




Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Masterarbeit



Energietechnische Betrachtung der
Glashütte Stölzle Oberglas GmbH in
Köflach

Alexander Roschitz, BSc

August 2020

Masterarbeit

Energietechnische Betrachtung der Glashütte Stölzle Oberglas GmbH in Köflach

erstellt am

Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

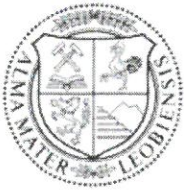
Vorgelegt von:

Alexander Roschitz, BSc
01232069

Betreuer:

Dipl.-Ing. Gregor Berger
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch

Leoben, 19.8.2020



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 15.09.2020

Unterschrift Verfasser/in
Alexander, Roschitz

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Betreuern Dipl.-Ing. Gregor Berger und Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch bedanken, für die Unterstützung und Expertise die zum Gelingen dieser Arbeit maßgebend waren.

Ebenso gilt mein Dank meinen Ansprechpartnern bei Stölzle Oberglas GmbH Dipl.-Ing.(FH) Birgit Schalk, Dipl.-Ing.(FH) Thomas Mayrold und Volker Skrbinjek, die mit ihrem Wissen über das Unternehmen unverzichtbare Informationen mit mir geteilt haben.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und meiner Freundin, die mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben.

Kurzfassung:

Diese Arbeit befasst sich mit der Erstellung der Energiebilanz des heißen Endes des Produktionsbereichs der Glashütte von Stölzle Oberglas GmbH in Köflach, wobei die Vorgehensweise nach der europäischen Energieauditnorm EN 16247-1 erfolgte. Zunächst wurden die Bilanzgrenzen, der Betrachtungszeitraum und die Referenzgrößen festgelegt. Anschließend wurde eine Validierung der Datenlage durchgeführt und vier Messkampagnen zur Ermittlung fehlender Daten erarbeitet und ausgeführt. Es konnten alle für die energietechnische Bilanzierung notwendigen Daten erhoben werden. Die Bilanz des heißen Endes des Produktionsprozesses und des Abgasweges wurden graphisch dargestellt und Besonderheiten aufgezeigt. Des Weiteren wurde ein Sankey-Diagramm zur graphischen Darstellung der energietechnischen Gesamtsituation verwendet. Schlussendlich wurden die Quantität der Abwärme und des Abwärmepotentials des Werkes bestimmt, sowie Einsparungs- und Optimierungspotentiale aufgezeigt.

Abstract:

This work deals with the energy balance of the hot end of the production area of the glassworks Stölzle Oberglas GmbH in Köflach by the approach of the energy audit standard EN 16247-1. Initially the border of the energy balance, the period and reference ratings had been set. After validation of the data situation a measurement campaign to determine missing data was developed and carried out. The balance of the hot end of the production process and the exhaust gas was shown graphically. Further a Sankey diagram was used to show the overall situation. Finally, the quantity of the waste heat as well as the industrial waste heat potential of the plant were determined and optimization potentials were shown.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Inhaltsverzeichnis | II |
| Allgemeine Formelzeichen | V |
| Akronyme..... | VIII |
| Abbildungsverzeichnis | IX |
| Tabellenverzeichnis | XII |
| 1 Einleitung | 15 |
| 1.1 Problemstellung..... | 18 |
| 1.2 Zielsetzung | 19 |
| 2 Theoretische Grundlagen | 20 |
| 2.1 Werkstoff Glas | 20 |
| 2.1.1 Zusammensetzung | 20 |
| 2.1.2 Wärmekapazität von Glas | 23 |
| 2.1.3 Emissionskoeffizient ϵ von Glas | 25 |
| 2.2 Herangehensweise an die Energiebilanz | 26 |
| 2.3 Wärmetechnische Grundlagen..... | 28 |
| 2.3.1 Die Wärmekapazität | 28 |
| 2.3.1.1 Spezifische Wärmekapazität von Abgasen | 29 |
| 2.3.2 Mischung von Fluiden..... | 30 |
| 2.3.3 Die Grundformen der Wärmeübertragung..... | 31 |
| 2.4 Temperaturerfassung | 33 |
| 2.4.1 Thermoelement..... | 33 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.4.2 | Wärmebildkamera..... | 34 |
| 2.5 | Verbrennung von Erdgas | 35 |
| 2.5.1 | Verbrennungsrechnung | 35 |
| 2.5.2 | Brennwert und Heizwert | 38 |
| 2.6 | Ventilatoren | 38 |
| 2.6.1 | Schwerlinienverfahren | 38 |
| 2.6.2 | Technische Arbeit | 40 |
| 3 | Energiebilanz des heißen Endes | 41 |
| 3.1 | Auftaktbesprechung | 41 |
| 3.2 | Datenerfassung | 45 |
| 3.2.1 | Produktionsaggregate | 46 |
| 3.2.1.1 | Wannen & Regeneratoren | 46 |
| 3.2.1.2 | Arbeitswannen und Feeder | 49 |
| 3.2.1.3 | IS-Maschine | 51 |
| 3.2.1.4 | Transportband | 54 |
| 3.2.1.5 | Kühlöfen..... | 56 |
| 3.2.2 | Abgasweg | 58 |
| 3.2.2.1 | Frischluf़tquenche | 59 |
| 3.2.2.2 | Elektrofilter | 59 |
| 3.2.2.3 | Wärmeübertrager..... | 59 |
| 3.2.2.4 | Abgasventilator und Kamin..... | 60 |
| 3.3 | Außeneinsatz..... | 60 |
| 3.3.1 | Verwendete Messgeräte..... | 60 |
| 3.3.1.1 | Thermoelement mit Datenlogger | 60 |
| 3.3.1.2 | Infrarot-Wärmebildkamera | 61 |
| 3.3.1.3 | Flügelradanemometer..... | 62 |
| 3.3.1.4 | Absaugpyrometer | 63 |
| 3.3.2 | 1. Messkampagne – Flaschentemperatur | 67 |
| 3.3.3 | 2. Messkampagne: Wannen-, Formen-, Vertiflow- und Elektrodenkühlung | 70 |
| 3.3.3.1 | Wannenkühlung..... | 70 |
| 3.3.3.2 | Formen- und Vertiflowkühlung..... | 70 |
| 3.3.3.3 | Elektrodenkühlung | 72 |
| 3.3.4 | 3. Messkampagne – Abgastemperatur Arbeitswanne und Feeder | 73 |
| 3.3.5 | 4. Messkampagne – Abgastemperatur Kühlöfen | 75 |
| 3.4 | Analyse des Energieverbrauchs des heißen Endes | 76 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.4.1 | Gesamtverbrauch | 76 |
| 3.4.1.1 | Elektrischer Energieverbrauch | 77 |
| 3.4.1.2 | Erdgasverbrauch | 79 |
| 3.4.2 | Gegenüberstellung der Energiedaten von 2018 und 2019 | 80 |
| 3.4.2.1 | Vergleich Massenstrom | 80 |
| 3.4.2.2 | Vergleich elektrischer Energieverbrauch..... | 80 |
| 3.4.2.3 | Vergleich Erdgasverbrauch | 82 |
| 3.4.3 | Bilanzierung der einzelnen Produktionsaggregate | 83 |
| 3.4.3.1 | Wannen & Regeneratoren | 84 |
| 3.4.3.2 | Arbeitswannen und Feeder | 85 |
| 3.4.3.3 | IS-Maschine | 87 |
| 3.4.3.4 | Transportband | 88 |
| 3.4.3.5 | Kühlöfen..... | 89 |
| 3.4.4 | Bilanzierung des Abgaswegs | 90 |
| 3.4.4.1 | Frischluf़tquenche | 90 |
| 3.4.4.2 | Elektrofilter | 91 |
| 3.4.4.3 | Wärmeübertrager..... | 91 |
| 3.4.4.4 | Abgasventilator und Kamin..... | 92 |
| 3.4.5 | Sankey-Diagramm des heißen Endes..... | 93 |
| 3.4.6 | Spezifischer Energieverbrauch..... | 95 |
| 4 | Abwärmepotentialbestimmung | 97 |
| 4.1 | Arbeitswanne und Feeder | 97 |
| 4.2 | Kühlöfen | 99 |
| 5 | Einspar- und Optimierungspotentiale..... | 101 |
| 5.1 | Glasschmelzwanne 2..... | 101 |
| 5.2 | Elektrodenkühlung | 101 |
| 5.3 | Regeneratoren..... | 102 |
| 5.4 | IS-Maschinen..... | 102 |
| 5.5 | Transportband | 102 |
| 5.6 | Kühlöfen | 103 |
| 6 | Zusammenfassung..... | 104 |
| | Literaturverzeichnis | 106 |
| | Anhang..... | 108 |

Allgemeine Formelzeichen

| | | |
|---------------|---|-----------|
| A | Fläche | m^2 |
| A-G | Koeffizienten für ideale Gase | - |
| a_i | Konstante zur Bestimmung der Wärmekapazität von Glas nach Sharp und Ginther | J/kgK^2 |
| α | Wärmeübergangskoeffizient | W/m^2K |
| α | Absorptionsgrad | - |
| α_s | Absorptionsgrad eines schwarzen Strahlers | - |
| C_0 | Konstante zur Bestimmung der Wärmekapazität von Glas nach Sharp und Ginther | J/kgK |
| C_p | Wärmekapazität bei konstantem Druck | J/K |
| c_p | Wärmekapazität bei konstantem Druck | J/kgK |
| $C_{p,m}$ | molare Wärmekapazität bei konstantem Druck | $J/molK$ |
| C_v | Wärmekapazität bei konstantem Volumen | J/K |
| $C_{v,m}$ | molare Wärmekapazität bei konstantem Volumen | $J/molK$ |
| ΔE_a | Änderung der äußeren Energie | J |
| ε | Emissionsgrad | - |
| H | Enthalpie | J |

