennekamp GmbH	Anr. 30359	25	14
43	Ernst Pennekamp GmbH	Anr. 22936	25	14
44	SMIT Nijmegen Holland	TKLG 2200	51	20

Die Kühlöfen haben verschiedene Anzahlen an Zonen, deren Temperatur an die jeweilig produzierten Glasbehälter angepasst wird. Die Betriebsparameter für die einzelnen Zonen für den 17.05.2018, ein Tag mit einer durchschnittlichen Tonnage im Zeitraum Februar 2018 bis August 2018, sind exemplarisch in **Tabelle 3-VI** dargestellt.

Tabelle 3-VI: Betriebsparameter der Zonen der Kühlöfen bei Stölzle Oberglas

Linie	Zone 1 [°C]	Zone 2 [°C]	Zone 3 [°C]	Zone 4 [°C]	Zone 5 [°C]	Zone 6 [°C]	Zone 7 [°C]	Zone 8 [°C]
21	580	550	460	380	300	180	140	-
22	580	555	500	415	320	200	90	-
23	575	565	490	390	290	250	180	-
24	560	530	480	430	300	200	-	-
25	565	555	440	340	255	145	-	-
40	555	510	445	275	180	120	-	-
41	570	545	490	450	380	290	180	120
42	565	550	480	380	200	120	-	-
43	560	540	500	450	350	200	-	-
44	555	535	495	455	350	320	200	100

3.1.7 Kaltes Ende

Im kalten Ende erfolgt die Vergütung der Oberfläche und die Qualitätskontrolle der abgekühlten Glasbehälter. Um die gefertigten Glasbehälter vor Beschädigungen während des Verpackens zu schützen, wird deren Oberfläche im Zuge der Kaltendvergütung mit Schmiermitteln benetzt. Diese sorgen dafür, dass die Glasbehälter besser aneinander vorbeigleiten und gut durch die Führungen der anschließenden Qualitätskontrollmaschinen gleiten, ohne eine Beschädigung der Oberfläche zu erhalten. Die Schmiermittel sind lebensmittelechte, auf Ölsäure oder Polyethylen basierende, Produkte und werden meist in Form einer verdünnten wässrigen Suspension auf die Oberflächen aufgesprüht. [13]

Im Glas enthaltene Spannungen können sehr einfach über die direkt messbare Doppelbrechung dargestellt werden. Die sogenannte Spannungsdoppelbrechung in einem festen Körper ist eigentlich eine Doppelbrechung infolge anisotroper Dehnung in den zwei zur Durchstrahlungsrichtung senkrechten Richtungen. Es ergibt sich damit, infolge des Einflusses der Querkontraktion, eine Abhängigkeit der optischen Weglänge für die verschiedenen Schwingungsrichtungen von den drei Hauptnormalspannungen. Ein linear polarisierter Lichtstrahl durchläuft demnach den Glasbehälter schneller, wenn aufgrund von Spannungen die optische Weglänge verkürzt wird. Aus dem resultierenden Gangunterschied zwischen einem durch die Probe laufenden Lichtstrahl und einem durch ein spannungsloses Glas laufenden Lichtstrahl, kann auf Spannungen im Glasbehälter geschlossen werden. Die Spannung ist dabei über einen spannungsoptischen Koeffizienten direkt proportional zur Doppelbrechung. [14]

Im Zuge der Qualitätskontrolle werden alle Flaschen auf enthaltene Spannungen und deren Abmessungen optisch überprüft. Dazu werden sie durch mehrere Kontrollmaschinen geleitet, die den Glasbehälterboden, die Seitenflächen und gegebenenfalls den Flaschenhals kontrollieren. Glasbehälter die nicht den Qualitätsanforderungen genügen werden ausgemustert und über Förderbänder und Scherbenbrecher dem Prozess in Form von Prozessscherben wieder zugeführt. Nach der Qualitätskontrolle werden die Glasbehälter auf Paletten verpackt und ausgeliefert.

Da der Energieverbrauch der Aggregate im kalten Ende sehr gering ist wird das kalte Ende in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

3.1.8 Querschnittsprozesse

Die gesamte für den Produktionsprozess erforderliche Druckluft wird zentral bereitgestellt. **Tabelle 3-VII** zeigt eine Übersicht der bei Stölzle Oberglas eingesetzten Kompressoren. Aufgrund der höheren Effizienz wird die Druckluft mit 4 bar in erster Linie von den drei Turbokompressoren von Atlas Copco bereitgestellt. Die von den Turbokompressoren abgegebene Wärme wird über eine Wasserrückkühlung am Dach des Aufstellungsortes an die Umgebung abgegeben.

Tabelle 3-VII: Übersicht Druckluftkompressoren

Bez.	Hersteller	Type	Druck [bar]	Art	Kühlung	Baujahr	Motorleistung [kW]
K 4.1	Atlas Copco	ZH10000+	4	Turbo	Wasser	2014	670
K 4.2	Atlas Copco	ZH10000+	4	Turbo	Wasser	2013	670
K 4.3	Atlas Copco	ZH10000+	4	Turbo	Wasser	2013	670
K 4.4	Kaeser	GS 580	4	Schrauben	Wasser	2003	315
K 4.5	Kaeser	FSD 571	4	Schrauben	Luft	2008	255
K 4.6	Kaeser	FSD 571 SFC	4	Schrauben	Luft	2008	255
K 8.1	Kaeser	ESD 352 SFC	8	Schrauben	Luft	2013	200
K 8.2	Kaeser	DSDX 302	8	Schrauben	Luft	2013	160
K 8.3	Kaeser	ESB 300	8	Schrauben	Wasser	1992	160

Die Entfeuchtung der komprimierten Luft wird über Kältetrockner bewerkstelligt. Die bei Stölzle Oberglas verwendeten Kältetrockner sind in **Tabelle 3-VIII** aufgelistet.

Tabelle 3-VIII: Übersicht Kältetrockner

Bez.	Hersteller	Type	Druck [bar]	Kühlung	Baujahr	Leistung [kW]
T 4.1	Atlas Copco	FD4000 VSD	4	Wasser	2013	27,9
T 4.2	Atlas Copco	FD4000 VSD	4	Wasser	2013	27,9
T 4.3	Atlas Copco	FD4000 VSD	4	Wasser	2013	27,9
T 4.4	Kaeser	TI 901 W	4	Wasser	2014	9,7
T 4.5	Kaeser	TI 901	4	Luft	2012	11,5
T 8.1	Kaeser	TI 751	8	Luft	2013	9,4
T 8.2	Kaeser	TI 751	8	Luft	2013	9,4
T 8.3	Kaeser	TH451W	8	Wasser	2017	5,6

In einem geringen Maß ist auch Unterdruck für die Produktion der Glasbehälter notwendig. Die Vakuumpumpen, die diesen bereitstellen, sind in **Tabelle 3-IX** dargestellt.

Tabelle 3-IX: Übersicht Vakuumpumpen

Bez.	Hersteller	Type	rel. Druck [bar]	Kühlung	Baujahr	Leistung [kW]
V 1	Busch	1600-216	-0,8	Wasser	1991	30
V 2	Busch	RC1600 B4Z1 EOZZ	-0,8	Wasser	1991	30
V 3	Busch	1600-216	-0,8	Wasser	1991	30
V 4	Demag Wittig	WPSO644	-0,8	Wasser	1980	71,2

3.2 Energieströme

In diesem Kapitel werden die Stoff- und Energieströme für jedes Aggregat dargestellt. Die einzelnen Aggregate wurden in Form einer Blackbox und die Stoff- und Energieströme in Form von Pfeilen dargestellt. So wurde ein Bild des ganzen Prozesses entworfen und schon in **Abbildung 3-2** vorgestellt. Jedem Strom ist eine eindeutige Kennzahl, bestehend aus Buchstaben und Nummern, zugeordnet. Ein Farbsystem erleichtert die Identifizierung des Stroms. **Abbildung 3-25** zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Ströme, die verwendet wurden.



Abbildung 3-25: Legende Ströme

In den folgenden Kapiteln werden nun die einzelnen Aggregate und ihre Ströme erklärt. Da viele Aggregate im Gesamtprozess sehr ähnlich sind, werden pro Kapitel immer nur eine Linie und Linien in denen es Abweichungen gibt beschrieben. Die Bezeichnung der Ströme der anderen Linien sind aus **Abbildung 3-2** zu entnehmen.

3.2.1 Gemengehaus

Das Gemengehaus wurde mit Hilfe von zwei Aggregaten dargestellt, wie in **Abbildung 3-26** ersichtlich. Rohstofflager beschreibt die Gemengesilos und Rohstofftransport beschreibt den gesamten Gemenge- und Scherbenentransport im Werk.

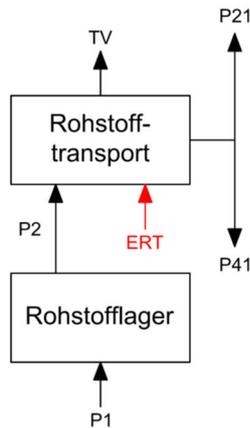


Abbildung 3-26: Ströme Gemengehaus

Der Stoffstrom P1 entspricht den angelieferten Rohstoffen. Auch wenn die Anlieferungen diskontinuierlich anfallen, kann der Strom als kontinuierlich, auf Basis der Tonnagen der Schmelzwannen, angenommen werden. Da die meisten LKWs über eine eigene Druckluftanlage zur pneumatischen Förderung der Rohstoffe in die Silos verfügen, wird im Rohstofflager auf einen Strom mit Druckluft verzichtet. Unter dem Aggregat Rohstofftransport sind sämtliche Förderbänder, Waagen, Mischer, Elevatoren, Kratzförderer und Rüttelrinnen zusammengefasst. Die gesamte elektrische Energie, die von diesen Aggregaten verbraucht wird, ist im Strom ERT dargestellt. Der Strom TV beschreibt die Transportverluste über den gesamten Gemengeweg. P21 und P41 entsprechen den zu der jeweiligen Glaswanne transportierten Rohstoffmengen.

3.2.2 Glaswannen

Wie in **Abbildung 3-27** ersichtlich benötigen die Glaswannen drei Kühlventilatoren, zwei Verbrennungsluftventilatoren und einen Regenerator als unterstützende Aggregate.

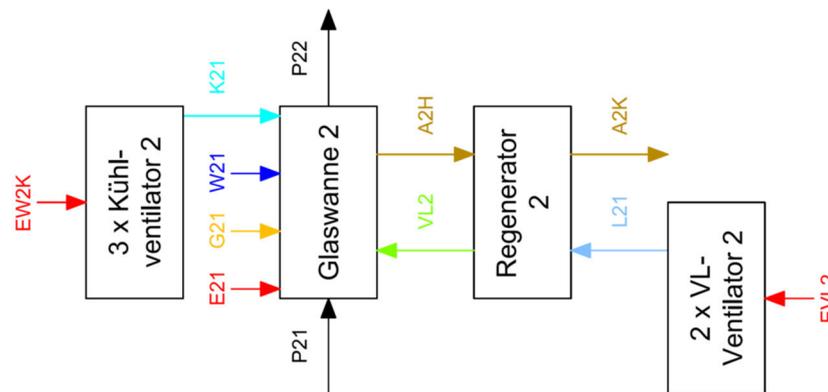


Abbildung 3-27: Ströme Glaswanne 2

Die Ventilatoren benötigen für ihren Betrieb elektrischen Strom. Der Regenerator zur Verbrennungsluftvorwärmung wird nur mit der im Abgas enthaltenen Hitze und ohne zusätzliche Energie von außen betrieben. Die Glaswanne wird mit Erdgas und mit elektrischem Strom beheizt. Die Ströme W21 und K21, die zur Kühlung von Elektroden und Glaswannenwand dienen, werden nur mit einem Pfeil in die Glaswanne dargestellt, obwohl das Kühlmedium auch wieder hinaus fließt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird hier allerdings auf die Pfeile aus der Glaswanne hinaus verzichtet. Es soll hier lediglich ein Energiefluss dargestellt werden. Der Produktstrom P22 beschreibt die aus der Glaswanne fließende Glasschmelze.

3.2.2.1 Abgaszug

Der gesamte Abgaszug ist in **Abbildung 3-14** dargestellt. In der „Luftquenche“ wird Frischluft LK mit dem Abgasstrom AG1 gemischt um dessen Temperatur zu senken. Das unter die maximale Betriebstemperatur des Elektrofilters abgekühlte Abgas wird anschließend durch diesen geführt. Der Elektrofilter benötigt elektrische Energie und Druckluft zum Abreinigen der Niederschlagselektroden. Das entstaubte Abgas wird über einen Wärmeübertrager geleitet und gibt dort Wärme an den kalten Wasserstrom KWT ab. Der erwärmte Wasserstrom WWT wird zur Fernwärmeübergabestation geleitet, wo die Wärme ins Fernwärmenetz Köflach eingespeist wird. Da das Abgas noch immer eine gewisse Staubkonzentration beinhaltet, werden die Übertragerrohre periodisch mit Druckluft gespült um Anpackungen zu vermeiden. Der für den Abgasstrom notwendige Unterdruck wird von zwei Abgasventilatoren zur Verfügung gestellt.

3.2.3 Arbeitswannen

Die aus der Glaswanne herausfließende Glasschmelze wird in der Arbeitswanne auf die einzelnen Feeder verteilt. **Abbildung 3-28** zeigt das Prozessbild der Arbeitswanne 2.

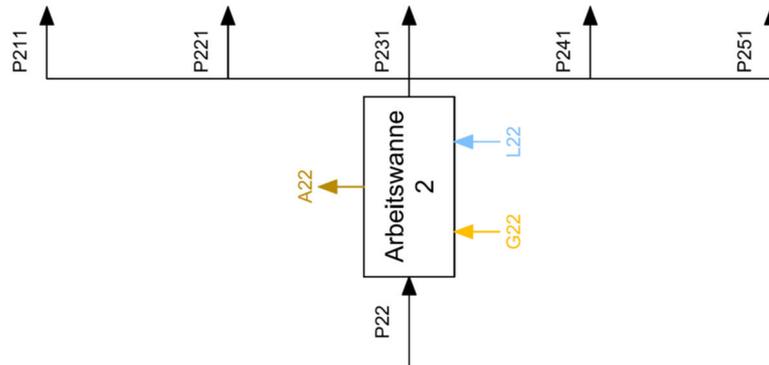


Abbildung 3-28: Ströme Arbeitswanne 2

Die Produktströme P211 - P251 bezeichnen die Glasschmelze zu den Feedern 21 - 25. Damit die Temperatur der Glasschmelze nicht sinkt, wird mit einem Erdgas-Luft-Gemisch zugeheizt. Der Abgasstrom A22 entweicht in die Produktionshalle.

3.2.4 Feeder

In **Abbildung 3-29** ist der Feeder der Linie 21 dargestellt. Auch hier wird, wie bei der Arbeitswanne, mit einem Erdgas-Luft-Gemisch zugeheizt und das Abgas ebenfalls in die Produktionshalle geführt.

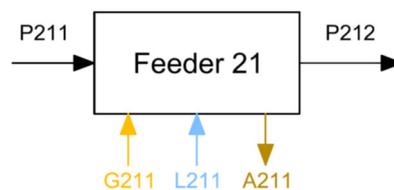


Abbildung 3-29: Ströme Feeder 21

3.2.5 IS-Maschinen

Bei den IS-Maschinen muss man zwischen IS-Maschinen mit und ohne Vertiflow unterscheiden. **Abbildung 3-30** zeigt die IS-Maschine der Linie 21 mit Vertiflow und der Linie 23 ohne Vertiflow.

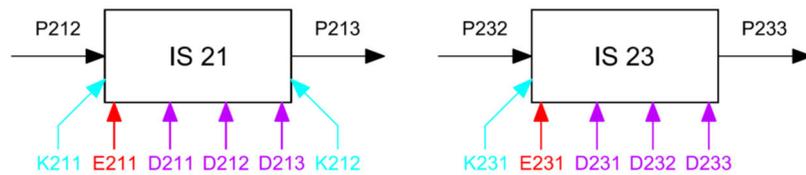


Abbildung 3-30: Ströme IS-Maschine 21 und 23

Bei den Linien 22, 41 und 44 wird ebenfalls das System Vertiflow angewandt. Es treten dort die gleichen Ströme wie bei Linie 21 auf. Vertiflow wird durch den Kühlluftstrom rechts am Aggregat dargestellt. Bei den restlichen Linien treten die Ströme der Linie 23 auf. Der Kühlluftstrom links am Aggregat stellt die Formenkühlung dar. Die Kühlluft von Formenkühlung und Vertiflow wird von Ventilatoren bereitgestellt, die elektrische Energie konsumieren. Die elektrische Energie an der IS-Maschine dient ausschließlich dem Betrieb der Steuerung der IS-Maschinen. Die beweglichen Teile der IS-Maschinen werden über Druckluftaktoren betätigt. Des Weiteren wird Druckluft zum Blasen der Glasbehälter benötigt. Der Druckluftverbrauch wird von den drei violetten Strömen repräsentiert. Von links nach rechts stellen sie den Verbrauch von Druckluft mit 4 bar, 8 bar und Vakuum dar. Die gefertigten Glasbehälter werden von dem austretenden Produktstrom beschrieben.

3.2.6 Transport

In **Kapitel 3.1.5** wurde der Transport der Glasbehälter zum Kühllofen im Detail beschrieben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die fünf Einzelaggregate zu einem Aggregat Transport zusammengefasst. Da die Verbräuche der atmosphärischen Erdgasflammen sehr gering sind, wurde auf den Erdgasstrom verzichtet. Die übrig gebliebenen Ströme sind in **Abbildung 3-31** dargestellt.

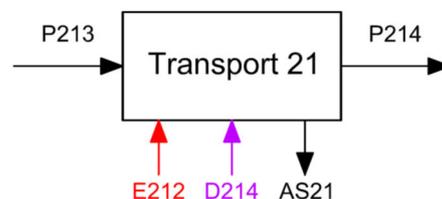


Abbildung 3-31: Ströme Transport 21

Die elektrische Energie wird zum Betrieb der Förderbänder und die Druckluft für das Ausblasen verunreinigter Behälter benötigt. Der Strom AS21 beschreibt den Massen- und Energieverlust durch die wegen Verunreinigungen ausgeblasenen heißen Glasbehälter.

3.2.7 Kühlöfen

Der Kühlofen der Linie 21 ist in **Abbildung 3-32** dargestellt. Mit der elektrischen Energie werden das Förderband und die Ventilatoren an der Oberseite des Kühlofens betrieben. Die benötigte Temperatur im Ofen wird durch Heizen mit einem Erdgas-Luft-Gemisch erreicht. Das dabei entstehende Abgas entweicht in die Halle. Die Glasbehälter die aus dem Kühlofen austreten werden im Kalten Ende veredelt, überprüft, verpackt und versendet.

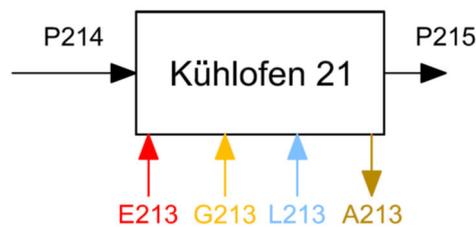


Abbildung 3-32: Ströme Kühlofen 21

3.3 Energieverbrauch des heißen Endes

Anhand der vorhandenen Strom- und Gaszählerdaten wird hier der Energieverbrauch des Glasherstellprozesses analysiert. Diese Analyse liefert jedoch keine Aussage über die Energieeffizienz der Aggregate. Es werden lediglich die Energieflüsse von Strom und Erdgas dargestellt.

3.3.1 Elektrischer Energieverbrauch

Im Zeitraum Februar 2018 bis August 2018 wurden im heißen Ende durchschnittlich 4,0 GWh elektrische Energie pro Monat verbraucht. Die Aufschlüsselung welcher Anteil des Gesamtverbrauchs an elektrischer Energie auf welche Aggregate fällt, ist in **Abbildung 3-33** dargestellt.

Im Gemengehaus wird die elektrische Energie zum Betrieb von Waagen, Mischer, Förderbändern und Elevatoren verwendet. Der Verbrauch ist verhältnismäßig gering.

In der Position Glaswanne ist jeweils der Verbrauch der elektrischen Zusatzheizung und der Ventilatoren zur Wannenkühlung zusammengefasst. Zusätzlich kann auch der Betrieb des Rauchgasventilators und des Elektrofilters, beides in der Position Rauchgasweg zusammengefasst, zum Glasschmelzprozess zugeordnet werden. Damit werden rund 34,1 % des Gesamtbedarfs an elektrischer Energie für die Produktion der Glasschmelze benötigt.

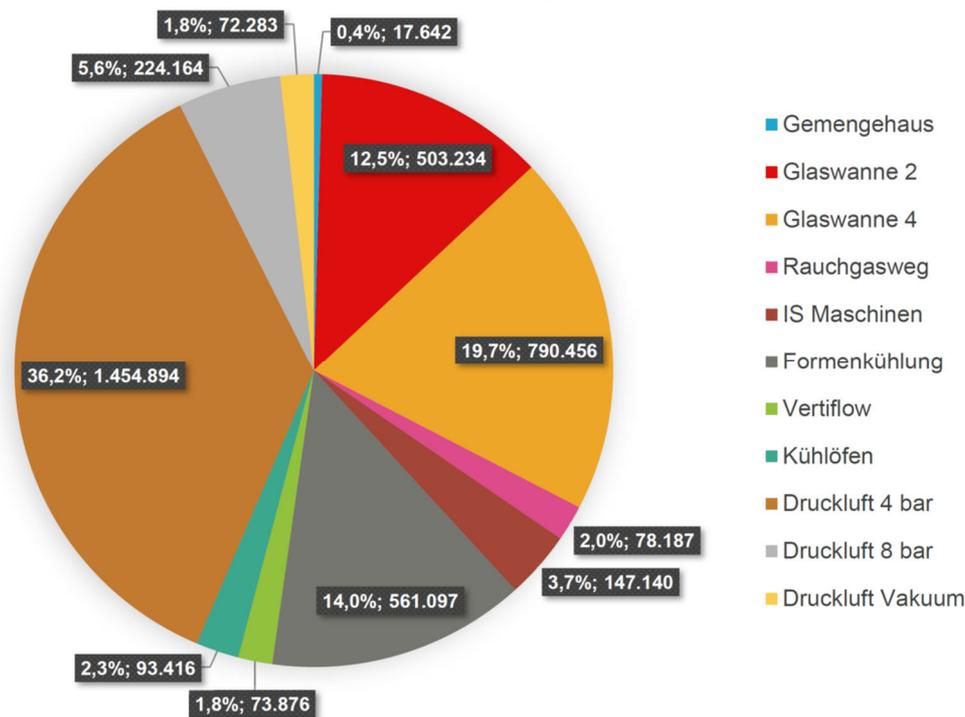


Abbildung 3-33: Durchschnittlicher elektrischer Energieverbrauch [kWh/Monat]

In der Position IS-Maschinen sind auch die Verbräuche der Aggregate hinter den IS-Maschinen, die die Glasbehälter zum Kühllofen befördern, enthalten. Außerdem benötigen die IS-Maschinen Kühlluft zur Kühlung der Formen. Die elektrischen Energieverbräuche der Ventilatoren, die diese Kühlluft zur Verfügung stellen, sind in den Positionen Formenkühlung und Vertiflow dargestellt. Werden die drei Positionen zusammengefasst ergibt sich ein Anteil von 19,5 % des elektrischen Gesamtenergiebedarfs für die Formgebung der Glasbehälter.

Der elektrische Energiebedarf der Kühlöfen ist relativ gering und macht nur 2,3 % des Gesamtbedarfs an elektrischer Energie aus.

Die meiste elektrische Energie wird für die Bereitstellung von Druckluft benötigt. 43,6 % des Gesamtbedarfs an elektrischer Energie werden dafür aufgewendet, wobei die Bereitstellung der Druckluft mit 4 bar mit 36,2 % des Gesamtbedarfs den größten Anteil ausmacht.

3.3.2 Erdgasverbrauch

In **Abbildung 3-34** ist der durchschnittliche Erdgasverbrauch der Aggregate des heißen Endes bei Stölzle Oberglas im Betrachtungszeitraum von Februar 2018 bis August 2018 abgebildet. Im Durchschnitt wurden in diesem Zeitraum pro Monat 1,54 Mio. Nm³ Erdgas verbraucht.

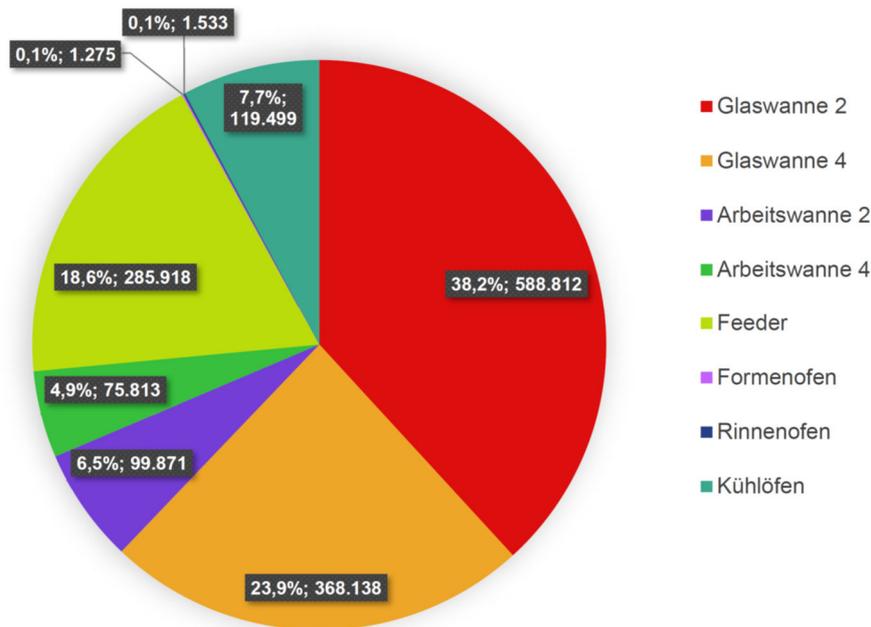


Abbildung 3-34: Durchschnittlicher Erdgasverbrauch [Nm³/Monat]

Am meisten Erdgas wird für das Produzieren und Verteilen der Glasschmelze benötigt. Der Weg vom Aufschmelzen der Rohstoffe bis zur Verteilung an die IS-Maschinen, über Arbeitswannen und Feeder, verbraucht mit 1,42 Mio. Nm³ Erdgas pro Monat im Schnitt 92,1 % des Gesamtbedarfs des heißen Endes. Der Erdgasverbrauch der Feeder wird nur gesammelt für alle zehn Linien erfasst.

Die Aggregate Formenofen und Rinnenofen sind indirekt für die Funktion der IS-Maschinen notwendig. Der Formenofen wird zur Vorwärmung der Formen der IS-Maschinen verwendet. Das ist notwendig, um die Formen vor Beschädigung durch zu große Temperaturunterschiede zwischen Form und Glastropfen zu schützen. Im Rinnenofen werden die Rinnen, die zur Verteilung der Glastropfen zu den einzelnen Stationen der IS-Maschinen benötigt werden, von etwaigen Glasresten gereinigt. Der Verbrauch beider Aggregate ist vernachlässigbar klein.

Die Kühlöfen haben neben Schmelzwannen, Arbeitswannen und Feedern einen relativ hohen Erdgasverbrauch. Wie bei den Feedern wurde auch hier lange Zeit nur der Gesamtverbrauch aller Kühlöfen erfasst. In den letzten Monaten wurden weitere Gaszähler installiert und die Einzelverbräuche der Kühlöfen erfasst. Für den Zeitraum von Mai 2018 bis August 2018 liegen Verbrauchsdaten aller Kühlöfen vor. Die Ergebnisse der Erfassung sind in **Tabelle 3-X** dargestellt. Die Summe der Einzelerfassungen und der Wert der Gesamterfassung des Erdgasverbrauchs aller Kühlöfen zeigt mit im Mittel eine Abweichung 3,5 %.

Tabelle 3-X: Erdgasverbrauch Kühltöfen

Linie	Erdgasverbrauch [Nm ³]					
	Mai 18	Jun 18	Jul 18	Aug 18	Durchschnitt	Anteil
Kühlofen 21	11.760	14.218	11.851	12.448	12.569	10,3%
Kühlofen 22	11.388	11.156	10.581	11.828	11.238	9,2%
Kühlofen 23	12.373	13.818	14.399	14.069	13.665	11,2%
Kühlofen 24	13.154	14.542	14.553	16.913	14.791	12,1%
Kühlofen 25	9.976	9.787	10.106	10.463	10.083	8,3%
Kühlofen 40	14.983	14.059	14.678	13.795	14.379	11,8%
Kühlofen 41	10.774	8.665	9.719	8.223	9.345	7,7%
Kühlofen 42	12.837	12.206	11.482	11.568	12.023	9,9%
Kühlofen 43	8.522	8.123	8.192	9.096	8.483	7,0%
Kühlofen 44	15.397	16.099	17.042	12.345	15.221	12,5%
Summe Einzelerfassung	121.164	122.673	122.603	120.748	121.797	100,0%
Gesamterfassung aller KÖ	125.829	128.413	126.281	124.370	126.223	-
Abweichung relativ	3,7%	4,5%	2,9%	2,9%	3,5%	-

Die Aufstellung zeigt, dass Kühltöfen 43 mit 7,0 % des durchschnittlichen Gesamtbedarfs der Kühltöfen am wenigsten Erdgas verbraucht. Am meisten Erdgas verbraucht Kühltöfen 44 mit 12,5 % des durchschnittlichen Gesamtbedarfs der Kühltöfen. Im August wurde in diesem Kühltöfen die Temperatur im Mittel um 7 °C pro Zone gesenkt. Diese Senkung spiegelt sich im fast um 25 % gesunkenen Bedarf im Vergleich zu den drei Monaten davor wider.

3.3.3 Gesamtverbrauch

Köflach befindet sich in der Regelzone Ost, in der laut Abrechnung des Gasnetzbetreibers der Energieinhalt des Erdgases 11,3 kWh/Nm³ beträgt. Mit dem Energieinhalt des Erdgases kann der Gesamtenergiebedarf berechnet werden. Durchschnittlich wurden im Zeitraum von Februar 2018 bis August 2018 im heißen Ende pro Monat 21,4 GWh Energie in Form von Erdgas und elektrischer Energie verbraucht, wobei rund 80 % der Energie in Form von Erdgas verbraucht wurden. **Abbildung 3-35** zeigt die Aufteilung der verbrauchten Energie auf die einzelnen Aggregate.

Die Glasschmelzwannen stellen mit 56,5 % des Gesamtenergiebedarfs den größten Verbraucher im heißen Ende dar. Aufgrund des hohen Energieinhalts des Erdgases ist die Glasverteilung, mit Arbeitswannen und Feeder, der nächstgrößere Verbraucher. Für die Verteilung der Glasschmelze werden 24,4 % des Gesamtenergiebedarfs aufgebracht. Andere große Verbraucher sind die Aggregate zur Bereitstellung der Druckluft mit 8,1 % und die Kühltöfen mit 6,7 % des Gesamtenergiebedarfs. Da schon kleine Energieeinsparungen bei

großen Verbrauchern einen großen Einfluss auf die Energieeffizienz der gesamten Produktion haben, wird empfohlen besonderes Augenmerk auf mögliche Maßnahmen zur Energieeinsparung in den eben genannten Bereichen zu lenken.

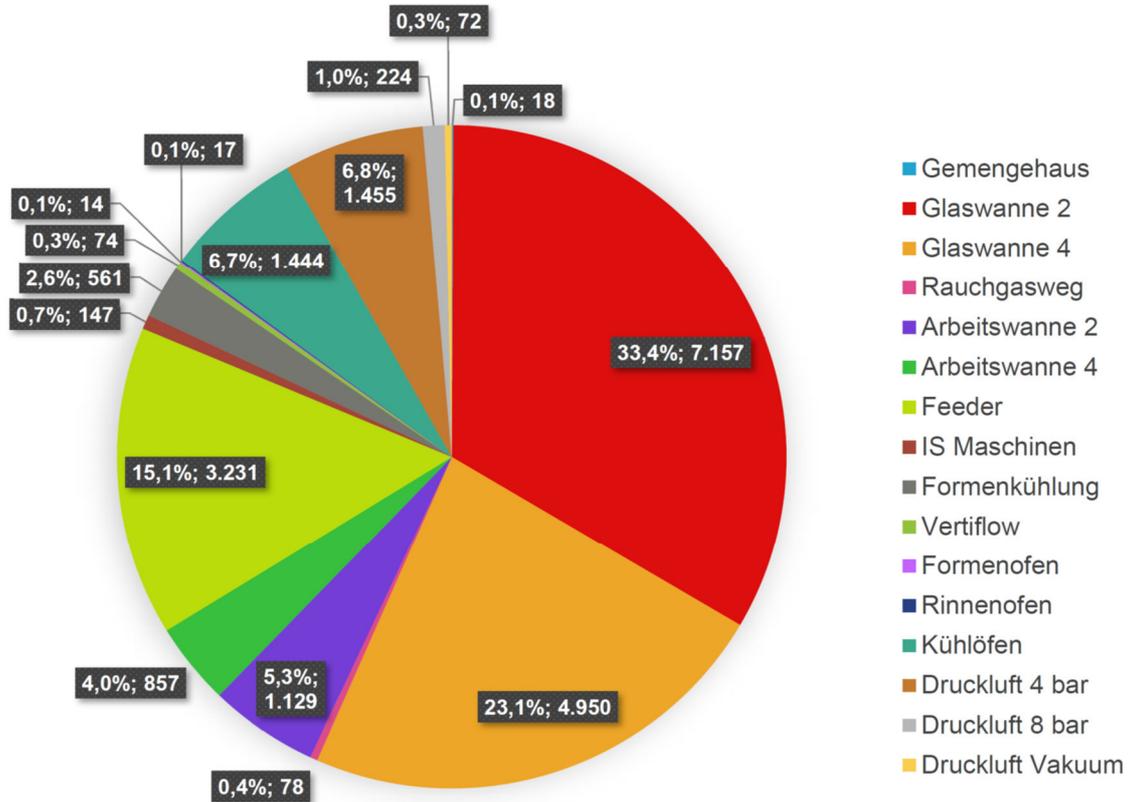


Abbildung 3-35: Durchschnittlicher Gesamtenergieverbrauch [MWh/Monat]

3.3.4 Glaswannen

Da die beiden Glaswannen die größten Verbraucher darstellen wurde ihr Energiebedarf, auf Basis der an jedem Tag um 06:00 Uhr aufgezeichneter Daten, analysiert. Um zu überprüfen ob der Energieeinsatz einer jahreszeitlichen Schwankung unterliegt, wurde der Betrachtungszeitraum von Jänner 2017 bis August 2018 gewählt. **Abbildung 3-36** zeigt, dass der Erdgasverbrauch der Glaswanne 2 in erster Linie von der Tagedestonung abhängig ist und somit keinen jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. Der Verbrauch schwankt, je nach Auftragslage zum Teil sehr stark. Man erkennt auch, dass die Tonnage im Schnitt ab Februar 2018 (rote Linie), bedingt durch das Wegfallen einer Produktionslinie, gesunken ist.

Die Energiezufuhr der elektrischen Zusatzheizung ist um fast das Zehnfache geringer als die Energiezufuhr über Erdgas. Wie der Erdgasverbrauch ist der Stromverbrauch hauptsächlich von der Tonnage abhängig. Die Korrelation des Scherbenanteils mit dem Stromverbrauch kommt aus der Betriebsweise der Glaswanne. Wird eine höhere Tonnage als

am Vortag gefahren, wird ein höherer Scherbenanteil eingesetzt, da die Scherben weniger Energie zum Aufschmelzen benötigen als die Rohstoffe. So wird versucht den erhöhten Energiebedarf durch Tonnagensprünge abzufedern.