| | | |
|------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| H_u | Heizwert | MJ/kg |
| H_o | Brennwert | MJ/kg |
| k_{th} | Thermokoeffizient | V/°C |
| l | Luftmasse | kg |
| λ | Wärmeleitfähigkeit | W/mK |
| λ | Verbrennungsluftverhältnis | - |
| M | Molare Masse | g/mol |
| m | Masse | kg |
| \dot{m} | Massenstrom | kg/s |
| n | Stoffmenge | mol |
| P | Leistung | W |
| p | Druck | bar |
| \dot{Q} | Wärmestrom | W |
| \dot{q} | spezifischer Wärmestrom | W/m ² |
| R | universelle Gaskonstante | J/molK |
| ρ | Dichte | kg/m ³ |
| ρ | Reflexionsgrad | - |
| r_{H_2O} | Wasserkondensationsenergie | kJ/kg |
| R_i | spezifische Gaskonstante | J/K |
| R, r | Radius | m |
| σ | Stefan-Boltzmann-Konstante | W/m ² K ⁴ |
| T | Temperatur | °C |
| T_s | Temperatur eines schwarzen Strahlers | °C |
| τ | Transmissionsgrad | - |
| U | Innere Energie | J |
| U_{th} | Thermospannung | V |
| V | Volumen | m ³ |

| | | |
|------------|---------------------|---|
| W_{diss} | Arbeitsverluste | J |
| w_i | Massenanteil | % |
| W_t | Technische Arbeit | J |
| x_i | Molanteil | % |
| y | Schwerlinienabstand | m |

Akronyme

| | |
|-------------|--|
| ANSI | American National Standards Institute |
| ASPM | Absaugpyrometer |
| AW | Arbeitswanne |
| Bez. | Bezeichnung |
| DIN | Deutsche Industrienorm |
| E-Filter | Elektrofilter |
| EN | Europäische Norm |
| Energiev. | Energieverbrauch |
| EZH | Elektrische Zusatzheizung |
| iAfis | Internet Article DeFects Information System |
| IS-Maschine | Individual Section Maschine |
| m% | Massenprozent |
| Mio. | Millionen |
| M | Monat |
| VDI/VDE | Verein Deutscher Ingenieure und Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik |
| v.Mw. | vom Mittelwert |
| Vent. | Ventilatoren |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1-1: Schema der Behälterglasherstellung [3]..... | 16 |
| Abbildung 1-2: Prozessbild des heißen Endes mit Stoff- und Energieströmen von Stölzle Oberglas GmbH..... | 17 |
| Abbildung 1-3: Legende des Prozessbilds des heißen Endes mit Stoff- und Energieströmen von Stölzle Oberglas GmbH..... | 18 |
| Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Struktur eines SiO ₂ -Netzwerks und eines ungeordneten Kieselglas-Netzwerks (Die vierten Valenzen der Si ragen nach oben oder unten aus der Zeichenebene heraus) [5]..... | 21 |
| Abbildung 2-2: Strukturformel eines binären Glases aus SiO ₂ und Na ₂ O [5]..... | 22 |
| Abbildung 2-3: Dreiphasendiagramm von CaO, Na ₂ O und SiO ₂ [7]..... | 24 |
| Abbildung 2-4: Emissionsreferenzierung von Glasbehältern [3]..... | 26 |
| Abbildung 2-5: Struktur eines EN 16247 Energieaudits [8]..... | 27 |
| Abbildung 2-6: Anordnung der Messpunkte nach dem Schwerlinienverfahren für n=5 Teilflächen [3]..... | 39 |
| Abbildung 3-1: Ausschnitt aus dem Produktionskontrollsystem iAfis – Linie 20..... | 43 |
| Abbildung 3-2: Ströme Glaswanne 2..... | 47 |
| Abbildung 3-3: Ströme Arbeitswanne 2 und Feeder 20..... | 49 |
| Abbildung 3-4: Ströme IS-Maschine 20..... | 51 |
| Abbildung 3-5: Ströme Transportband 20..... | 54 |
| Abbildung 3-6: Ströme Kühlofen 20..... | 56 |
| Abbildung 3-7: Datenlogger ALMEMO 2690-8 [18]..... | 61 |
| Abbildung 3-8: VarioCam hr head Infrarot-Wärmebildkamera [19]..... | 62 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 3-9: testo 416 Flügelradanemometer [20] | 63 |
| Abbildung 3-10: Messaufbau eines Absaugpyrometers [22] | 64 |
| Abbildung 3-11: Aufbau des kühlbaren Absaugpyrometers IFRF und VDI Version [22] | 65 |
| Abbildung 3-12: Ejektor CV 20 [22]..... | 66 |
| Abbildung 3-13: Temperaturabhängigkeit des Emissionskoeffizienten verschiedener Gläser von Stölzle Oberglas GmbH | 68 |
| Abbildung 3-14: Aufnahme eines Behälterglases mittels Infrarot-Wärmebildkamera an Linie 43 | 69 |
| Abbildung 3-15: Absaugpyrometermesspunkte an der Braunglasproduktion | 73 |
| Abbildung 3-16: Durchschnittlicher elektrischer Energieverbrauch in kWh/M..... | 78 |
| Abbildung 3-17: Durchschnittlicher Erdgasverbrauch in Nm ³ /M | 79 |
| Abbildung 3-18: Bilanzierung der Wannen & Regeneratoren..... | 84 |
| Abbildung 3-19: Darstellung der Energieflüsse der Wannen & Regeneratoren in MWh/M .. | 85 |
| Abbildung 3-20: Energiebilanz der Arbeitswannen und Feeder | 86 |
| Abbildung 3-21: Darstellung der Energieflüsse der Arbeitswannen und Feeder in MWh/M. | 86 |
| Abbildung 3-22: Energiebilanz der IS-Maschinen | 87 |
| Abbildung 3-23: Darstellung der Energieflüsse der IS-Maschinen in MWh/M | 88 |
| Abbildung 3-24: Energiebilanz der Transportbänder..... | 88 |
| Abbildung 3-25: Darstellung der Energieflüsse der Transportbänder in MWh/M | 89 |
| Abbildung 3-26: Energiebilanz der Kühltöfen..... | 89 |
| Abbildung 3-27: Darstellung der Energieflüsse der Kühltöfen in MWh/M | 90 |
| Abbildung 3-28: Energiebilanz des E-Filters | 91 |
| Abbildung 3-29: Darstellung der Energieflüsse des E-Filters in MWh/M | 91 |
| Abbildung 3-30: Energiebilanz des Wärmeübertragers..... | 92 |
| Abbildung 3-31: Darstellung der Energieflüsse des Wärmeübertragers in MWh/M | 92 |
| Abbildung 3-32: Energiebilanz des Abgasventilators | 92 |
| Abbildung 3-33: Darstellung der Energieflüsse des Abgasventilators in MWh/M | 93 |
| Abbildung 3-34: Sankey-Diagramm des heißen Endes..... | 94 |