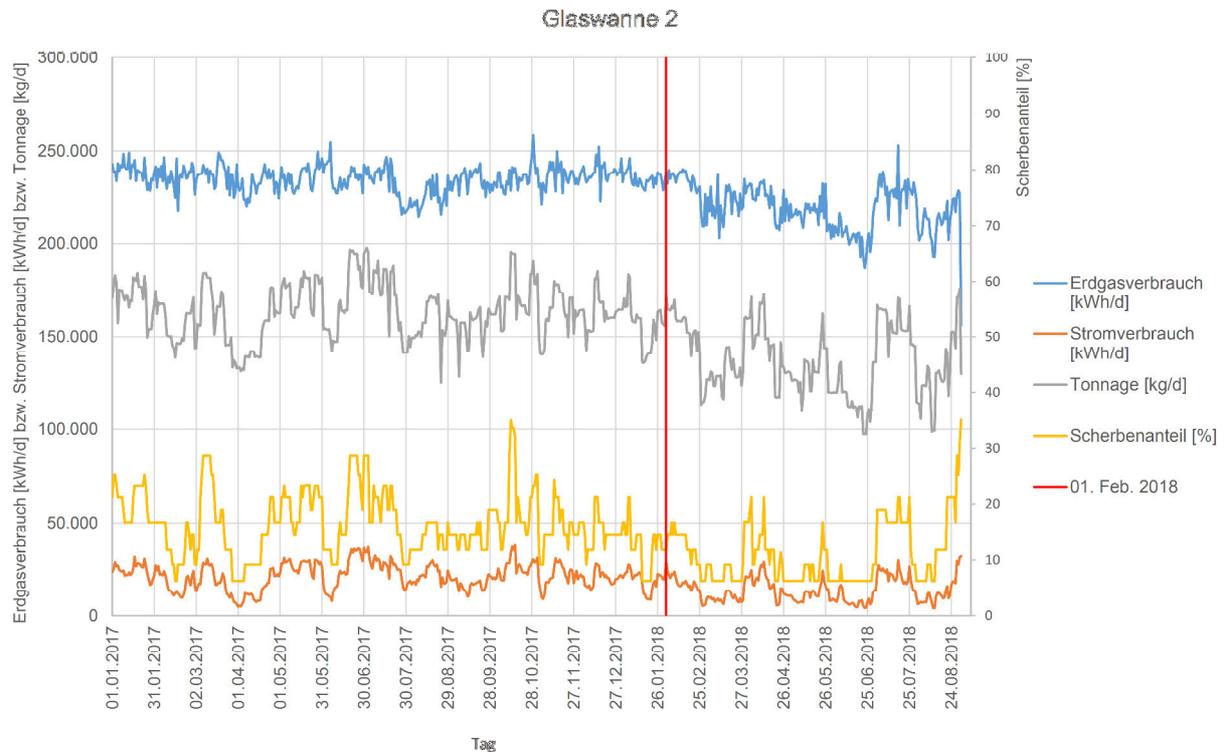


Abbildung 3-36: Energieverbrauch Glaswanne 2

Auch bei Glaswanne 4 ist der Erdgasverbrauch in erster Linie von der Tages tonnage abhängig, wie in **Abbildung 3-37** ersichtlich. Hier zeigt sich ein Anstieg der durchschnittlichen Tonnage ab Februar 2018, als mit Linie 40 eine zusätzliche Produktionslinie in Betrieb ging. Der Energieverbrauch der elektrischen Zusatzheizung ist relativ konstant. Der Scherbeneinsatz ist bei Glaswanne 4, die Braun- und Grünglas produziert, um einiges höher als bei Glaswanne 2, die Weißglas produziert. Das liegt daran, dass bei Weißglas mehr auf die Reinheit der Scherben geachtet werden muss als bei Braun- oder Grünglas. Kleine Verunreinigungen haben bei Weißglas einen viel größeren Einfluss auf die Farbe des Endprodukts.

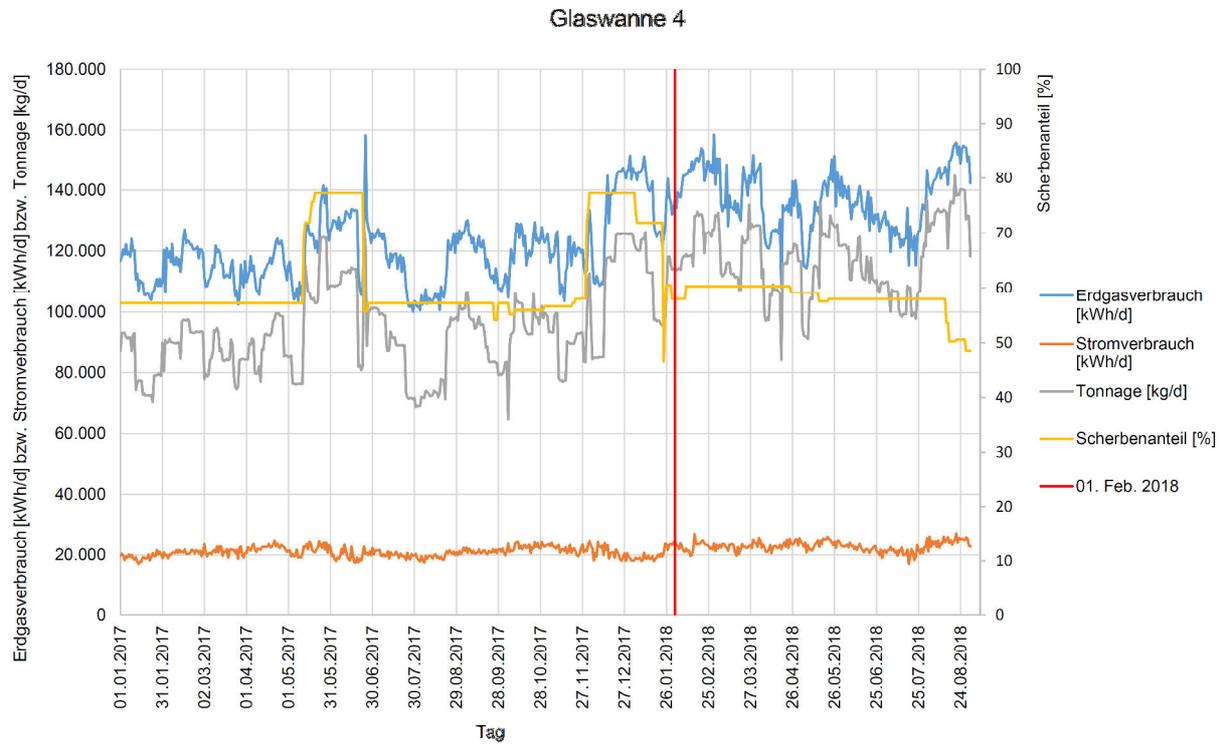


Abbildung 3-37: Energieverbrauch Glaswanne 4

4 Energiebetrachtung des heißen Endes

Nach der Darstellung des Stands der Technik bei Stölzle Oberglas wird in den folgenden Kapiteln auf die Erstellung der Energiebilanz, nutzbare Abwärmepotentiale und die Berechnung dieser eingegangen.

4.1 Berechnungsgrundlage

In diesem Kapitel werden die in der Arbeit verwendeten Gleichungen und die Herangehensweise bei den durchgeführten Berechnungen vorgestellt.

4.1.1 Bilanzierung von Energieströmen

Bei einer Energiebilanz werden die in ein Aggregat hinein und hinaus fließenden Energie- oder Leistungsströme gegenübergestellt. Mit der Energiebilanz ist es möglich den Energieverbrauch des Aggregates zu analysieren und Einsparpotentiale ausfindig zu machen. Des Weiteren wird im Zuge der Erstellung der Energiebilanz festgestellt, in welcher Form die Energie in das Aggregat eingebracht wird.

Der erste Schritt für die Energiebilanz, das Identifizieren der Energieströme, erfolgte schon in **Kapitel 3.2**. Nun muss die Quantität dieser Energieströme festgestellt werden. Dafür werden vier Formen von Energieströmen unterschieden:

- chemische Energieströme
- Stoffströme

- Kühlströme
- elektrische Energieströme

Der Energieeintrag über Erdgas wird zu den chemischen Energieströmen gezählt. Die eingebrachte Leistung wird über den Massenstrom und dem Heizwert von Erdgas nach **Gleichung 4-1** berechnet.

$$\dot{Q} = \dot{m} * H_u \quad (4-1)$$

Zu den Stoffströmen zählen die eingebrachten Rohstoffe, die Glasschmelze, die gefertigten Glasbehälter und Verbrennungsluft-, Luft- oder Abgasströme mit einer Temperaturdifferenz zur Umgebung. Ihr Leistungseintrag wird aus dem Massenstrom, der mittleren spezifischen Wärmekapazität und der Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur des Stoffstroms nach **Gleichung 4-2** berechnet.

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_{p,m} * (T - T_U) \quad (4-2)$$

Kühlströme treten in den Aggregaten Glaswanne und IS-Maschine auf. Ihr Leistungseintrag berechnet sich, wie aus **Gleichung 4-3** zu entnehmen, aus dem Massenstrom, der mittleren spezifischen Wärmekapazität und der Temperaturdifferenz des ein- und austretenden Kühlstroms.

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_{p,m} * (T_{Aus} - T_{Ein}) \quad (4-3)$$

Der vierte Energiestrom stellt den Energieeintrag durch elektrische Energie dar. Im Allgemeinen wird der elektrische Energieverbrauch mit Stromzählern erfasst. Der mittlere Leistungseintrag in ein Aggregat berechnet sich mit dem Energieverbrauch während einer bestimmten Zeitspanne durch diese Zeitspanne:

$$P = \frac{W_{el}}{t} \quad (4-4)$$

Wenn alle Leistungsströme eines Aggregats quantifiziert sind, können die Leistungsströme, die in das Aggregat fließen, jenen, die aus dem Aggregat fließen, gegenübergestellt werden. Die Differenz wird als Verlust deklariert und kann zum Beispiel in Form von abgestrahlter Wärme oder in Form von Bewegungsenergie, die in Wärme umgewandelt wird, vorliegen.

4.1.2 Berechnung der spezifischen Wärmekapazität von Abgasen

Die spezifische Wärmekapazität ist im Allgemeinen temperaturabhängig und kann in verschiedenen Literaturquellen für bestimmte Temperaturen entnommen werden. Wird in dieser Arbeit von der spezifischen Wärmekapazität gesprochen, ist immer von der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck die Rede. **Abbildung 4-1** zeigt die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck von ausgewählten idealen Gasen Temperaturbereich von -250 - 2000 °C.

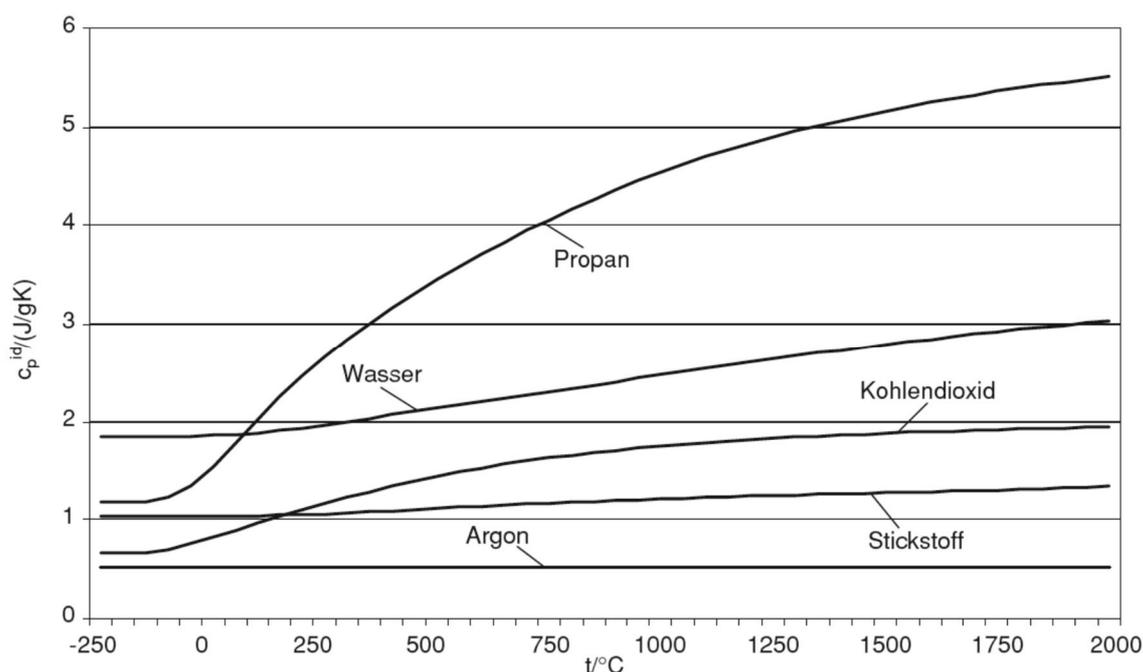


Abbildung 4-1: Typischer Verlauf der spezifischen Wärmekapazität idealer Gase [16]

Die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von idealen Gasen kann durch die Verwendung der sogenannten PPDS-Gleichung erfolgen: [16]

$$c_p = R_i \left[B + (C - B) \left(\frac{T}{A + T} \right)^2 \left[1 - \frac{A}{A + T} \left(D + E \frac{T}{A + T} + F \left(\frac{T}{A + T} \right)^2 + G \left(\frac{T}{A + T} \right)^3 \right) \right] \right] \quad (4-5)$$

R_i bezeichnet die spezifische Gaskonstante eines Gases. Sie berechnet sich aus der universellen Gaskonstante R mit 8,314 J/(mol K), und der Molmasse MM_i des Gases:

$$R_i = \frac{R}{MM_i} \quad (4-6)$$

Die Werte der Koeffizienten A-G und die Molmassen der Hauptbestandteile von Abgasen können aus **Tabelle 4-1** entnommen werden.

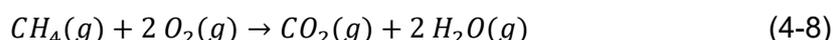
Tabelle 4-I: Daten zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität idealer Gase [16]

Gas	Koeffizienten zur c_p -Wert-Berechnung							Molmasse [kg/kmol]
	A	B	C	D	E	F	G	
CH ₄	1530,8043	4,2038	-16,615	-3,5668	43,0563	-86,5507	65,5986	16,04
O ₂	2122,2098	3,5302	-7,1076	-1,4542	30,6057	-83,6696	79,4375	31,9988
N ₂	432,2027	3,5160	2,8021	-4,1924	42,0153	-114,2500	111,1019	28,01348
Ar	0,0000	2,5000	2,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	39,95
CO ₂	514,5073	3,4923	-0,9306	-6,0861	54,1586	-97,5157	70,9687	44,0098
H ₂ O	706,3032	5,1703	-6,0865	-6,6011	36,2723	-63,0965	46,2085	18,015275

Die spezifische Wärmekapazität eines Gemisches idealer Gase wird mit Hilfe des Massenbruchs der einzelnen Bestandteile berechnet: [16]

$$c_{p,Gem} = \sum_i \frac{m_i}{m_{ges}} c_{p,i} \quad (4-7)$$

Die Massen der einzelnen Bestandteile des Abgases, das pro Monat von Arbeitswannen und Feeder ausgestoßen wird, werden über den Erdgasverbrauch pro Monat, die Verbrennungsrechnung und die Sauerstoffbilanz über die Gasmischstationen berechnet. Geht man davon aus, dass Erdgas zu 100 % aus Methan besteht, lautet die chemische Formel für die Verbrennung von Erdgas:



Daraus folgt, dass für die stöchiometrische Verbrennung von einem Mol Erdgas zwei Mole Sauerstoff benötigt werden. Es entstehen ein Mol Kohlenstoffdioxid und zwei Mole Wasser.

Die tatsächliche Menge der Verbrennungsluft ergibt sich bei Arbeitswannen und Feeder aus der Sauerstoffbilanz über die Gasmischstationen. Die Menge an Sauerstoff muss vor und nach der Gasmischstation gleich sein:

$$X_{O_2L} * V_L = X_{O_2M}(V_L + V_{CH_4}) \quad (4-9)$$

X_{O_2L} ist der Anteil an Sauerstoff in der Verbrennungsluft vor und X_{O_2M} der Anteil an Sauerstoff im Erdgas-Luft-Gemisch nach der Gasmischstation. Durch Umformen kann die Verbrennungsluftmenge V_L berechnet werden:

$$V_L = V_{CH_4} \frac{X_{O_2M}}{X_{O_2L} - X_{O_2M}} \quad (4-10)$$

Die Bestandteile der Verbrennungsluft mit denen die Berechnungen durchgeführt wurden können aus **Tabelle 4-II** entnommen werden.

Tabelle 4-II: Luftbestandteile [16]

Daten Luft	
Gas	Molanteil
N ₂	78,12%
Ar	0,92%
O ₂	20,96%

Für die Berechnung der Abgasmengen wird vorausgesetzt, dass es sich um ideale Gase bei Normbedingungen handelt. Die Umrechnung von Abgasvolumen in Abgasmasse erfolgt für jeden Bestandteil des Abgases mit der Molmasse und dem Molvolumen von 22,4 m³/kmol. Die Masse an Stickstoff im Abgas entspricht der Masse an Stickstoff die über die Verbrennungsluft eingebracht wird:

$$m_{N_2} = V_L * 0,7812 * \frac{MM_{N_2}}{22,4} \quad (4-11)$$

Selbiges gilt für die Masse an Argon im Abgas:

$$m_{Ar} = V_L * 0,0092 * \frac{MM_{Ar}}{22,4} \quad (4-12)$$

Die Masse an Kohlenstoffdioxid im Abgas ergibt sich aus der Verbrennungsgleichung von Erdgas. Demnach entsteht aus einem Mol Erdgas ein Mol Kohlenstoffdioxid. Zur Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass das gesamte Erdgas umgesetzt wird, auch wenn bei reduzierenden Verbindungen unterstöchiometrisch verbrannt wird.

$$m_{CO_2} = V_{CH_4} * \frac{MM_{CO_2}}{22,4} \quad (4-13)$$

Der im Abgas enthaltene Restsauerstoff wird über die Differenz des Sauerstoffgehalts im Erdgas-Luft-Gemisch und des Sauerstoffgehalts für eine stöchiometrische Verbrennung eines Erdgas-Luft-Gemisches von 19 % berechnet. Wird bei reduzierenden Bedingungen verbrannt, ergibt die Berechnung eine negative Masse, da noch Sauerstoff benötigt wird, um das restliche Erdgas umzusetzen. Zur Vereinfachung wird hier die Masse an Sauerstoff gleich Null gesetzt.

$$m_{O_2} = (V_L + V_{CH_4}) * (X_{O_2M} - 0,19) * \frac{MM_{O_2}}{22,4} \quad (4-14)$$

Die Masse an Wasser im Abgas setzt sich aus dem beim Verbrennungsvorgang entstandenen Wasser und dem Wasseranteil in der Verbrennungsluft zusammen. Nach der Verbrennungsgleichung von Erdgas entstehen bei der Verbrennung von einem Mol Erdgas zwei Mole Wasser.

$$m_{H_2O} = 2 * V_{CH_4} * \frac{MM_{H_2O}}{22,4} + V_L * \frac{MM_{Luft}}{22,4} * X_W \quad (4-15)$$

X_W ist die absolute Luftfeuchte in kg Wasser pro kg trockene Luft. Die Molmasse von trockener Luft beträgt 28,9586 kg/kmol. [16]

Die Bestimmung der Massen der einzelnen Bestandteile des Abgases der Glaswannen unterscheidet sich von der von Arbeitswannen und Feeder. Die Verbrennungsluft wird hier nicht zuvor mit dem Erdgas vermischt, sondern extra in die Glaswanne eingebracht. Darum wird die Verbrennungsluftmenge über den Luftüberschuss λ angegeben. Dieser bezeichnet das Verhältnis zwischen eingebrachter Luftmenge und der für die stöchiometrische Verbrennung notwendige Luftmenge:

$$\lambda = \frac{L}{L_{st\ddot{o}ch}} \quad (4-16)$$

Aus **Gleichung 4-8** folgt, dass für die stöchiometrische Verbrennung von einem Mol Erdgas zwei Mole Sauerstoff benötigt werden. Wie in **Tabelle 4-II** angegeben, enthält Luft 20,96 % Sauerstoff. So folgt für die Berechnung der Verbrennungsluftmenge:

$$V_L = \frac{2 * V_{CH_4}}{0,2096} * \lambda \quad (4-17)$$

Auch hier wird für die Berechnung der Abgasmengen vorausgesetzt, dass es sich um ideale Gase bei Normbedingungen handelt. Die Umrechnung von Abgasvolumen in Abgasmasse erfolgt für jeden Bestandteil des Abgases mit der Molmasse und dem Molvolumen. Die Massen an Stickstoff, Argon, Kohlenstoffdioxid und Wasser im Abgas werden nach **Gleichung 4-11** bis **Gleichung 4-13** und **Gleichung 4-15** berechnet. Für die Berechnung der Masse an Restsauerstoff im Abgas wird folgende Beziehung verwendet:

$$m_{O_2} = 2 * V_{CH_4} * (\lambda - 1) * \frac{MM_{O_2}}{22,4} \quad (4-18)$$

Die Abgase der beiden Glaswannen werden in einem Sammelkamin zusammengeführt. Die spezifische Wärmekapazität des Abgases im Sammelkamin, nach der Mischung der Abgase von Wanne 2 und Wanne 4, wird nach **Gleichung 4-7** bestimmt. Bilanziert man die Energie der Abgasströme ergibt sich für die Mischungstemperatur:

$$T_M = \frac{m_{W2} * c_{p,W2} * T_{W2} + m_{W4} * c_{p,W4} * T_{W4}}{m_{Ges} * c_{p,M}} \quad (4-19)$$

Da die spezifische Wärmekapazität temperaturabhängig ist, muss bei Prozessen, bei denen sich die Temperatur ändert, die mittlere spezifische Wärmekapazität verwendet werden. Für

einen Strom, der seine Temperatur von T_1 auf T_2 ändert, berechnet sich die mittlere spezifische Wärmekapazität wie folgt: [17]

$$c_{p,m} = \frac{c_{p,1} * T_1 - c_{p,2} * T_2}{T_1 - T_2} \quad (4-20)$$

$c_{p,1}$ stellt dabei die spezifische Wärmekapazität bei T_1 und $c_{p,2}$ die spezifische Wärmekapazität bei T_2 dar.