Abbildung 3-35: Spezifischer Verbrauch für den Schmelzvorgang der Glaswanne 2 in Abhängigkeit der Bilanzgrenze96

Abbildung 4-1: Prinzipschaubild eines Regeneratorbrenners [25].....98

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 2-I: Zusammensetzung der Gläser von Stölzle Oberglas GmbH | 22 |
| Tabelle 2-II: Empirisch ermittelte Werte von a_i und C_0 für verschiedene Oxide [6] | 23 |
| Tabelle 2-III: Spezifische Wärmekapazität der ternären Verbindung $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 5\text{SiO}_2$ bestimmt mit HSC Chemistry 5.1 | 25 |
| Tabelle 2-IV: Auflistung der Koeffizienten zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität idealer Gase [11] | 30 |
| Tabelle 2-V: Kenndaten von industriell eingesetzten Thermoelementen [13] | 34 |
| Tabelle 2-VI: Zusammensetzung von Luft [11] | 36 |
| Tabelle 3-I: Gegenüberstellung der Tonnagenaufzeichnungen von Stölzle Oberglas GmbH | 43 |
| Tabelle 3-II: Weißglasmassenstrom aufgeteilt auf Produktionslinien | 44 |
| Tabelle 3-III: Braunglasmassenstrom aufgeteilt auf Linien | 45 |
| Tabelle 3-IV: Vergleich Wanne 2 und Wanne 4 | 47 |
| Tabelle 3-V: Auflistung der Bilanzgrößen der Wanne 2 & Regenerator | 48 |
| Tabelle 3-VI: Auflistung der Bilanzgrößen der Arbeitswanne 2 | 49 |
| Tabelle 3-VII: Auflistung der Bilanzgrößen der Feeder 20 | 50 |
| Tabelle 3-VIII: Glasschmelztemperaturen | 50 |
| Tabelle 3-IX: Gasverbräuche der Arbeitswannen und aller Feeder | 51 |