4.1.3 Abschätzung des Messfehlers bei Temperaturmessungen

Wird die Temperatur eines Abgasstroms mit einem Thermoelement in Anwesenheit heißer Oberflächen gemessen, wird die Messung aufgrund von der auf das Thermoelement einwirkenden Wärmestrahlung der heißen Oberflächen verfälscht. Die Wärmestrahlung erwärmt das Thermoelement zusätzlich und es wird eine zu hohe Temperatur erfasst. Um den begangenen Messfehler abschätzen zu können, wird eine Energiebilanz des Thermoelements im Abgas erstellt. Wie in **Abbildung 4-2** dargestellt, steht das Thermoelement über konvektiven Wärmestrom und einem Wärmestrom durch Strahlung im Gleichgewicht mit der Umgebung.

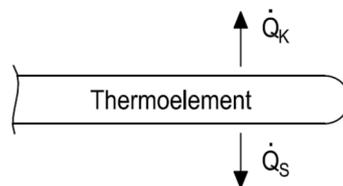


Abbildung 4-2: Energiebilanz Thermoelement im Abgas

Der konvektive Wärmestrom wird mit dem Wärmeübergang α , der Oberfläche A des Thermoelements und der Differenz der Temperatur des Thermoelements T_{TE} zur Temperatur des Abgasstroms T_{AG} berechnet: [16]

$$\dot{Q}_K = \alpha * A * (T_{TE} - T_{AG}) \quad (4-21)$$

Der Wärmeübergang lässt sich dabei über Nusselt-Beziehungen berechnen.

Das Thermoelement in der Abgasöffnung verhält sich wie ein kleines konvexes Objekt in einem großen Hohlraum. Die Strahlungsaustauschbeziehung des Thermoelements, einen grau strahlenden Körper, lautet: [18]

$$\dot{Q}_S = \sigma * \varepsilon * A * (T_{TE}^4 - T_{GS}^4) \quad (4-22)$$

Dabei bezeichnet σ die Stefan-Boltzmann-Konstante mit $5,67 \text{ E}^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, ε den Emissionskoeffizienten des Thermoelements, A die Oberfläche des Thermoelements, T_{TE} die Temperatur des Thermoelements und T_{GS} die Temperatur der Glasschmelze. Die Temperaturen sind dabei in Kelvin einzusetzen.

Wird das Thermoelement von den heißen Oberflächen nicht komplett umschlossen, steht das Thermoelement auch im Strahlungsaustausch mit der Umgebung und die Beziehung des Strahlungsaustausches muss noch um Sichtfaktoren erweitert werden:

$$\dot{Q}_S = F_K * \sigma * \varepsilon * A * (T_{TE}^4 - T_{GS}^4) + F_U * \sigma * \varepsilon * A * (T_{TE}^4 - T_U^4) \quad (4-23)$$

Die Sichtfaktoren F_K und F_U beschreiben wie viel der vom Thermoelement ausgestrahlten Wärmestrahlung auf die heißen Oberflächen und in die Umgebung abgegeben wird.

Da das Thermoelement mit der Umgebung im Gleichgewicht steht, muss gelten:

$$\dot{Q}_S + \dot{Q}_K = 0 \quad (4-24)$$

Daraus lässt sich durch Umformen die wahre Temperatur des Abgasstromes berechnen:

$$T_{AG} = T_{TE} + \frac{\varepsilon}{\alpha} \sigma \left(F_K (T_{TE}^4 - T_{GS}^4) + F_U (T_{TE}^4 - T_U^4) \right) \quad (4-25)$$

4.1.4 Berechnung des Wärmestroms bei Wärmeübertragern

Für einen Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager, in dem das Innenrohr das heiße und das Mantelrohr das kalte Medium führt, lässt sich die Wärmeübertragung durch drei Teilprozesse beschreiben:

- Wärmeübergang vom heißen Medium auf die Rohrwand
- Wärmeleitung durch die Rohrwand
- Wärmeübergang von der Rohrwand auf das kalte Medium

Diese drei Prozesse sind im Wärmedurchgangskoeffizient vereint, der wie folgt berechnet wird: [18]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i * r_i} + \frac{1}{\lambda} * \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) + \frac{1}{\alpha_a * r_a}} \quad (4-26)$$

α_i und α_a stellen dabei den inneren und äußeren Wärmeübergangskoeffizienten dar. r_i und r_a den Innen- und Außenradius des Rohres, welches die beiden Medien trennt.

Der übertragene Wärmestrom wird mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten, der Länge des Rohr-in-Rohr-Wärmeübertragers und der logarithmischen Temperaturdifferenz berechnet:

$$\dot{Q} = k * l * \Delta\vartheta_m \quad (4-27)$$

Die logarithmische Temperaturdifferenz wird mit der Temperaturdifferenz der Medien beim Abgaseintritt ΔT_H , sprich Eingangstemperatur Abgas minus Ausgangstemperatur Wasser, und der Temperaturdifferenz der Medien beim Abgasaustritt ΔT_K , sprich Ausgangstemperatur Abgas minus Eingangstemperatur Wasser, berechnet:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta T_H - \Delta T_K}{\ln\left(\frac{\Delta T_H}{\Delta T_K}\right)} \quad (4-28)$$

Für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten müssen zuvor der innere und der äußere Wärmeübergangskoeffizient bestimmt werden. Dies geschieht mit Hilfe von Ähnlichkeitsbeziehung. Diese erlauben eine Beschreibung von physikalisch ähnlichen Strömungszuständen. In dieser Arbeit wird allerdings nur der innere Wärmeübergangskoeffizient berechnet und daher nur diese Berechnung beschrieben. [16]

4.1.4.1 Berechnung des inneren Wärmeübergangskoeffizienten

Für den inneren Wärmeübergang werden die Ähnlichkeitsbeziehungen für durchströmte Rohre herangezogen. Der innere Wärmeübergang wird aus der Wärmeleitfähigkeit des Abgases, dem Innendurchmesser des Abgasrohres und der Nusselt-Zahl berechnet: [16]

$$\alpha_i = \frac{Nu_m * \lambda_{AG}}{d_i} \quad (4-29)$$

Die Berechnung der Nusselt-Zahl ist abhängig von den Strömungsbedingungen im Innenrohr. Diese werden mit Hilfe der Reynolds-Zahl beschrieben. Liegt die Reynolds-Zahl unter 2.300 ist die Rohrströmung laminar. Liegt sie über 10.000 ist die Rohrströmung mit Sicherheit turbulent. Der Bereich $2.300 < Re < 10.000$ wird als Übergangsbereich bezeichnet. Die Reynolds-Zahl wird mit der mittleren Geschwindigkeit der Strömung, dem Innendurchmesser des Rohres und der kinematischen Viskosität des Mediums berechnet: [16]

$$Re = \frac{w * d_i}{\nu} \quad (4-30)$$

In dieser Arbeit liegen in allen Bereichen turbulente Strömungsbedingungen vor. Somit wird die Nusselt-Zahl mit der Beziehung für voll ausgebildete turbulente Strömungen berechnet. In die Berechnung fließen die Reynolds-Zahl, die Prandtl-Zahl, der Innendurchmesser und die Länge des Rohres sowie ein Faktor ζ ein: [16]

$$Nu_m = \frac{\left(\frac{\zeta}{8}\right) Re Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\zeta}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d_i}{l}\right)^{2/3} \right] \quad (4-31)$$

Der Faktor ζ wird über die Reynolds-Zahl ermittelt:

$$\zeta = (1,8 \log_{10} Re - 1,5)^{-2} \quad (4-32)$$

4.2 Leitfaden zur Erstellung der Energiebilanz

Das ursprüngliche Ziel dieser Arbeit war das Erarbeiten einer Energiebilanz für das heiße Ende des Produktionsprozesses. Doch die Datenlage zur Bilanzierung der Energieflüsse war nicht ausreichend und das Erheben der fehlenden Daten hätte den Umfang dieser Arbeit gesprengt. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel ein Leitfaden zur Erstellung der Energiebilanz erarbeitet.

4.2.1 Fehlende Daten zur Bilanzierung

Anhand der Linie 21 wird nun erarbeitet, welche Daten noch erfasst werden müssen, um zu einer vollständigen Energiebilanz zu kommen. Es wird nur eine Linie betrachtet, da die zu erfassenden Daten für die anderen Linien analog sind. Die einzelnen Energieströme werden hier auch nicht mehr einzeln beschrieben, da dies schon in **Kapitel 3.2** geschehen ist. Die Prozessbilder der Aggregate sind in **Abbildung 3-26** bis **Abbildung 3-32** dargestellt.

Es werden die Verbrauchsdaten der einzelnen Aggregate für den 17.05.2018 angegeben. Der 17.05.2018 wurde gewählt, da die Tonnage dieses Tages nur um 33 kg von der durchschnittlichen Tages tonnage, im Zeitraum Februar 2018 bis August 2018, abweicht. Da der Energieverbrauch der Aggregate in erster Linie von der Tonnage abhängig ist, soll so ein Bild des durchschnittlichen Verbrauchs zwischen Februar 2018 und August 2018 gezeigt werden.

Es wird angenommen, dass die Temperaturen des Gemenges im Gemengehaus der Umgebungstemperatur entsprechen. Dadurch werden die Energieeinträge über die Stoffströme gleich Null, was eine Betrachtung in der Energiebilanz überflüssig macht.

In **Tabelle 4-III** ist die Datenlage zur Glaswanne 2 dargestellt. Daten eines Stroms die nicht zur Berechnung der Leistung notwendig sind werden in der Tabelle mit einem Querstrich dargestellt. Fehlende Daten werden mit einem roten „F“ markiert.

Tabelle 4-III: Fehlende Daten Glaswanne 2

Glaswanne 2					
Strom	Massenstrom [kg/h]	c_p [kJ/kgK]	Temperatur [°C]	Energie pro Tag [kWh]	H_u [kJ/kg]
L21	10.454	-	20	-	-
VL2	10.454	1,2355	1.366	-	-
A2H	11.031	1,4370	1.383	-	-
A2K	11.031	1,2461	521	-	-
E21	-	-	-	13.689	-
G21	576	-	20	-	50.409
W21	F	4,1820	F	-	-
K21	F	-	F	-	-
EW2K	-	-	-	1.086	-
EVL2	-	-	-	F	-
P22	5.716	1,5000	1.236	-	-

Es sind fast alle, zur Bilanzierung notwendigen, Daten vorhanden. Es fehlen allerdings die Massenströme und die Ein- und Austrittstemperaturen der Kühlströme für Elektrodenkühlung (W21) und Wannenkühlung (K21). Auch der Energieverbrauch des Verbrennungsluftventilators (EVL2) ist unbekannt.

Der Abgasweg wird hier nicht mit einbezogen, da er später in dieser Arbeit gesondert behandelt wird. Von Arbeitswannen und Feeder waren alle Daten bekannt. Sie werden in **Kapitel 4.4.1** bilanziert und aus diesem Grund nicht hier behandelt.

Für die Bilanzierung der IS-Maschine müssen viele Daten erhoben werden. Bekannt sind der Massenstrom, die spezifische Wärmekapazität und die Temperatur der eintretenden Glasschmelze (P212). Des Weiteren sind die Energieverbräuche der Ventilatoren, die Kühlluft für Formenkühlung (K211) und Vertiflow (K212) zur Verfügung stellen, bekannt. **Tabelle 4-IV** zeigt die bekannten und unbekanntenen Daten der IS-Maschine 21. Im geregelten Betrieb werden keine Glaspfropfen, aufgrund eines Umbaus an der IS-Maschine, ausgeschieden und der Massenstrom der eintretenden Glasschmelze kann dem der austretenden Glasbehälter (P213) gleichgesetzt werden.

Bei der IS-Maschine sind die Massenströme und die Ein- und Austrittstemperatur der Kühlluftströme, der elektrische Energieverbrauch der Steuerung (E211), der Verbrauch durch Druckluft (D211-D213) und die Temperatur der austretenden Glasbehälter zu erfassen.

Tabelle 4-IV: Fehlende Daten IS-Maschine 21

IS 21					
Strom	Massenstrom [kg/h]	c_p [kJ/kgK]	Temperatur [°C]	Energie pro Tag [kWh]	H_u [kJ/kg]
P212	2.169	1,5000	1.290	-	-
K211	F	F	F	2.903	-
K212	F	F	F	592	-
E211	-	-	-	F	-
D211	-	-	-	F	-
D212	-	-	-	F	-
D213	-	-	-	F	-
P213	2.169	F	F	-	-

In **Tabelle 4-V** sind die zur Bilanzierung erforderlichen Daten zu Bilanzierung des Aggregats Transport 21 dargestellt. Es ist nur der eintretende Massenstrom der gefertigten Glasbehälter (P213) bekannt. Allerdings kann man den Massenstrom des Ausschusses (AS21) mit relativ hoher Genauigkeit abschätzen. Der Hauptgrund für das Ausmustern von Glasbehältern ist ein vorangegangenes Auftragen des Trennmittels auf die Formen an den IS-Maschinen. Nach dem Auftragen des Trennmittels ist die Oberfläche der Glasbehälter, die im nächsten Zyklus gefertigt werden, mit Trennmittelrückständen versehen und die Glasbehälter müssen ausgemustert werden. Ist bekannt wie oft das Trennmittel pro Stunde auf die Formen aufgebracht wird, kann so auf den Massenstrom des Ausschusses und in weiterer Folge auf den Massenstrom der austretenden Glasbehälter (P214) geschlossen werden.

Tabelle 4-V: Fehlende Daten Transport 21

Transport 21					
Strom	Massenstrom [kg/h]	c_p [kJ/kgK]	Temperatur [°C]	Energie pro Tag [kWh]	H_u [kJ/kg]
P213	2.169	F	F	-	-
E212	-	-	-	F	-
D214	-	-	-	F	-
AS21	F	F	F	-	-
P214	F	F	F	-	-

Die restlichen zu erhebenden Daten sind die Ein- und Austrittstemperatur der Glasbehälter und die Temperatur der ausgemusterten Glasbehälter. Außerdem sind der elektrische Energieverbrauch (E212) und der Verbrauch durch Druckluft (D214) zu erfassen.

Auf den ersten Blick sind auch beim Kühllofen sehr viele Daten zu erfassen, dargestellt in **Tabelle 4-VI**. Bekannt sind nur der Gasverbrauch (G213) und der Verbrauch an elektrischer Energie (E213). Allerdings kann mit Kenntnis des Luftüberschusses, mit dem der Kühllofen beheizt wird, der Massenstrom der Verbrennungsluft (L213) und in weiterer Folge der Massenstrom des Abgases (A213) berechnet werden. Wird im Aggregat Transport eine Annahme über den Massenstrom des Ausschusses getroffen, sind auch die in den Kühllofen ein- und austretenden Massenströme der Glasbehälter (P214, P215) bekannt. Die zu erhebenden Daten beschränken sich dann nur mehr auf die Temperaturen der ein- und austretenden Glasbehälter und die Temperatur mit der das Abgas den Kühllofen verlässt.

Tabelle 4-VI: Fehlende Daten Kühllofen 21

Kühllofen 21					
Strom	Massenstrom [kg/h]	c_p [kJ/kgK]	Temperatur [°C]	Energie pro Tag [kWh]	H_u [kJ/kg]
P214	F	F	F	-	-
E213	-	-	-	503	-
G213	8	-	20	-	50.409
L213	F	-	20	-	-
A213	F	F	F	-	-
P215	F	F	F	-	-

4.2.2 Möglichkeiten zur Erhebung der fehlenden Daten

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten zum Erfassen der fehlenden Daten für eine Bilanzierung angegeben. Sie werden in Kapitel mit der zu erfassenden physikalischen Größe unterteilt.

4.2.2.1 Temperatur

Die Erfassung der Temperaturen von Luftströmen kann über Thermoelemente erfolgen. Dabei muss bis zur Temperaturkonstanz gemessen werden. Des Weiteren sollte das Thermoelement so positioniert werden, dass nur die Temperatur des betrachteten Luftstroms und keine weiteren Einflüsse, wie zum Beispiel Falschluff oder Wärmestrahlung von einem benachbarten heißen Bauteil, mitgemessen werden.

Wird ein Kühlmedium in einem geschlossenen Kreis geführt, wie es bei der Elektrodenkühlung der Fall ist, sind Fühler in Tauchhülsen die einfachste Möglichkeit Vorlauf- und Rücklauf-temperatur zu erfassen. Sind diese aber nicht vorgesehen, muss ein anderer

Weg zur Erfassung dieser Temperaturen gefunden werden. Wie in **Abbildung 4-3** dargestellt, kann die Medientemperatur mit einer Messung der Rohraußentemperatur mit hinreichender Genauigkeit abgeschätzt werden. Voraussetzung dafür sind eine dicke Wärmedämmung um das Thermoelement, um den Wärmestrom nach außen klein zu halten und Verwendung von Wärmeleitpaste an der Messperle des Thermoelements für einen guten Wärmeübergang. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass das Thermoelement fest an die Rohraußenseite gedrückt wird um einen guten Wärmeübergang zu gewährleisten. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, wird die Temperaturdifferenz zwischen Medium und Rohraußenseite sehr klein und es kann angenommen werden, dass die Medientemperatur gleich der Rohraußentemperatur ist.