| | |
|--|----|
| Tabelle 3-X: Auflistung der Bilanzgrößen der IS-Maschine 20 | 52 |
| Tabelle 3-XI: Zuordnung der Stromzähler den IS-Maschinen..... | 53 |
| Tabelle 3-XII: Verbrauch der IS-Maschinen an elektrischer Energie anhand vorhandener Stromzählerdaten | 53 |
| Tabelle 3-XIII: Auflistung der Bilanzgrößen des Transportbands 20..... | 55 |
| Tabelle 3-XIV: Auflistung der Bilanzgrößen eines Kühlofens | 56 |
| Tabelle 3-XV: Gasverbrauch der Kühltöfen..... | 57 |
| Tabelle 3-XVI: Elektrischer Verbrauch der einzelnen Kühltöfen | 58 |
| Tabelle 3-XVII: Fernwärmeauskopplung im Betrachtungszeitraum | 60 |
| Tabelle 3-XVIII: Ausgewählte technische Daten des VairoCAM hr head Thermografiesystems [19]..... | 62 |
| Tabelle 3-XIX: Charakteristische Größen eines testo 416 Flügelradanemometer [20] | 63 |
| Tabelle 3-XX: Technische Daten des VDI Absaugpyrometers [22] | 65 |
| Tabelle 3-XXI: Erforderliche Absaugrate des ASPM in Abhängigkeit der erwarteten Temperatur. [22]..... | 66 |
| Tabelle 3-XXII: Absaugrate in Abhängigkeit des Druckluftverbrauchs [22]..... | 67 |
| Tabelle 3-XXIII: Ergebnisse der Flaschentemperaturbestimmung | 69 |
| Tabelle 3-XXIV: 2. Messkampagne – Wannenkühlung | 70 |
| Tabelle 3-XXV: 2. Messkampagne – Ergebnisse Weißglasformenkühlung | 71 |
| Tabelle 3-XXVI: 2. Messkampagne – Ergebnisse Braunglasformenkühlung..... | 71 |
| Tabelle 3-XXVII: 2. Messkampagne – Elektrodenkühlung | 72 |
| Tabelle 3-XXIX: Messdaten des Absaugpyrometers an der Braunglasproduktion..... | 74 |
| Tabelle 3-XXX: Abgastemperaturen am Eingang der Kühltöfen..... | 76 |
| Tabelle 3-XXXI: Durchschnittlicher Gesamtenergieverbrauch pro Monat..... | 77 |
| Tabelle 3-XXXII: Vergleich Massenstrom 2018 / 2019..... | 80 |
| Tabelle 3-XXXIII: Vergleich durchschnittlicher elektrischer Energieverbrauch pro Monat 2018 / 2019 | 81 |
| Tabelle 3-XXXIV: Vergleich Erdgasdurchschnittsverbrauch pro Monat 2018 / 2019 | 82 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 3-XXXV: Vergleich K hl fenverbr uche 2018 / 2019 | 83 |
| Tabelle 3-XXXVI: Spezifischer Energieverbrauch | 95 |
| Tabelle 4-I: Abgaswerte der Arbeitswannen und Feeder | 97 |
| Tabelle 4-II: Abgaswerte pro Kühlöfen der Weißglas- und Braunglasproduktion..... | 100 |

1 Einleitung

Die Anfänge der künstlichen Glasherstellung werden in Ägypten um 5000 v. Chr. vermutet. Glas gehört damit nach Keramik zu den ältesten von Menschen hergestellten Werkstoffen. Vermutet wird, dass bei der Herstellung von Keramik zufällig kalkhaltiger Quarzsand im heißen Zustand mit Asche, und damit mit Natrium oder Kaliumcarbonat, in Berührung kam und zu Glas geschmolzen ist. Sand, Soda und Kalk sind auch heute noch die wesentlichen Bestandteile von Glas. [1]

Seit dem 19. Jahrhundert hat die Firma Stölzle Oberglas GmbH ihren Hauptsitz in Köflach, im Bezirk Voitsberg. Stölzle produziert Verpackungsglas und hat sich auf die Produktion von Kleinglasverpackungen spezialisiert. Diese Produkte werden in der Pharmaindustrie, Lebensmittelindustrie, Kosmetikindustrie sowie Getränkeindustrie verwendet. Der Standort in Köflach ist der Hauptsitz der Stölzle Glass Group mit weltweit rund 2800 Mitarbeitern, davon rund 460 in Köflach. Zur Gruppe gehören sechs Produktionsstandorte in Österreich, England, Frankreich, Tschechien und Polen sowie drei Dekorationsstätten in England, Frankreich und Polen. [2]

Ein Schema zur Behälterglasherstellung ist in **Abbildung 1-1** dargestellt. Die Rohstoffe werden im Gemengehaus (1) gelagert und im erforderlichen Verhältnis vermischt. Anschließend wird das Gemenge über Förderbänder in die Schmelzwanne (2) befördert und geschmolzen. Über Rinnen (die Arbeitswannen und Feeder bzw. Speiser) wird die Glasschmelze zu den Formgebungsmaschinen (3) transportiert. Diese Individual Section Maschine (IS-Maschine) formt die Schmelze und kühlt diese bis zur Erstarrung. Anschließend werden die gefertigten Behälter über ein Transportband zum Kühllofen transportiert. Im Kühllofen werden die Behälter kontrolliert abgekühlt, um innere Spannungen zu reduzieren. Der Produktionsprozess vom Gemengehaus bis zum Kühllofen wird in der Fachsprache als

„heißes Ende“ bezeichnet. Am „kalten Ende“ des Prozesses findet schlussendlich die Veredelung, die Qualitätskontrolle sowie die Verpackung der fertigen Produkte statt. [3]

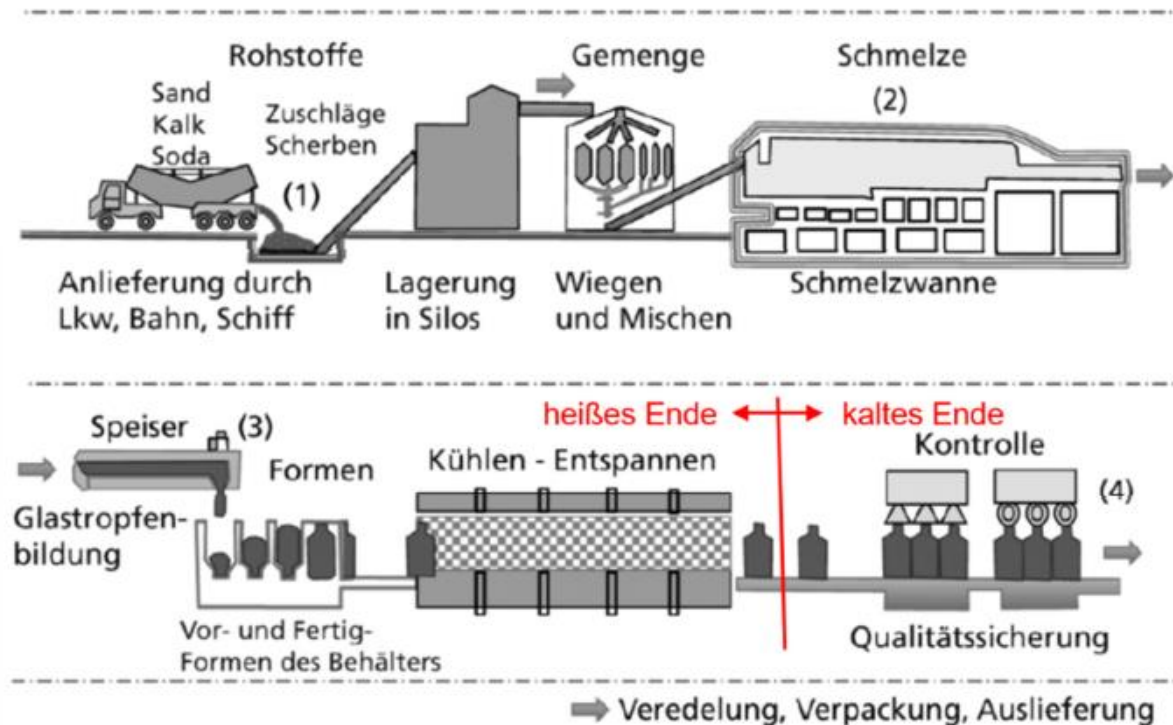


Abbildung 1-1: Schema der Behälterglasherstellung [3]

Stölzle Oberglas GmbH produziert sowohl Weißglas als auch Braunglas in jeweils einer Schmelzwanne. Abhängig von der Auftragslage werden auch Grünglasbehälter anstatt Braunglasbehälter hergestellt. Die Kleinglasbehälter werden in insgesamt elf Linien, fünf für die Braunglas- und sechs für die Weißglasproduktion, hergestellt. Die Produktionslinien mit den entsprechenden Energieströmen sind in **Abbildung 1-2** dargestellt. Zur besseren Lesbarkeit ist die zur Darstellung der zu den Energieströmen gehörige Legende in **Abbildung 1-3** nochmals angeführt.