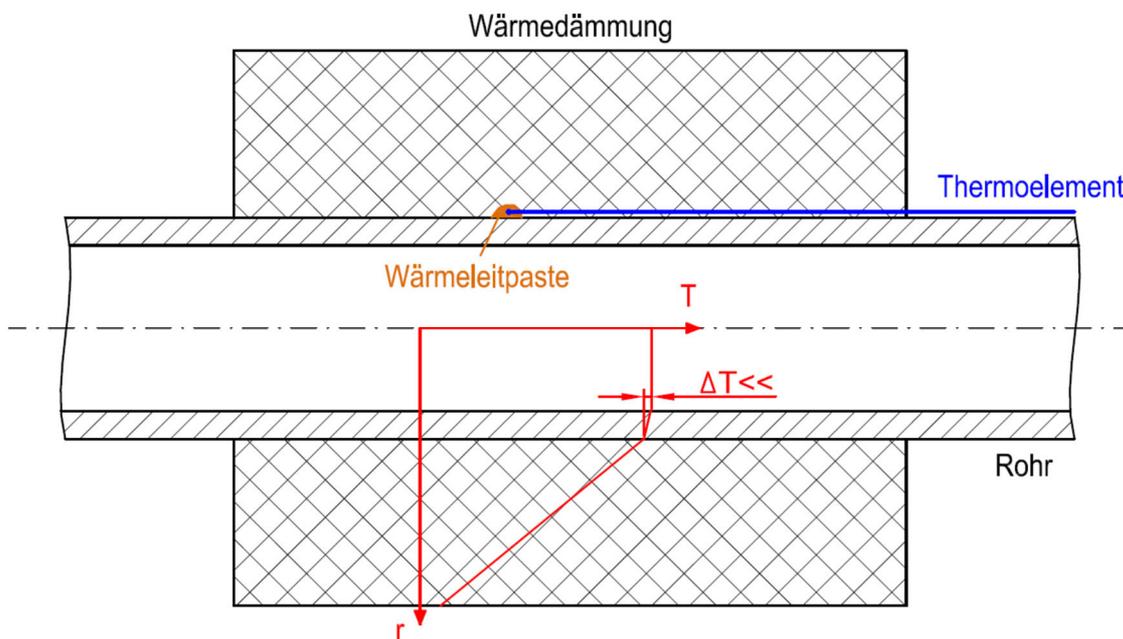


Abbildung 4-3: Temperaturmessung eines Mediums an der Rohraußenseite

Da die gefertigten Glasbehälter auf Förderbändern transportiert werden, kann die Temperatur dieser Glasbehälter nur mit Hilfe eines Pyrometers erfasst werden. Allerdings ist der Emissionskoeffizient im Allgemeinen temperaturabhängig und muss zuvor bestimmt werden. Das ist mit einem Verfahren möglich, das am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik *Emissionsreferenzierung* genannt wird. Dazu wird eine Glasbehälterprobe in einem Ofen erhitzt. Wie in **Abbildung 4-4** dargestellt, wird die Temperatur der Glasprobe mit einem Thermoelement und einem Pyrometer, mit dem eingestellten Emissionskoeffizienten von Eins, gemessen.

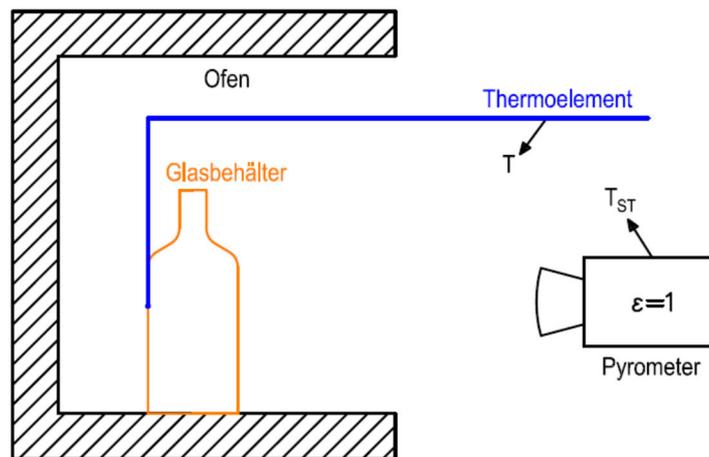


Abbildung 4-4: Emissionsreferenzierung von Glasbehältern

Das Thermoelement liefert die reale Temperatur T und das Pyrometer die Strahlungstemperatur T_{ST} eines schwarzen Strahlers. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschreibt den Wärmefluss durch Strahlung:

$$\dot{q} = \sigma * T_{ST}^4 = \sigma * \varepsilon(T) * T^4 \quad (4-33)$$

Kürzt man die Stefan-Boltzmann-Konstante σ erhält man für den Emissionskoeffizienten:

$$\varepsilon(T) = \frac{T_{ST}^4}{T^4} \quad (4-34)$$

Die Temperatur ist dabei in Kelvin einzusetzen. Wenn man diese Messung für mehrere Temperaturen wiederholt, erhält man eine Kurve, die die Temperaturabhängigkeit des Emissionskoeffizienten vom Glasbehälter beschreibt.

Nun kann die Strahlungstemperatur eines Glasbehälters mit einem Pyrometer, bei einem Emissionskoeffizienten von Eins, gemessen und über den temperaturabhängigen Emissionskoeffizienten die reale Temperatur des Glasbehälters berechnet werden:

$$T = \sqrt[4]{\frac{T_{ST}^4}{\varepsilon(T)}} \quad (4-35)$$

Da Weiß-, Grün-, und Braunglas verschiedene temperaturabhängige Emissionskoeffizienten haben, muss die Emissionsreferenzierung für jede Glassorte durchgeführt werden.

4.2.2.2 Massenstrom

Der Massenstrom muss nur für Kühlströme erfasst werden. Der Massenstrom von Verbrennungsluft und Abgas kann über den Luftüberschuss berechnet werden. Die Erfassung

des Massenstroms für Kühlluft erfolgt über den Volumenstrom. Da alle Ventilatoren als Radialventilatoren ausgeführt sind, kann an deren runden Ansaugöffnungen eine Netzmessung nach dem Schwerlinienverfahren nach VDI/VDE 2640 durchgeführt werden. Dazu wird der Kreisquerschnitt in n flächengleiche Teilflächen aufgeteilt. Die dazu benötigten Radien der Kreisinge lassen sich nach **Gleichung 4-36** berechnen, wobei R den Radius der Ansaugöffnung darstellt. [19]

$$r_i = R * \sqrt{1 - \frac{i}{n}} \quad (4-36)$$

Abbildung 4-5 zeigt eine solche Aufteilung für fünf flächengleiche Teilflächen. Es wird die Geschwindigkeit des Luftstroms auf der Schwerlinien der jeweiligen Teilfläche gemessen. Die Schwerlinien sind die Kreise, die die Teilflächen halbieren und sind in **Abbildung 4-5** strichliert dargestellt. [19]

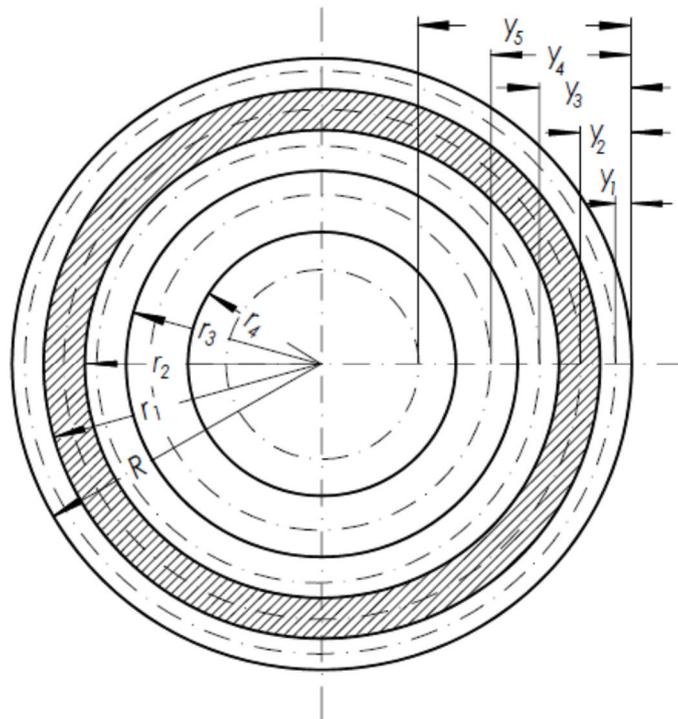


Abbildung 4-5: Anordnung der Messpunkte nach dem Schwerlinienverfahren für $n=5$ Teilflächen [19]

Der Abstand der Schwerlinien vom Außenkreis der Ansaugöffnung wird nach **Gleichung 4-37** berechnet.

$$y_i = R \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2i-1}{2n}} \right) \quad (4-37)$$

Der Volumenstrom lässt sich mit dem arithmetischen Mittel, der auf den Schwerlinien gemessenen Geschwindigkeiten und der Fläche der Ansaugöffnung berechnen: [19]

$$\dot{V}_B = R^2 \pi \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (4-38)$$

Zu beachten ist, dass hier der Volumenstrom zu Betriebsbedingungen berechnet wurde. Dieser muss auf den Normvolumenstrom bei Normbedingungen mit $p_N = 1,01325 \text{ bar}$ und $T_N = 0 \text{ °C}$ umgerechnet werden:

$$\dot{V}_N = \dot{V}_B \frac{p_B}{p_N} \frac{T_N}{T_B} \quad (4-39)$$

Aus dem Normvolumenstrom wird mit der Normdichte der Massenstrom berechnet:

$$\dot{m} = \dot{V}_N * \rho_N \quad (4-40)$$

Die Dichte von trockener Luft bei Normbedingungen beträgt $1,276 \text{ kg/Nm}^3$. [16]

Die Erfassung von Massenströmen in geschlossenen Kühlkreisen, wie es bei der Elektrodenkühlung der Fall ist, kann über den Einbau von Volumenstrommesser in den Kreislauf erfolgen. Alternativ ist, bei genauer Kenntnis der Strömungswiderstände im Kreislauf, eine Abschätzung des Massenstroms über die Pumpenkennlinie und über die Leistungsaufnahme der Pumpe möglich.

4.2.2.3 Elektrischer Energieverbrauch

Wird der elektrische Energieverbrauch eines Aggregats nicht von einem eigenen Stromzähler erfasst, kann seine Leistung mit der Anschlussleistung und der Auslastung abgeschätzt werden.

Da die Druckluft zentral bereitgestellt wird, muss auch der elektrische Verbrauch durch Druckluft eines Aggregats abgeschätzt werden. Der elektrische Verbrauch einer jeden Druckluftstufe wird gemessen. Mit einer prozentuellen Aufteilung welcher Druckluftverbraucher wie viel des Gesamtdruckluftverbrauchs benötigt, ist es möglich den einzelnen Aggregaten den elektrischen Energieverbrauch durch Druckluft zuzuordnen.

4.2.3 Prioritätenliste

Da viele Daten für die Bilanzierung des Gesamtprozesses erforderlich sind, wird in **Tabelle 4-VII** eine Prioritätenliste angegeben. Diese ordnet die zu erfassenden Ströme von oben nach unten nach dem Nutzen, der durch das Erfassen der Daten generiert wird. Zusätzlich wird der abgeschätzte Aufwand zum Erfassen der Daten angegeben.

Tabelle 4-VII: Prioritätenliste

Strom	Was	Aufwand	Nutzen
Abgasstrom Kühlofen	Temperatur	gering	Wärmeinhalt Abgas, Abwärmepotential!
Glasbehälter	Temperatur	hoch	hoher Energieinhalt, wesentlicher Einfluss auf Energiebilanz
Druckluft	Verbrauch elektr. Energie, Schätzung	gering	Druckluft verbraucht 8,1 % des Gesamtenergiebedarfs des heißen Endes, Einfluss auf Energiebilanz
Formenkühlung, Vertiflow	Temperaturen Ein- und Austritt, Volumenstrom	mittel	Kühlluftventilatoren laufen immer auf 100% Leistung, Bewertung der Effektivität
Elektroden-, Wannenkühlung	Temperaturen Ein- und Austritt, Volumenstrom	mittel	zusätzliches Abwärmepotential? Vervollständigen der Energiebilanz
elektrische Verbraucher	Verbrauch elektr. Energie, Schätzung	gering	Vervollständigen der Energiebilanz

Die Erfassung der Temperatur des Abgases kann relativ einfach mit einem Thermoelement im Abgasstrom erfolgen. Der Nutzen dieser Messung ist hoch, da das Abgas zurzeit ein ungenutztes Abwärmepotential darstellt und mit der Messung der Wärmeinhalt des Abgases berechnet werden kann.

Die Erfassung der Temperatur der Glasbehälter ist mit hohem Aufwand verbunden, da bei einer pyrometrischen Messung zuerst die Temperaturabhängigkeit des Emissionskoeffizienten der Glasbehälter festgestellt werden muss. Allerdings bringen die heißen Glasbehälter viel Energie in die einzelnen Aggregate ein und haben somit einen hohen Einfluss auf deren Energiebilanz.

Der Aufwand zur Abschätzung des Druckluftverbrauchs der einzelnen Aggregate wird als gering angesehen, sofern Typenblätter der einzelnen Verbraucher vorliegen. Da die Bereitstellung der Druckluft 8,1 % des Gesamtenergiebedarfs des heißen Endes ausmacht, hat ihr Verbrauch einen wesentlichen Einfluss auf die Energiebilanz der einzelnen Aggregate.

Zur Erfassung der abgeführten Wärme durch Formenkühlung und Vertiflow muss der Massenstrom und die Ein- und Austrittstemperatur der Kühlluft erfasst werden. Das Erfassen der Eintrittstemperatur gestaltet sich als einfach. Sie entspricht der Lufttemperatur des Ansaugortes. Für das Erfassen der Austrittstemperatur muss ein repräsentativer Punkt gefunden werden bei dem die wahre Temperatur gemessen wird. Mit der Erfassung dieser Daten kann auf die Effektivität der Aggregate geschlossen werden. Dies ist wichtig, da die Kühlluftventilatoren zurzeit unregelmäßig, mit 100 % ihrer Leistung, betrieben werden und keine Daten vorliegen, ob das notwendig ist. Eine bessere Beurteilung der Effektivität der Aggregate ist mit einer Erfassung der Formtemperaturen möglich. Die Formtemperaturen können in Zukunft auch als Regelungsparameter für die Kühlluftventilatoren verwendet werden.

Auch bei der Erfassung der abgeführten Wärme durch Elektroden- und Wannenkühlung muss der Massenstrom und die Ein- und Austrittstemperatur der Kühlströme erfasst werden. Bei der Erfassung der Austrittstemperatur der Wannenkühlung muss ebenfalls ein repräsentativer Punkt gefunden werden, da die Kühlluft über Düsen auf die Wannenoberfläche geblasen wird und danach diffus in die Produktionshalle strömt. Der Nutzen beschränkt sich auf die Vervollständigung der Energiebilanz für die Glaswanne, da das Temperaturniveau der abgeführten Wärme als gering abgeschätzt wird.

Der Aufwand zur Abschätzung der elektrischen Verbraucher, für die keine eigene Stromzählung erfolgt, ist gering. Die Abschätzung kann über die Anschlussleistung und die Auslastung des Aggregats erfolgen. Der Nutzen beschränkt sich auf das Vervollständigen der Energiebilanz.

4.3 Messkampagne

Die Messkampagne wurde am 29.11.2018 durchgeführt, mit dem Ziel die Abgastemperaturen von Arbeitswanne und Feeder zu erfassen. Durch diese Abgastemperaturerfassung ist es möglich das Abwärmepotential des in die Halle entweichenden Abgases und eine Energiebilanz für diese beiden Aggregate zu berechnen. Die Temperaturerfassung wurde mit einem Thermoelement Typ S durchgeführt. Die Spitze des Thermoelements wurde in der Öffnung zwischen Oberbau und Abdeckziegel positioniert, wie in **Abbildung 4-6** ersichtlich. Dort wurde so lange die Temperatur gemessen, bis diese konstant blieb.

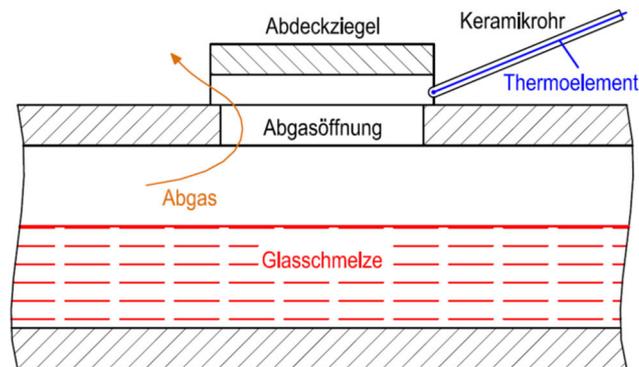


Abbildung 4-6: Temperaturerfassung Abgas von Arbeitswannen und Feeder

Es war geplant, die Abgastemperatur am Anfang und am Ende jedes Feeders und bei den Arbeitswannen zwischen den Feedern zu erfassen. Allerdings werden die Öffnungen an Arbeitswannen und Feedern, aus denen die Abgase entweichen, den Produktionsbedingungen angepasst. So war es nicht möglich alle geplanten Messungen durchzuführen. In **Abbildung 4-7** sind die Messpunkte der durchgeführten Abgastemperaturerfassungen bei den Linien die Weißglas produzieren dargestellt.

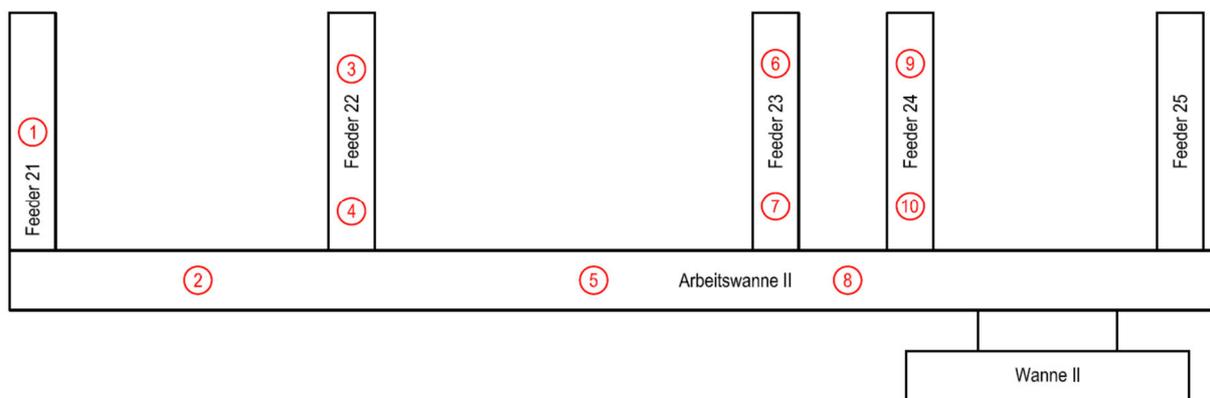


Abbildung 4-7: Messpunkte für Abgastemperaturerfassung bei Arbeitswannen und Feeder Weißglas

Auch bei den Linien die Braunglas produzieren konnten nicht alle geplanten Temperaturerfassungen, aufgrund von nicht vorhandenen Abgasöffnungen, durchgeführt werden. Die durchgeführten Abgastemperaturerfassungen sind in **Abbildung 4-8** abgebildet.