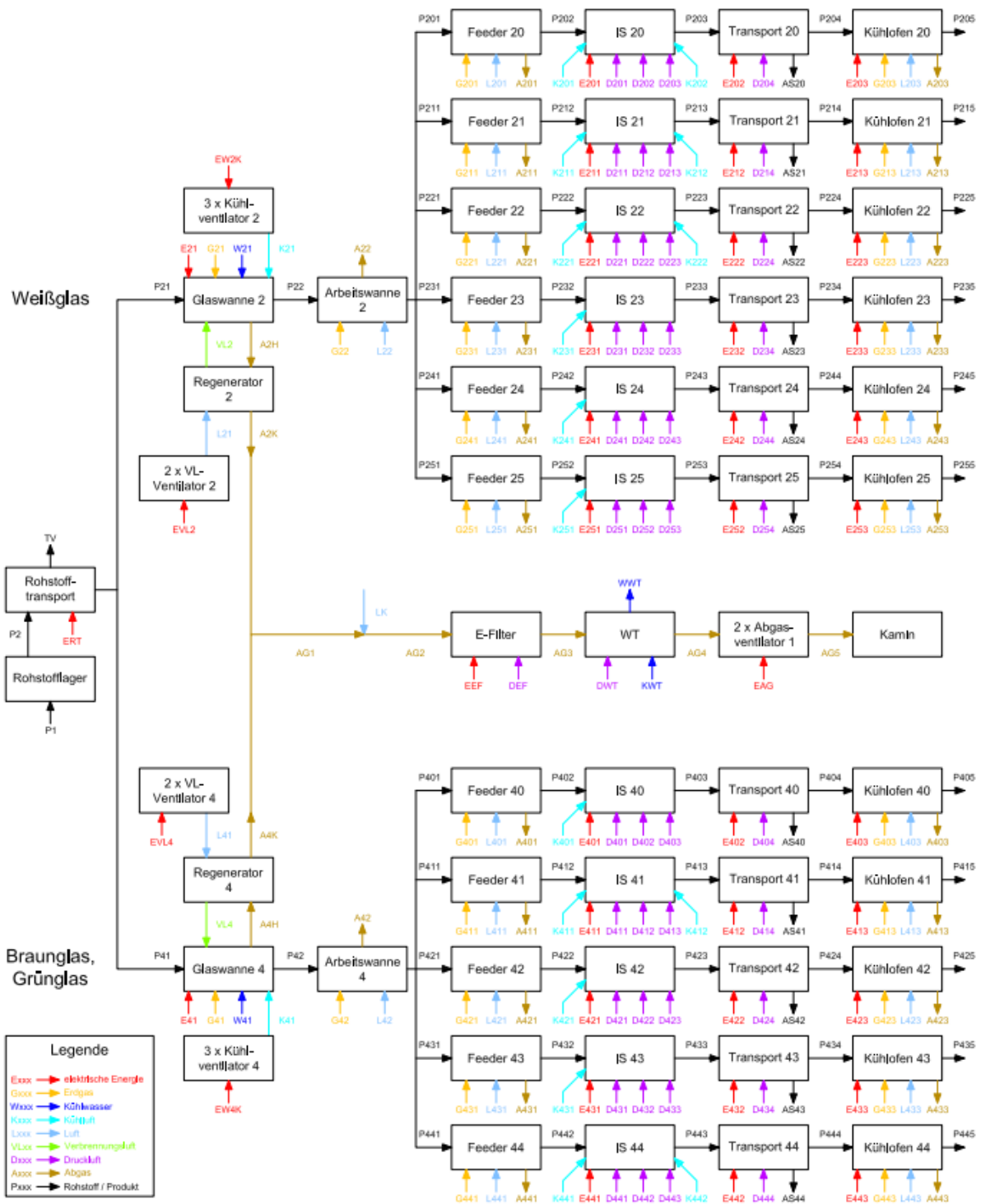


Abbildung 1-2: Prozessbild des heißen Endes mit Stoff- und Energieströmen von Stölze Oberglas GmbH



Abbildung 1-3: Legende des Prozessbilds des heißen Endes mit Stoff- und Energieströmen von Stölzle Oberglas GmbH

1.1 Problemstellung

In Zeiten der anthropogen verursachten Klimakrise werden die Themen Ressourcenschonung und Energieeinsparung omnipräsent diskutiert. Es wurden bereits zahlreiche Richtlinien, Verordnungen und Gesetze aufgrund dessen erlassen. Um Einsparpotentiale und Optimierungsmaßnahmen erheben zu können, muss ein Unternehmen Kenntnis über dessen Energieverbrauch erlangen. Dies geschieht über eine Energiebilanz.

Ingenieure, Ökonomen und Politiker befassten sich in den frühen siebziger Jahren erstmals mit der Energiebilanzierung. Damals wurden oft plakative Vergleiche gezogen. So wurde beispielsweise ermittelt, dass man mit der Bahn mit derselben Energiemenge fünfmal so weit fahren kann wie mit einem Auto. Damals waren noch keine Bedingungen für derartige Vergleiche definiert. Im Laufe der Zeit wurden Energiebilanzierungen immer essenzieller für die Industrie, wodurch die Rahmenbedingungen für die Erstellung solcher Energiebilanzen klarer abgesteckt wurden. [4]

Die von Dipl.-Ing. Gregor Berger erstellte Masterarbeit hat sich bereits mit der energetischen Betrachtung des heißen Endes von Stölzle Oberglas GmbH beschäftigt. Damit bildet die Arbeit von Herrn Berger die Ausgangslage für diese Analyse. In der vorgehenden Arbeit wurde der Produktionsprozess der Behälterglasherstellung mit den direkt für den Prozess benötigten Aggregaten erläutert. Darauf basierend wurden alle Energie- und Stoffströme erfasst und in einem Prozessbild visualisiert. Aufgrund von Mängeln in der Datenlage wurde das ursprüngliche Ziel der Arbeit, die Erstellung einer detaillierten Energiebilanz, verworfen und stattdessen ein Leitfaden für die Erhebung der fehlenden Daten entworfen. Dabei entstand

eine Auflistung aller noch zu erfassenden Daten. Zusätzlich wurde eine Prioritätenliste, welche auf dem Aufwand/Nutzen-Verhältnis der Erhebung dieser Daten basiert, erstellt. [3]

Die Ausgangslage hat sich seit dem Abschluss dieser Arbeit insofern verändert, als dass eine neue Weißglasproduktionslinie (Linie 20) hinzugefügt wurde. Dementsprechend haben sich die Produktionskapazitäten vergrößert.

1.2 Zielsetzung

Im Zuge dieser Masterarbeit soll das Abwärmepotential der Glashütte von Stölzle Oberglas GmbH in Köflach ermittelt werden. Im ersten Schritt soll der energietechnische Status quo des heißen Endes des Produktionsprozesses bestimmt werden. Dafür müssen die vorhandenen Daten des Standortes validiert und fehlende Daten für eine energietechnische Bilanzierung ermittelt werden. In weiterer Folge sollen alle fehlenden thermodynamischen Daten zur Berechnung der Energiebilanz in einer Messkampagne erhoben, aufgenommen und analysiert werden. Auf Basis dieser Daten wird anschließend eine Energiebilanz des Produktionsprozesses erstellt und in weiterer Folge das nutzbare Abwärmepotential ermittelt. Abschließend sollen ein Konzept zur sinnvollen Nutzung des ermittelten Abwärmepotentials vorgeschlagen und Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt werden.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden ausgewählte theoretische Grundlagen, die für diese Arbeit relevant sind, angeführt. Im Hinblick auf darüber hinaus gehende Informationen wird auf einschlägige Fachliteratur verwiesen.