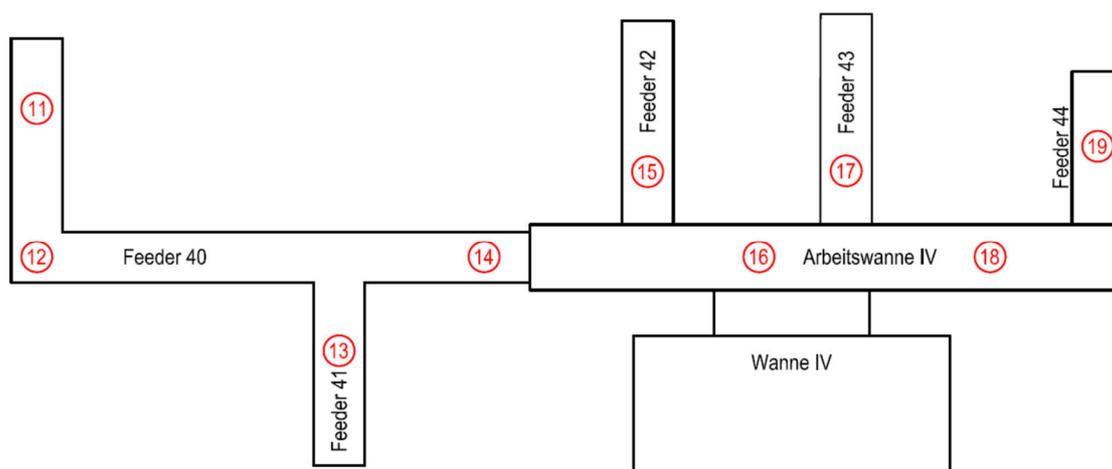


Abbildung 4-8: Messpunkte für Abgastemperaturerfassung bei Arbeitswannen und Feeder Braunglas

Die Ergebnisse der Abgastemperaturerfassung sind in **Tabelle 4-VIII** dargestellt. Die erfassten Temperaturen von Weißglas liegen im Schnitt über den erfassten Temperaturen von Braunglas. Im Schnitt wurde Temperaturen von 938 °C bei Weißglas und Temperaturen von 896 °C bei Braunglas gemessen.

Tabelle 4-VIII: Gemessene Abgastemperaturen bei Arbeitswanne und Feeder

Durchgeführte Messungen			
Weißglas		Braunglas	
Messstelle	Temperatur [°C]	Messstelle	Temperatur [°C]
1	950	11	938
2	997	12	819
3	799	13	863
4	965	14	1.012
5	920	15	853
6	1.000	16	866
7	945	17	851
8	757	18	930
9	1.067	19	929
10	984		
Mittelwert	938	Mittelwert	896

Die Ursache für die teilweise großen Differenzen bei den erfassten Temperaturen liegt an Messfehlern, die während der Temperaturerfassung begangen wurden. Die ideale Abgastemperaturerfassung in einem Spalt zwischen Oberbau und Abdeckziegel, wie in **Abbildung 4-6** dargestellt, war nicht immer möglich. Bei den Linien die Weißglas produzieren wurde der Abdeckziegel teilweise mit einer Abhängevorrichtung mit großem Abstand über dem Oberbau positioniert. Das Ergebnis war ein relativ großer Spalt aus dem das Abgas in die

Produktionshalle entwich. Um den Einfluss von angesaugter Falschlufft zu minimieren, musste die Spitze des Thermoelements weit in der Abgasöffnung positioniert werden. Dadurch wurde ein gewisser Anteil von Wärmestrahlung der Glasschmelze miterfasst, wie in **Abbildung 4-9** abgebildet. Die gemessene Temperatur liegt demnach über der wahren Temperatur des Abgases.

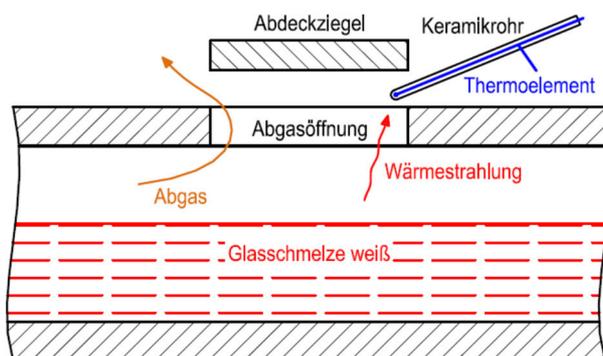


Abbildung 4-9: Ursache für Messfehler bei der Abgastemperaturerfassung bei Weißglas

Der so begangene Messfehler kann mit **Gleichung 4-25** abgeschätzt werden. Allerdings wurden die in der Formel verwendeten Sichtfaktoren nicht erfasst und können nur abgeschätzt werden. Die Temperatur der Glasschmelze beträgt ca. 1.300 °C und die Temperatur des Thermoelements entspricht den, im Zuge der Messkampagne, erfassten Werten. Da die hohen Temperaturen zur vierten Potenz in die Berechnung einfließen, ist der Fehler, der bei Abschätzen der Sichtfaktoren gemacht wird, groß. Unter diesen Umständen gestaltet sich eine Korrektur der gemessenen Werte als schwierig. In dieser Arbeit wird somit mit den gemessenen Temperaturen weitergearbeitet. Allerdings ist eine erneute Erfassung mit einem Messverfahren, das den Strahlungseinfluss ausblendet, empfehlenswert. Das ist mit einem Absaugpyrometer möglich. Wie in **Abbildung 4-10** dargestellt, befindet sich hier ein Thermoelement in einem oder mehreren Keramikrohren und wird von diesen von Strahlung abgeschirmt. Der Abgasstrom wird über eine Absaugvorrichtung über das Thermoelement geleitet, hier in Form einer mit Druck angetriebenen Strahlpumpe angedeutet. Die Außenseite des Keramikrohres wird angestrahlt und das Rohr gibt die Wärme über Wärmeleitung nach innen ab. Allerdings ist Keramik ein schlechter Wärmeleiter und so wird die Erwärmung durch die Strahlung, bei einem ausreichend großen Abgasvolumenstrom durch das Rohr, durch Konvektion abgeführt. Absaugpyrometer können mit oder ohne Kühlung ausgeführt werden.

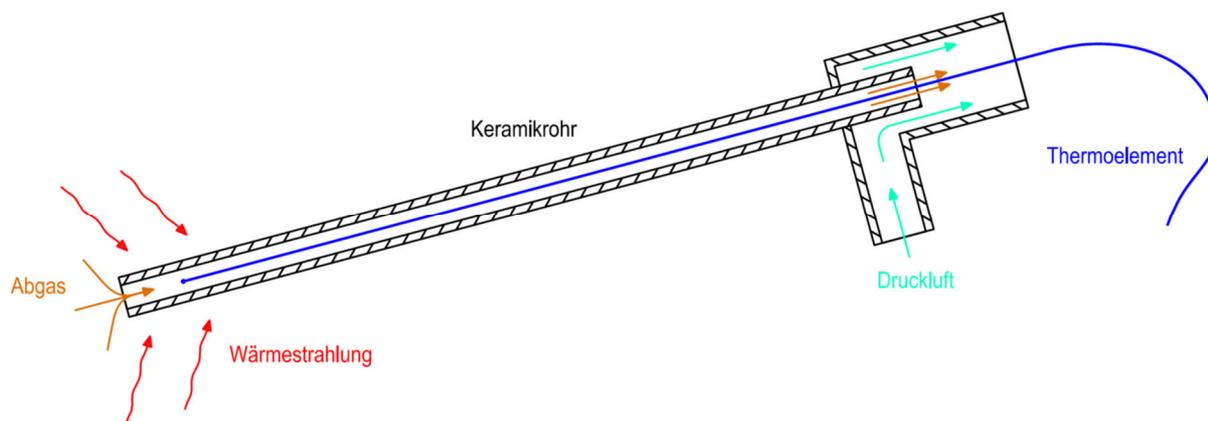


Abbildung 4-10: Absaugpyrometer

Die reduzierenden Bedingungen, unter denen die Linien die Braunglas produzieren beheizt werden, haben zur Folge, dass Flammen aus den Abgasöffnungen schlagen, wie in **Abbildung 4-11** dargestellt. In der Flamme konnte die wahre Abgastemperatur nicht erfasst werden, da noch nicht das gesamte Erdgas umgesetzt war. Über den Flammenspitzen wurde eine noch geringere Temperatur gemessen, da der Einfluss der, aus der Umgebung angesaugten, Falschluff noch größer war. Zu guter Letzt kann auch hier eine Verfälschung der Temperaturmessung durch Wärmestrahlung nicht ausgeschlossen werden. Diese Effekte gestalten eine Abschätzung des Fehlers ebenfalls als schwierig. Auch hier wird mit den im Zuge der Messkampagne erfassten Temperaturen weitergearbeitet.

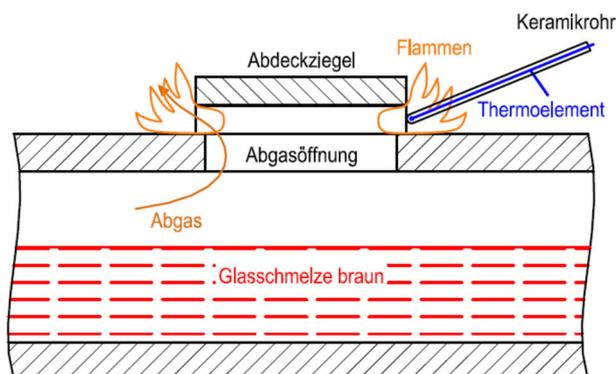


Abbildung 4-11: Ursache für Messfehler bei der Abgastemperaturerfassung bei Braunglas

4.4 Energieeffizienz bei Stölzle Oberglas

In diesem Kapitel werden die ermittelten Abwärmepotentiale und Maßnahmenvorschläge zur Steigerung der Energieeffizienz vorgestellt.

4.4.1 Arbeitswannen und Feeder

In Arbeitswannen und Feeder wird die Glasschmelze verteilt und zu den Formgebungsmaschinen transportiert. Um bei den Formgebungsmaschinen die richtige Verarbeitungstemperatur der Glasschmelze zu erreichen, werden Arbeitswannen und Feeder mit einem Erdgas-Luft-Gemisch, das in Gasmischstationen gebildet wird, beheizt. Das anfallende Abgas wird durch Öffnungen in den Kanälen in die Produktionshalle entlassen. Arbeitswannen und Feeder verbrauchen im Schnitt 461.600 Nm³ Erdgas pro Monat, was einem Anteil von 24,4 % des Gesamtenergiebedarfs des heißen Endes von Stölzle Oberglas entspricht. Für die energetische Bilanzierung dieser Aggregate der Linie 21 waren alle Daten bekannt oder wurden im Zuge der Messkampagne erfasst. Ebenso kann auch der Energieinhalt des in die Produktionshalle entlassenen Abgases berechnet werden.

Die folgenden Daten wurden zur Bilanzierung von Arbeitswannen und Feeder und zur Berechnung des Energieinhalts des Abgases von Arbeitswannen und Feeder herangezogen:

- Monatlicher Gasverbrauch von Arbeitswannen und Feeder
- Sauerstoffgehalt des Erdgas-Luft-Gemisches nach den Gasmischstationen
- Luftfeuchte der Verbrennungsluft aus Wetterdatenaufzeichnung
- Gemessene Abgastemperaturen

4.4.1.1 Bilanzierung von Arbeitswanne 2

In **Tabelle 4-IX** sind die vorhandenen Daten, die zur Bilanzierung der Arbeitswanne 2 verwendet wurden, aufgelistet. Das zugehörige Prozessbild ist in **Abbildung 3-28** dargestellt.

Tabelle 4-IX: Daten zur Bilanzierung von Arbeitswanne 2

Arbeitswanne 2					
Strom	Massenstrom [kg/h]	c _p [kJ/kgK]	Temperatur [°C]	Energie pro Tag [kWh]	H _u [kJ/kg]
L22	2.039	-	20	-	-
G22	104	-	20	-	50.409
P22	5.716	1,5000	1.236	-	-
A22	2.143	1,3522	938	-	-
P211	2.168	1,5000	1.267	-	-
P221	804	1,5000	1.253	-	-
P231	1.367	1,5000	1.250	-	-
P241	700	1,5000	1.340	-	-
P251	677	1,5000	1.295	-	-

Die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität des Abgases erfolgte wie in **Kapitel 4.1.2** beschrieben. Für die spezifische Wärmekapazität der Glasschmelze wurde auf Werte aus der Literatur zurückgegriffen. Die verwendeten Werte sind in **Abbildung 4-12** mit einer grünen Linie gekennzeichnet.

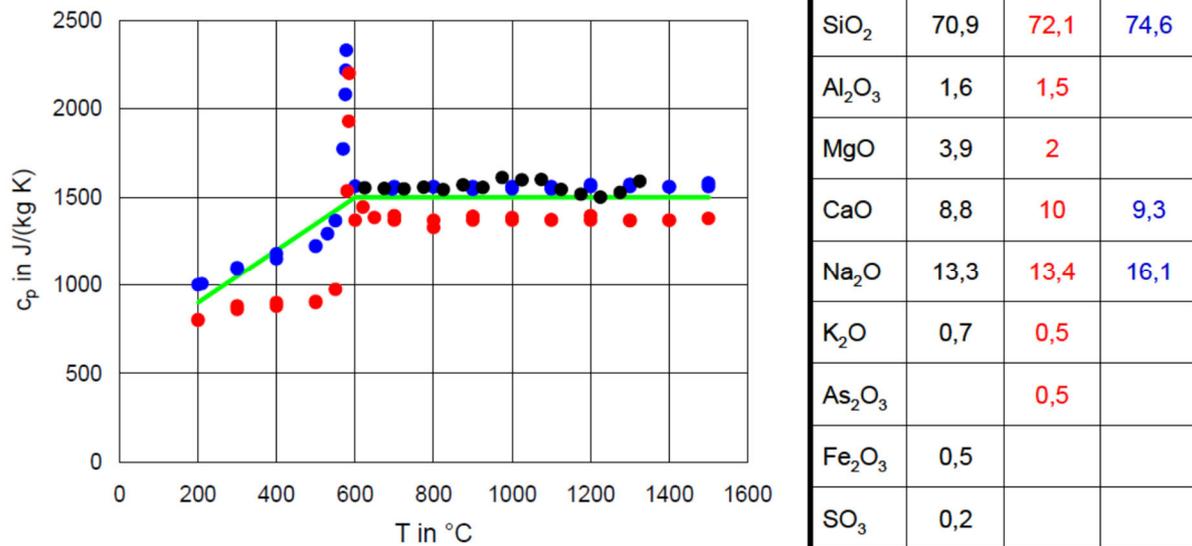


Abbildung 4-12: Spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur für drei Gläser [20]

Aus den Daten aus **Tabelle 4-IX** können die Leistungen der einzelnen Ströme mit **Gleichung 4-1** und **Gleichung 4-2** bilanziert werden. Dazu werden die Leistungen der Input-Ströme den Leistungen der Output-Ströme gegenübergestellt. Die Differenz stellt die Verluste über Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung der heißen Oberfläche der Arbeitswanne dar. **Tabelle 4-X** zeigt diese Gegenüberstellung. Da die Temperatur des Verbrennungsluftstroms der Umgebungstemperatur entspricht, wird keine Leistung eingebracht.

Tabelle 4-X: Leistungsbilanz Arbeitswanne 2

Arbeitswanne 2			
Input		Output	
Strom	Leistung [kW]	Strom	Leistung [kW]
P22	2.896	A22	739
G22	1.456	P211	1.127
L22	0	P221	413
		P231	701
		P241	385
		P251	360
Summe	4.352	Summe	3.725
Verluste	627		

Um die Leistungsbilanz anschaulich darzustellen, können Sankey-Diagramme verwendet werden. Sie stellen die Leistungsflüsse durch Pfeile, deren Stärke der Leistung entspricht, dar. **Abbildung 4-13** zeigt die Leistungsbilanz der Arbeitswanne 2. Die Prozentangaben geben den Leistungsfluss bezogen auf die durch den Brennstoff eingebrachte Leistung an.

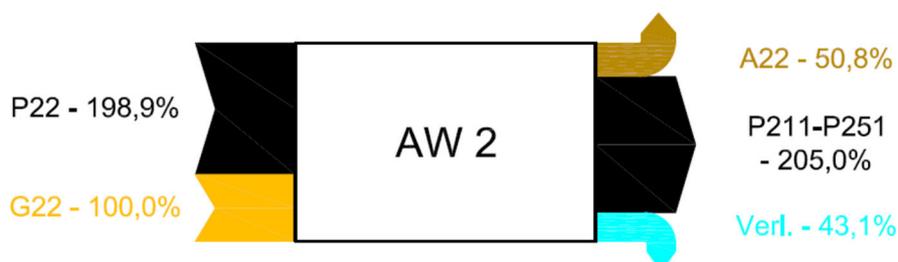


Abbildung 4-13: Leistungsbilanz Arbeitswanne 2 in % der Brennstoffwärmeleistung

Aus **Abbildung 4-13** wird ersichtlich, dass die vom Brennstoff eingebrachte Leistung fast vollständig, in Form von Abgasenthalpie und Verlusten, an die Umgebung abgegeben wird. Da das Aggregat dazu verwendet wird die Glasschmelze zu verteilen und zu temperieren, war dies nicht anders zu erwarten.

Der Hauptteil des von der austretenden Glasstrom transportierten Wärmestroms wird vom Wärmestrom der eintretenden Glasschmelze aufgebracht. Das wird deutlich, wenn man die Leistungsströme auf den Leistungsstrom der aus der Arbeitswanne austretenden Glasschmelze bezieht. Wie in **Abbildung 4-14** ersichtlich, werden 97 % der Leistung des austretenden Glasstroms vom eintretenden Glasstrom aufgebracht. 45,7 % der sich im Glas befindlichen Wärme werden als Verluste und Abgasenthalpie an die Umgebung abgegeben.

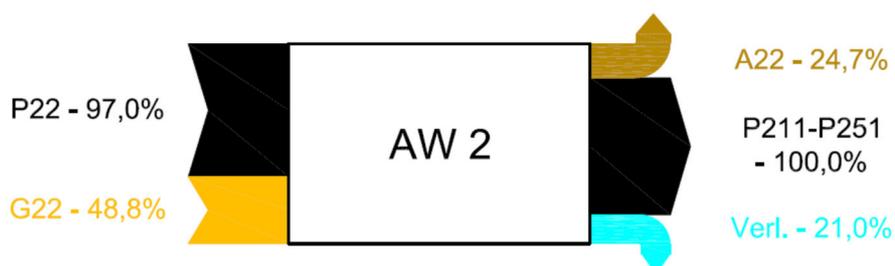


Abbildung 4-14: Leistungsbilanz Arbeitswanne 2 in % der Wärme im austretenden Produktstrom

4.4.1.2 Bilanzierung von Feeder 21

Die Bilanzierung des Feeders 21 gestaltet sich sehr ähnlich wie die Bilanzierung der Arbeitswanne 2. Die erhobenen Daten sind in **Tabelle 4-XI** dargestellt. Das dazugehörige Prozessbild stellt **Abbildung 3-29** dar.

Tabelle 4-XI: Daten zur Bilanzierung von Feeder 21

Feeder 21					
Strom	Massenstrom [kg/h]	c_p [kJ/kgK]	Temperatur [°C]	Energie pro Tag [kWh]	H_u [kJ/kg]
L211	447	-	20	-	-
G211	23	-	20	-	50.409
P211	2.169	1,5000	1.267	-	-
A211	470	1,3517	938	-	-
P212	2.169	1,5000	1.290	-	-

Die Quantität der Leistungsströme wird, wie schon bei Arbeitswanne 2, mit **Gleichung 4-1** und **Gleichung 4-2** berechnet. **Tabelle 4-XII** zeigt die Gegenüberstellung der Input- und Output-Ströme.

Tabelle 4-XII: Leistungsbilanz Feeder 21

Feeder 21			
Input		Output	
Strom	Leistung [kW]	Strom	Leistung [kW]
P211	1.127	A211	162
G211	322	P212	1.148
L211	0		
Summe	1.449	Summe	1.310
Verluste	139		

Auch hier werden die Ergebnisse der Leistungsbilanz in Form von Sankey-Diagrammen angegeben. **Abbildung 4-15** zeigt die Leistungsströme bezogen auf die durch den Brennstoff eingebrachte Leistung. Wie es von einem Aggregat, das für den Transport der Glasschmelze verwendet wird, zu erwarten war, werden 93,5 % der durch den Brennstoff eingebrachten Leistung in Form von Verlusten und Abgasenthalpie an die Umgebung abgegeben.

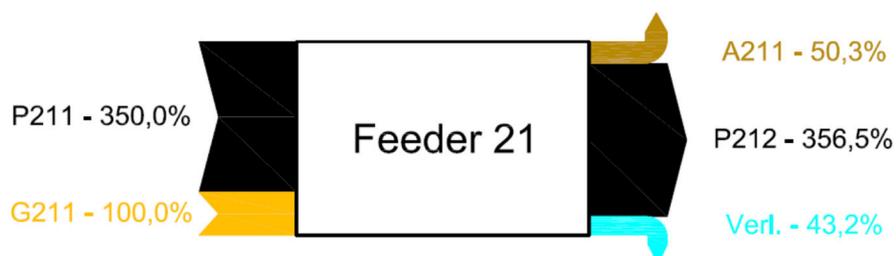


Abbildung 4-15: Leistungsbilanz Feeder 21 in % der Brennstoffwärmeleistung

In **Abbildung 4-16** ist die Leistungsbilanz des Feeders 21 bezogen auf die mit der Glasschmelze ausgetragene Leistung dargestellt. Auch hier stellen die mit den Glasschmelzen transportierten Wärmeströme die größten Leistungsflüsse dar. Aufgrund der geringeren Oberfläche des Feeders 21 gegenüber der Arbeitswanne 2 werden nur 26,2 % der sich in der Glasschmelze befindlichen Wärme über Verluste und Abgasenthalpie an die Umgebung abgegeben. Das führt letztendlich auch zu einem geringeren Brennstoffeinsatz.

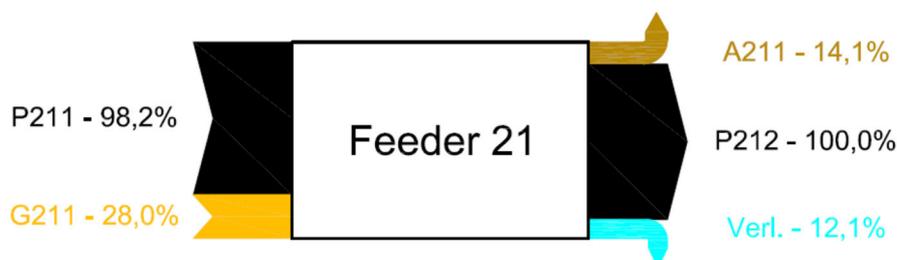


Abbildung 4-16: Leistungsbilanz Feeder 21 in % der Wärme im austretenden Produktstrom

4.4.1.3 Energieinhalt im Abgas von Arbeitswannen und Feeder

Die Bilanzierung von Arbeitswanne 2 und Feeder 21 hat gezeigt, dass ungefähr 50 % der eingesetzten Brennstoffleistung über das Abgas in die Produktionshalle abgegeben wird. Da das in die Halle entweichende Abgas ein großes Abwärmepotential darstellt, wird hier dieses Potential abgeschätzt.

Die Gasverbräuche von Arbeitswanne 2 und Arbeitswanne 4 werden monatlich über Gaszähler abgelesen. Der Gasverbrauch der Feeder wird nur gesammelt, über alle Linien, monatlich erfasst. Die Feeder für Weißglas werden mit einem höheren Sauerstoffgehalt im Erdgas-Luft-Gemisch beheizt, als die Feeder für Braunglas. Somit muss der Erdgasverbrauch der einzelnen Linien abgeschätzt werden. Die Abschätzung beruht auf Erfahrungswerten von Stölzle Oberglas und ist in **Tabelle 4-XIII** dargestellt.

Tabelle 4-XIII: Abschätzung des Erdgasverbrauchs der Feeder

Durchschnittlicher Erdgasverbrauch Feeder			
Weißglas		Braunglas	
Linie	Anteil	Linie	Anteil
21	8%	40	11%
22	8%	41	11%
23	8%	42	12%
24	8%	43	12%
25	8%	44	14%
Gesamt	40%	Gesamt	60%

Mit dieser Abschätzung konnte der Erdgasverbrauch der Feeder auf die jeweiligen Linien aufgeteilt werden. Der Erdgasverbrauch, die Temperaturen des Abgases und der mittlere Sauerstoffgehalt des Erdgas-Luft-Gemisches mit dem das Abwärmepotential des Abgases von Arbeitswannen und Feeder abgeschätzt wird, sind in **Tabelle 4-XIV** dargestellt.

Tabelle 4-XIV: Daten zur Berechnung des Abwärmepotentials von Arbeitswannen und Feeder

Monat	Weißglas			Braunglas		
	Erdgasverbrauch [Nm ³]	T _{AG} [°C]	O ₂ - Gehalt	Erdgasverbrauch [Nm ³]	T _{AG} [°C]	O ₂ - Gehalt
Feb. 2018	208.922	938	19,23%	222.896	896	18,55%
Mär. 2018	213.121	938	19,23%	241.210	896	18,55%
Apr. 2018	218.210	938	19,23%	246.486	896	18,55%
Mai. 2018	228.078	938	19,23%	259.804	896	18,55%
Jun. 2018	219.210	938	19,23%	259.785	896	18,55%
Jul. 2018	203.843	938	19,23%	251.369	896	18,55%
Aug. 2018	203.077	938	19,23%	255.197	896	18,55%

Aus der Verbrennungsrechnung wurden die Massen der Bestandteile des Abgases im Zeitraum von Februar 2018 bis August 2018 berechnet. Über die PPDS Gleichung wurde die spezifische Wärmekapazität dieser Bestandteile bestimmt. Daraus ergab sich die spezifische Wärmekapazität des gesamten Abgasstroms. Über die mittlere Wärmekapazität zwischen der Abgastemperatur beim Austritt aus Arbeitswannen und Feeder und der Zieltemperatur, die das Abgas nach dem Wärmeentzug haben sollte, wurde der Wärmeinhalt des Abgases berechnet.

Der Energieinhalt des monatlich ausgestoßenen Abgases von Arbeitswannen und Feeder, bei einer Zieltemperatur des Abgases von 120 °C, ist in **Tabelle 4-XV** dargestellt. In Summe hat das in einem Monat ausgestoßene Abgas von Arbeitswannen und Feeder einen durchschnittlichen Energieinhalt von 1.850 MWh. Um diesen Wert in Relation zu setzen wurde der bereits vorhandene, im Abgaszug der Glaswannen installierten, Wärmeübertrager betrachtet. Dieser hat im gleichen Betrachtungszeitraum des Vorjahres, d.h. Februar 2017 bis August 2017, im Durchschnitt 1.480 MWh pro Monat an das Fernwärmenetz Köflach abgegeben.

Tabelle 4-XV: Abwärmepotential des Abgases von Arbeitswannen und Feeder

Monatliches Abwärmepotential Arbeitswannen und Feeder	
Weißglas	Braunglas
990 MWh	860 MWh
1.850 MWh	

4.4.2 Rohgaswärmeübertrager

Im bestehenden Abgaszug der Glaswannen wird das Abgas nach den Regeneratoren in einem Sammelkamin gesammelt und in einer Frischluftquenche mit kalter Außenluft abgekühlt, wie in **Abbildung 3-14** dargestellt. Grund dafür ist die maximale Betriebstemperatur des Elektrofilters von 420 °C. Dieses Abkühlen vernichtet nutzbare Energie, da die Temperatur des Abgases im Sammelkamin, je nach Tonnage, 460-530 °C beträgt. Auf Anfrage von Stölzle Oberglas soll nun das Potential eines *Rohgaswärmeübertragers*, der die Frischluftquenche ersetzen soll, bewertet werden. Dieser Rohgaswärmeübertrager soll, wie in **Abbildung 4-17** dargestellt, vor dem Elektrofilter eingesetzt werden, eine bessere Ausnutzung der im Abgas enthaltenen Energie ermöglichen und das Abgas auf 420 °C abkühlen. Der bestehende Wärmeübertrager nach dem Elektrofilter wird in weiterer Folge in dieser Arbeit *Reingaswärmeübertrager* genannt.

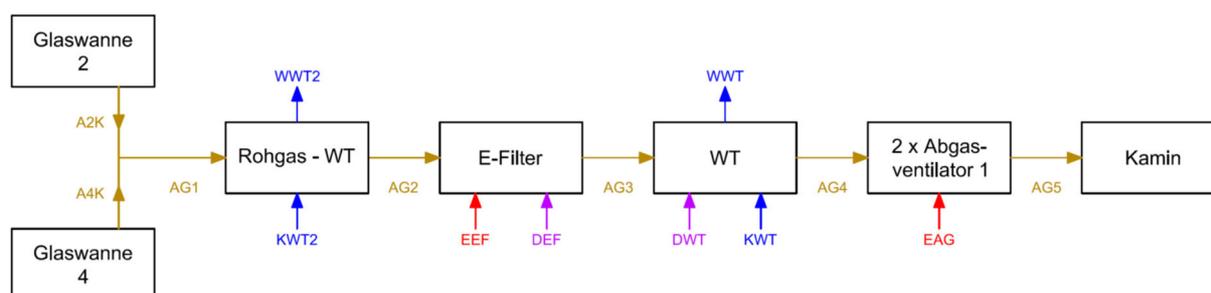


Abbildung 4-17: Abgaszug mit Rohgaswärmübertrager

4.4.2.1 Wärmehalt Rohgas

Die Berechnung der im Rohgas enthaltenen Energie gestaltet sich sehr ähnlich wie die Berechnung des Energieinhalts des Abgases von Arbeitswannen und Feeder. Die Datenlage ist allerdings besser, da die täglichen Gasverbräuche der Glaswannen und die Temperaturen des Abgases nach den Regeneratoren erfasst werden.

Auf Anfrage von Stölzle soll neben dem gesamten Abwärmepotential des Abgases der Glaswannen, auch das zusätzliche Abwärmepotential zu dem bereits genutzten Abwärmepotential des bestehenden Reingaswärmeübertragers berechnet werden. Dafür wird der Wärmehalt des Abgases zwischen der Mischungstemperatur im Sammelkamin und der maximalen Betriebstemperatur des Elektrofilters von 420 °C berechnet. So soll rein rechnerisch der bestehende Reingaswärmeübertrager nicht beeinflusst und der Nutzen des zusätzlichen Rohgaswärmeübertragers bewertet werden. Allerdings ist das nicht ganz richtig, da das Wegfallen der Luftquenche zu einem geringeren Abgasdurchsatz im

Reingaswärmeübertrager und damit zu einer geringeren Leistungsabgabe führt. Als Näherung wird allerdings angenommen, dass sich die abgegebene Leistung im Reingaswärmeübertrager nicht ändert.

In **Tabelle 4-XVI** ist das Ergebnis der Berechnung des zusätzlichen monatlichen Abwärmepotentials bei einer Zieltemperatur von 420 °C und des gesamten monatlichen Abwärmepotentials bei einer Zieltemperatur von 120 °C, ohne Berücksichtigung des Reingaswärmeübertragers, für den Zeitraum von Februar 2018 bis August 2018, dargestellt.

Tabelle 4-XVI: Abwärmepotential des Abgases der Glaswannen

Monatliches Abwärmepotential Glaswannen	
Zieltemperatur	Energieinhalt Abgas
420 °C	384 MWh
120 °C	1.759 MWh

4.4.2.2 Umsetzungskonzept Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager

Das Abgas hat mit 200 mg/Nm³ eine große Staubbelastung. In einem so staubhaltigen Milieu sorgt ein Wärmeübertrager ohne Vorentstaubung für große Probleme durch Anpackungen. Um das Abwärmepotential trotzdem zu nutzen, könnte die bestehenden Abgasleitungen mit einem wasserdurchfluteten Mantelrohr versehen werden. Ein solcher Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager ist mit wenig konstruktivem Aufwand realisierbar und die Gefahr des Verstopfens des Wärmeübertragers ist durch den große Abgasrohrdurchmesser minimal. In diesem Kapitel wird nun das Potential dieses Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager berechnet.

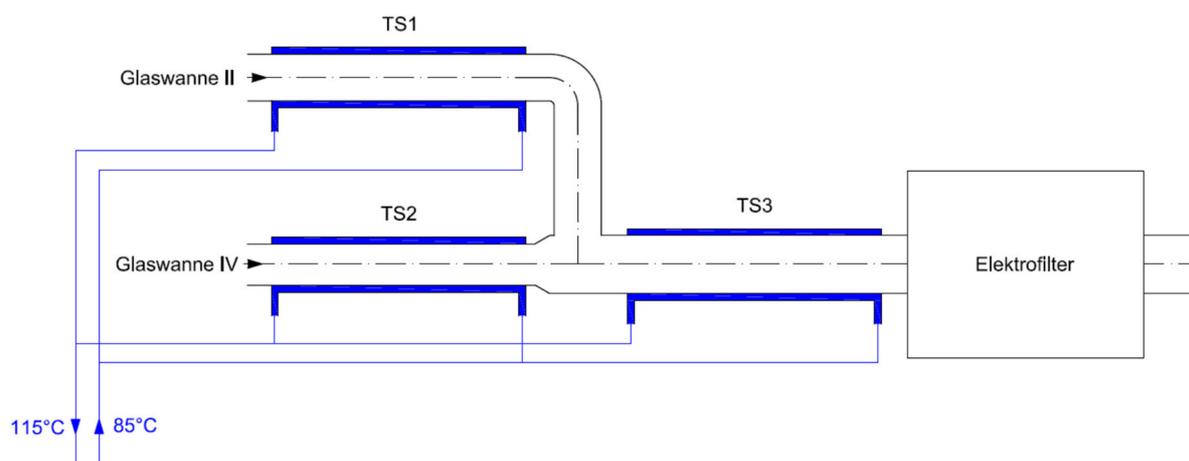


Abbildung 4-18: Schema Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager

Wie in **Abbildung 4-18** ersichtlich, stehen drei Teilstrecken für das Abkühlen des Abgases zur Verfügung. Teilstrecke 1 führt nur das Abgas der Wanne 2, Teilstrecke 2 nur das Abgas der Wanne 4 und Teilstrecke 3 das Abgas beider Wannen.

Die Vorlauf- und Rücklauf-temperatur des Wasserkreislaufes wurden den Temperaturen des bestehenden Wasserkreislaufes des Reingaswärmeübertragers angepasst. Jede Teilstrecke stellt einen Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager im Gegenstrom dar. Die Längen und Außendurchmesser der Teilstrecken sind aus **Tabelle 4-XVII** zu entnehmen. Zur Vereinfachung werden die Teilstrecken als gerade Rohrsegmente ohne Bögen betrachtet.

Tabelle 4-XVII: Teilstrecken Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager

Teilstrecke	Abgas	D_a [m]	Länge [m]
TS1	W2	1,00	22,0
TS2	W4	0,90	15,9
TS3	W2 + W4	1,25	11,0

Um die abgegebenen Leistungen pro Teilstrecke zu berechnen, müssen die Austrittstemperaturen des Abgases von Teilstrecke 1 und Teilstrecke 2 angenommen werden. Die Eingangstemperatur von Teilstrecke 3 ergibt sich als Mischungstemperatur nach **Gleichung 4-19**. Die Austrittstemperaturen des Abgases aus Teilstrecke 1 und Teilstrecke 2 werden so angenommen, dass die im Abgas enthaltene Wärmeleistung in jeder Teilstrecke ungefähr gleich groß ist, bzw. die Endtemperatur von 420 °C nicht unterschritten wird. Der Wärmestrom der dem Abgas pro Teilstrecke entzogen werden kann, wird in **Tabelle 4-XVIII** dargestellt. Die Berechnung wurde mit Durchschnittswerten des Zeitraums Februar 2018 bis August 2018 durchgeführt. Über die Verbrennungsrechnung wurden die Massen- und Volumenströme bei Normbedingungen des jeweiligen Abgasstroms ermittelt. Durch Umformen der **Gleichung 4-39** ergab sich der Volumenstrom bei Betriebsbedingungen. Für die Berechnung des Wärmestroms wurden der Massenstrom, die Temperaturen und die mittlere spezifische Wärmekapazität herangezogen.

Tabelle 4-XVIII: Wärmestrom je Teilstrecke

TS	Abgas								
	d	l	\dot{m}	\dot{V}	\dot{V}	T [°C]		$c_{p,m}$	\dot{Q}
	[m]	[m]	[kg/h]	[Nm ³ /h]	[Bm ³ /h]	Eintritt	Austritt	[kJ/kgK]	[kW]
TS1	1,00	22,0	11.112	8.994	25.853	512	470	1,3922	180
TS2	0,90	15,9	7.071	5.720	15.562	470	420	1,3596	134
TS3	1,25	11,0	18.183	14.714	39.008	451	420	1,3437	210
Summe									524

Nachdem bekannt ist, welcher Wärmestrom dem Abgas entzogen werden kann, muss berechnet werden, ob dies mit dem Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager möglich ist. Dazu wird zunächst der innere Wärmeübergangskoeffizient mit **Gleichung 4-29** bis **Gleichung 4-32** bestimmt. Zur Berechnung werden die Stoffwerte für trockene Luft bei 450 °C herangezogen, welche in **Tabelle 4-XIX** dargestellt sind.

Tabelle 4-XIX: Stoffwerte Luft für Berechnung des inneren Wärmeübergangs [16]

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
kinematische Viskosität	ν	7,256E-05	m ² /s
Wärmeleitfähigkeit	λ	0,0531	W/mK
Prandtl-Zahl	Pr	0,7117	-

Um eine Aussage über die Strömungsbedingungen tätigen zu können, wurde die Wandstärke des Abgasrohres mit 5 mm angenommen. **Tabelle 4-XX** zeigt die Zwischenergebnisse und das Endergebnis für die Berechnung des inneren Wärmeübergangs.

Tabelle 4-XX: Innerer Wärmeübergang

TS	\dot{V} [m ³ /s]	d_i [m]	l [m]	w [m/s]	Re [-]	ζ [-]	Nu_m [-]	α_i [W/m ² K]
TS1	7,18	0,99	22,00	9,33	1,27E+05	1,69E-02	243,99	13,09
TS2	4,32	0,89	15,90	6,94	8,51E+04	1,84E-02	182,20	10,87
TS3	10,84	1,24	11,00	8,98	1,53E+05	1,63E-02	309,65	13,26

Der große Abgasrohrinnendurchmesser ermöglicht nur einen schlechten inneren Wärmeübergang auf das Abgasrohr. Damit ist klar, dass der Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager in dieser Form nicht in der Lage ist, das Abgas auf 420 °C abzukühlen. Um das zu verdeutlichen wird der übertragene Wärmestrom mit einem sehr großen äußeren Wärmeübergangskoeffizient, der mit diesem Wärmeübertrager ohne zusätzliche Einbauten nicht erreicht werden kann und einer hohen Wärmeleitfähigkeit des Abgasrohres berechnet. Damit soll gezeigt werden, dass die Konstruktion des Mantelrohrs keinen Einfluss auf den übertragenen Wärmestrom hat, da der schlechte innere Wärmeübergang der limitierende Faktor ist.

In der Literatur werden typische Werte für Wärmeübergangskoeffizienten für erzwungene Konvektion in Flüssigkeiten mit 5 - 20.000 W/m²K angegeben. Für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten wurde angenommen, dass das Abgasrohr aus Baustahl St 37 besteht, da Baustahl mit 42 W/mK eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit im betrachteten Temperaturbereich, verglichen mit anderen Stahlsorten, hat. [16]

Die nach **Gleichung 4-26** berechneten Wärmeübergangskoeffizienten für die Teilstrecken sind in **Tabelle 4-XXI** dargestellt.

Tabelle 4-XXI: Wärmedurchgangskoeffizient Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager

TS	r_i [m]	α_i [W/m ² K]	λ [W/mK]	r_a [m]	α_a [W/m ² K]	k [W/mK]
TS1	0,495	13,09	42	0,5	20.000	6,47
TS2	0,445	10,87	42	0,45	20.000	4,83
TS3	0,62	13,26	42	0,625	20.000	8,20

Der übertragene Wärmestrom wird mit dem k-Wert, der Länge der Teilstrecke und der logarithmischen Temperaturdifferenz nach **Gleichung 4-27** berechnet. Die logarithmische Temperaturdifferenz wird mit Hilfe von **Gleichung 4-28** ermittelt, wobei für den gesamten Wasserkreislauf die Eintrittstemperatur 85 °C und die Austrittstemperatur 115 °C beträgt. Die Abgastemperaturen können aus **Tabelle 4-XVIII** entnommen werden. Das Ergebnis der Berechnung ist in **Tabelle 4-XXII** dargestellt.

Tabelle 4-XXII: Übertragener Wärmestrom im Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager

TS	k [W/mK]	l [m]	$\Delta\vartheta_m$ [°C]	\dot{Q} [kW]
TS1	6,47	22,0	391	56
TS2	4,83	15,9	345	26
TS3	8,20	11,0	335	30
Summe				112

In Summe wird in allen drei Teilstrecken ein Wärmestrom von 112 kW übertragen. Das entspricht nur knapp 20 % des notwendigen Wärmestroms, um das Abgas auf 420 °C abzukühlen. Somit ist der Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager in dieser Form nicht geeignet um die Frischluftquenche zu ersetzen. Auch konstruktive Maßnahmen auf Seiten des Mantelrohrs würden den übertragenen Wärmestrom nicht beeinflussen, da der limitierende Prozess der niedrige innere Wärmeübergang ist. Der innere Wärmeübergang kann nur durch Aufteilen des Abgasstroms in mehrere Kanäle mit kleineren Querschnitten erhöht werden. Dies erhöht allerdings, aufgrund der hohen Staubbilddung des Abgases, die Gefahr des Verstopfens. Ein problemloser Einsatz eines Rohgaswärmeübertragers ist nur durch eine Vorentstaubung gewährleistet. Allerdings sollte überlegt werden, ob nicht eine Neuplanung des Abgaszugs in Betracht kommt. Wie in den Kapiteln zuvor aufgezeigt wurde, gibt es noch Abwärmepotential von Abgasen, das noch nicht genutzt wird und in einer Neuplanung berücksichtigt werden kann.

4.4.3 Maßnahmenvorschläge zur Steigerung der Energieeffizienz am Standort Köflach

In diesem Kapitel werden Energieeinsparpotentiale, die während des Verfassens der Arbeit entdeckt wurden, vorgestellt.

4.4.3.1 Abgas

Das Abwärmepotential von Abgasen kann mit relativ geringem Aufwand genutzt werden. Aus diesem Grund sind bei Stölzle Oberglas in Köflach drei Punkte hervorzuheben bei denen das Abwärmepotential eines Abgases nicht genutzt wird:

- Abgas von Arbeitswannen und Feeder wird in die Produktionshalle entlassen
- Abgas von Kühlöfen wird in die Produktionshalle entlassen
- Frischluftquenche im Abgaszug von Glaswanne 2 und 4

Das Abwärmepotential des Abgases von Arbeitswannen und Feeder wurde in dieser Arbeit schon genauer betrachtet. Eine erste Abschätzung ergab ein Potential von 1.850 MWh pro Monat. Für die Nutzung dieses Abwärmepotentials werden hier zwei Beispiele genannt. Allerdings sollten noch weitere Maßnahmen erarbeitet werden, da die Nutzung dieses Potentials als sehr wichtig gesehen wird. Zum einen kann das Abgas in Regeneratoren zur Verbrennungsluftvorwärmung für Arbeitswannen und Feeder genutzt werden. Allerdings müssen dabei die derzeit vorhandenen Gasmischstationen entfallen. Aus Sicherheitsgründen ist es nicht zulässig ein Erdgas-Luft-Gemisch vorzuwärmen. Die Verbrennungsluft und das Erdgas können somit erst im Brennerport zusammengeführt werden, so wie es bei den Glaswannen bereits ausgeführt ist. Zum anderen kann das Abgas abgezogen und mit dem Abgas der Glaswannen 2 und 4 zusammengeführt werden, um eine gemeinsame Abwärmenutzung zu ermöglichen. Hier ist aus Sicherheitsgründen besonders Wert darauf zu legen, dass nur das Abgas und keine Falschluff abgezogen wird. Grund dafür ist die zeitweise ölverschmutzte Atmosphäre, die durch verdampfende Trennmittelrückstände an den Formen der IS-Maschinen entsteht. Es ist mit allen Mitteln zu verhindern, dass sich leicht entzündliche Ölflusen im Abgaskanal anlegen.

Für eine Abschätzung des Abwärmepotentials des Abgases der Kühlöfen müssen noch die Abgastemperaturen erhoben werden. Auch für die Nutzung dieses Potentials sollten Maßnahmen erarbeitet werden. Zwei Möglichkeiten wären die Nutzung des Abgases zur Verbrennungsluftvorwärmung und das Zusammenführen mit den anderen Abgasen und gemeinsamen Nutzen des Potentials in einem geeigneten Wärmeübertrager.

Auf den ersten Blick stellt der Ersatz der Frischluftquenche mit einem Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager das am einfachsten abzuschöpfende Abwärmepotential dar. Allerdings ist für den wartungsarmen Betrieb eines Rohgaswärmeübertragers eine Vorentstaubung notwendig. Ein Einbau einer Vorentstaubung und eines Rohgaswärmeübertragers in den Abgaszug von Glaswanne 2 und 4, vor der eigentlichen Entstaubung durch den Elektrofilter, wird nicht empfohlen. Zunächst sollte das gesamte Abwärmepotential durch Abgase im Werk erhoben und abgeklärt werden, welche Möglichkeiten zur Nutzung des Gesamtpotentials vorliegen. Danach kann die Planung des Abgaszugs für das gesamte Abgas mit einer geeigneten Hochtemperaturentstaubung, zum Beispiel durch Keramikfilter, durchgeführt werden.

4.4.3.2 Kühlöfen

Die Kühlöfen werden zurzeit manuell gesteuert. Die Temperaturen für jede Zone in einem Kühlöfen werden von Hand direkt am Kühlöfen eingestellt. Wird eine andere Glasbehälterform produziert, müssen die Zonentemperaturen an die Massen der Glasbehälter angepasst werden. Da dies aber nicht immer der Fall ist, werden teilweise zu hoch eingestellte Zonentemperaturen erst am kalten Ende entdeckt, da die Flaschen dort zu heiß ankommen. Wie schon in **Kapitel 3.3.2** gezeigt, kann eine Reduktion der mittleren Zonentemperatur um 7 °C den Erdgasverbrauch um bis zu 25 % senken. Weitere Aussagen die diese Einsparung bestätigen, können über eine detaillierte Parameteranalyse getroffen werden. Es wird empfohlen eine automatische Regelung zur Zonentemperaturregelung zu integrieren oder das händische Einstellen der Kühlöfentemperatur so in den Arbeitsablauf des Formenwechsels zu integrieren, dass nicht mehr darauf vergessen werden kann.

4.4.3.3 Formenkühlung und Vertiflow

Die Ventilatoren von Formenkühlung und Vertiflow der IS-Maschinen werden ungeregt mit voller Leistung betrieben. Ihr Verbrauch macht 15,8 % des elektrischen Gesamtbedarfs aus. Es ist allerdings nicht sicher ob die Notwendigkeit besteht, die Formen derart stark zu kühlen. Unter Umständen können die Ventilatoren auch geregelt mit einem geeigneten Regelparameter betrieben werden. Eine Möglichkeit stellt die Formtemperatur dar, welche relativ leicht mit einem Thermoelement auf der Formoberfläche erfasst werden kann. Um die Formstabilität der Glasbehälter zu gewährleisten muss die Innenseite der Formen auf ca. 600 °C abkühlen. Auch wenn fertigungsbedingt keine direkte Erfassung der Temperatur der Forminnenseite, möglich ist, kann diese Temperatur über die Wärmetransportgleichung berechnet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Produktionsprozess der Behälterglasherstellung mit allen Aggregaten, die direkt für den Produktionsprozess notwendig sind, dargestellt. Auf dieser Basis wurden alle Energie- und Stoffströme ermittelt und in einem Prozessbild visualisiert. Das ursprüngliche Ziel, eine Energiebilanz über das gesamte heiße Ende zu berechnen, konnte aufgrund der unzureichenden Datenlage nicht erfüllt werden. Deshalb wurde ein Leitfaden entworfen, der beschreibt wie eine solche Energiebilanz berechnet wird. Teil dieses Leitfadens war außerdem eine Auflistung aller noch zu erfassenden Daten. Da nicht bei allen Daten der Aufwand der Erfassung im Verhältnis zum Nutzen steht, wurden diese in einer Prioritätenliste gereiht.

Um das Abwärmepotential des Abgases von Arbeitswannen und Feedern bewerten zu können, wurden die Temperaturen dieser Abgase erfasst. Eine erste Abschätzung ergab ein Potential von 1.850 MWh pro Monat, das dem Abgas entzogen werden kann. Die Berechnung des Abgasmassenstroms wurde dabei auf Basis einer Abschätzung des Erdgasverbrauchs der einzelnen Feeder durchgeführt, da der Verbrauch der Feeder nur gesammelt erfasst wird. Auch die gemessenen Abgastemperaturen bergen Messungenauigkeiten, die auf den Einfluss von Wärmestrahlung zurückzuführen sind. Die Abschätzung des Abwärmepotentials kann verbessert werden, indem die einzelnen Erdgasverbräuche der Feeder erfasst und die Messungen der Abgastemperaturen mit einem Absaugpyrometer wiederholt werden.

Um die Nutzung des gesamten Wärmepotentials der Abgase von Glaswanne 2 und 4 zu ermöglichen, wurde nach Möglichkeiten gesucht, die Frischluftquenche im Abgaszug zu ersetzen. Aufgrund der hohen Staubbelastung des Abgases, kann die Funktion eines Rohgaswärmeübertragers, mit kleinen Abgaskanälen, nur mit einer Vorentstaubung garantiert werden. Darum wurde das Potential eines Rohr-in-Rohr-Wärmeübertragers untersucht. Dieser

könnte in Form eines Mantelrohrs ausgeführt werden, das auf die bestehende Abgasleitung geschweißt wird. Die Gefahr des Verstopfens wäre hierbei durch den großen Abgasrohrdurchmesser nicht gegeben. Allerdings ermöglicht dieser große Durchmesser nur einen sehr schlechten inneren Wärmeübergang, was in dieser Arbeit aufgezeigt wurde. Dadurch wird ein zu geringer Wärmestrom vom Abgas auf das Wasser übertragen und das Abgas wird nicht weit genug abgekühlt um die maximale Betriebstemperatur des Elektrofilters nicht zu überschreiten. Somit musste die Idee des Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager wieder verworfen werden. Zu diesem Zeitpunkt scheint der Ersatz des Elektrofilters, der wegen seiner maximalen Betriebstemperatur die Frischluftquenche erfordert, am erstrebenswertesten. Eine Möglichkeit wäre ein Keramikfilter, der für höhere Temperaturen ausgelegt ist. Allerdings sollte vor der Planung noch das gesamte Potential, der während der Produktion anfallenden Abgase, erhoben und in die Planung miteinbezogen werden.

In dieser Arbeit wurde auch gezeigt, dass eine Reduktion der Temperaturen im Kühllofen zu einer Reduktion des Erdgasverbrauchs führt. Die Zonentemperaturen der Kühlöfen werden zurzeit manuell am Kühllofen eingestellt. Eine Regelung der Zonentemperaturen in Abhängigkeit der Austrittstemperatur der Glasbehälter ist empfehlenswert. Mit Hilfe von Parameterstudien mit dem am TPT entwickelten EPP-Booster kann das Potential dieser möglichen Energieeinsparung bewertet werden.

Die Ventilatoren von Formenkühlung und Vertiflow werden ungeregelt auf voller Leistung betrieben. Die Notwendigkeit der starken Kühlung sollte überprüft werden. Allerdings müssen dazu noch Parameter für die Überprüfung gefunden werden. Einen dieser Parameter könnte die Formentemperatur darstellen, einen weiterer die Temperatur der gefertigten Glasbehälter.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass bei Stölzle Oberglas in Köflach eine bessere Ausnutzung der Abwärmepotentiale möglich ist, vor allem im Bereich der Abwärmenutzung von Abgasen. Um alle Potentiale aufzeigen zu können, sollte in einem nächsten Schritt eine vollständige energetische Bilanzierung des Produktionsprozesses der Glasbehälter erfolgen. Eine Diplomarbeit mit diesem Ziel wurde bereits vom TPT angeboten.

Literaturverzeichnis

- [1] Fachverband der Glasindustrie, Jahresbericht 2017, Wirtschaftskammer Österreich, Wien, 2018
- [2] Trier, W., Glasschmelzöfen, Konstruktion und Betriebsverhalten. Springer, Berlin, 1984
- [3] Wirtschaftskammer Österreich, Glasindustrie Branchendaten, WKO – Stabsabteilung Statistik, Wien, 2018
- [4] Wirtschaftskammer Österreich, Statistisches Jahrbuch 2018, WKO - Stabsabteilung Statistik, Wien, 2018
- [5] Statistik Austria, Gesamtenergiebilanz Österreich 1970 bis 2017 (Detailinformation), http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html, abgerufen am 18.04.2019
- [6] Umweltbundesamt, Elfter Umweltkontrollbericht, Umweltsituation in Österreich, Report, REP-0600, Wien, 2016
- [7] Stölzle Glass Group, Standorte, <https://www.stoelzle.com/de/unternehmen/standorte/#1488710742219-3d1b88e3-6fae>, abgerufen am 06.11.2018
- [8] Umweltbundesamt, Stand der Technik bei der Glasherstellung, Report, REP-0152, Wien, 1999
- [9] Thome´-Kozmiensky, K. (Hrsg.), Recycling von Hohlglas – Technik, Qualität und Wirtschaftlichkeit, in Entsorgung von Verpackungsabfällen. TK-Verlag, Neuruppin, 2014

- [10] Schubert, H., Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik. John Wiley & Sons, Hoboken, 2012
- [11] Fejmert, Fejmert Mixer S, <http://www.fejmert.com/products/fejmert-mixer-s.aspx>
- [12] Metas, Kratzförderer, http://www.metas-gmbh.com/PDF/Metas_Kratzfoerderer.pdf, abgerufen am 21.04.2019
- [13] Delgado Sancho, L., A. Q. Sissa, B. M. Scalet, S. Roudier und M. Garcia Muñoz, Best available techniques (BAT) reference document for the manufacture of glass, Industrial emissions Directive 2010/75/EU: integrated pollution prevention and control, EUR (Luxembourg. Online), Bd. 25786. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2013
- [14] Jebesen-Marwedel, H. u. Brückner, R. (Hrsg.), Glastechnische Fabrikationsfehler, "pathologische" Ausnahmestände des Werkstoffes Glas und ihre Behebung ; eine Brücke zwischen Wissenschaft, Technologie und Praxis, Klassiker der Technik. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011
- [15] Jaschke, B., Glasherstellung, Produkte, Technik, Organisation, Beiträge zur Technikgeschichte für die Aus- und Weiterbildung. Deutsches Museum, München, 1997
- [16] VDI-Wärmeatlas, Mit 320 Tabellen, VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, 2013
- [17] Raupenstrauch, H. und C. Spijker, Technische Thermodynamik, Vorlesungsskriptum, Montanuniversität Leoben, 2018
- [18] Raupenstrauch, H., Wärmeübertragung, Vorlesungsunterlagen, Montanuniversität Leoben, 2013
- [19] Arbeitskreis der Dozenten für Regelungstechnik, Meßtechnik in der Versorgungstechnik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1997
- [20] Müller-Simon, H. und G. Bergmann, HVG-Mitteilung Nr. 2139, IGF/AiF/HVG-Forschungsvorhaben Nr. 15223 N "Nutzung der Verteilerrinnen von IS-Maschinen für die thermische Konditionierung von Glastropfen", Vortrag im Fachausschuss IV der DGG am 12.3.2008 in Würzburg, Würzburg, 2008