2.1 Werkstoff Glas

Das deutsche Wort „Glas“ ist auf den germanischen Begriff „glasa“ zurückzuführen, welcher „das Glänzende“ bzw. „das Schimmernde“ bedeutet. Glas tritt oftmals glatt, spröde, scharfkantig brechend, durchsichtig und glänzend auf. Mit seiner porenfreien Oberfläche unterscheidet sich das Glas von der körnigen und porösen Struktur einer Keramik. [1]

2.1.1 Zusammensetzung

Bei Glas handelt es sich um keine klar definierte chemische Verbindung, sondern es besteht aus einer Vielzahl von Oxiden. Sand (Siliziumdioxid), Soda (Natriumoxid) und Kalk (Calciumoxid) sind die Hauptbestandteile von Glas. [1]

Laut Definition von Glas im physikalischen Sinn handelt es sich dabei um eine eingefrorene, unterkühlte Flüssigkeit, deren Struktur über die Netzwerkhypothese beschrieben werden kann. Wenn Glas als Flüssigkeit angesehen wird, muss dies bedeuten, dass es als eingefrorene Flüssigkeit eine ungeordnete Struktur hat. Auf dieser Grundlage wurden einige Hypothesen erstellt, die allerdings noch nicht bewiesen werden konnten. Eine der vielversprechendsten Hypothesen ist jene von Zachariasen. Dieser vermutet, dass die Energieunterschiede

zwischen Glas und Kristall derselben Zusammensetzung sehr gering sind. Somit liegen in Gläsern dieselben Bindungszustände oder Struktureinheiten wie in Kristallen vor. Der Unterschied liegt darin, dass in Kristallen eine regelmäßige Anordnung vorliegt, während in Gläsern unregelmäßige Netzwerke auftreten. In **Abbildung 2-1** ist in schematischer Darstellung die Struktur eines geordneten SiO_2 -Netzwerks dem ungeordneten Netzwerk von Kieselglas gegenübergestellt. [5]

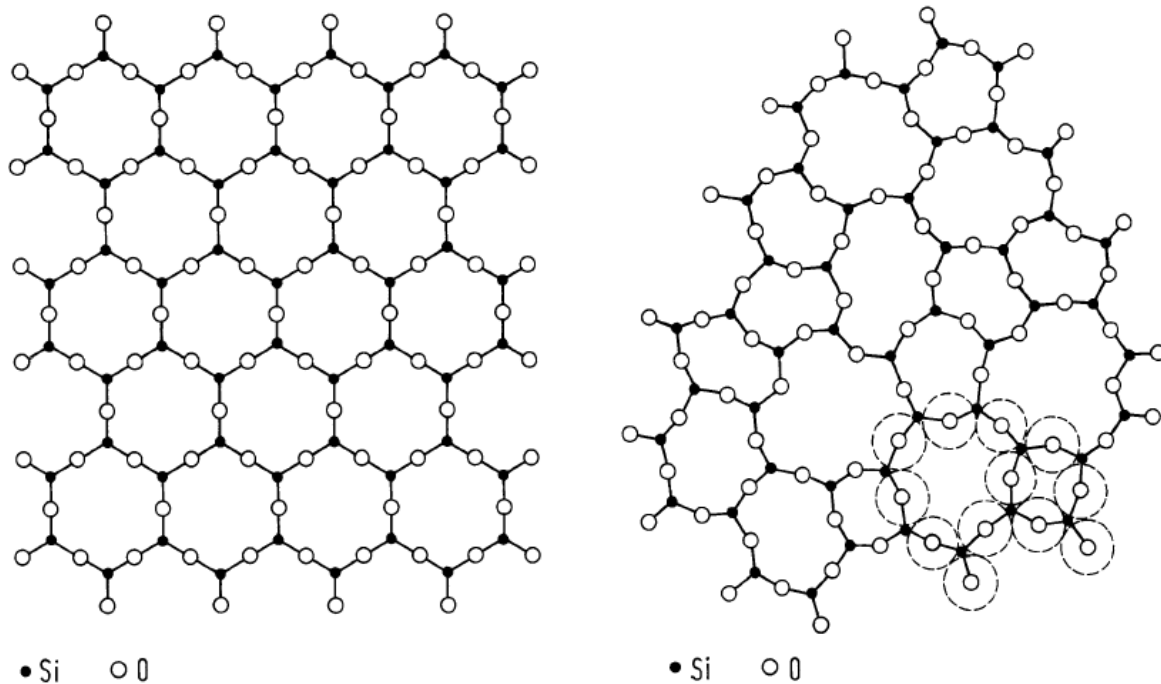


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Struktur eines SiO_2 -Netzwerks und eines ungeordneten Kieselglas-Netzwerks (Die vierten Valenzen der Si ragen nach oben oder unten aus der Zeichenebene heraus) [5]

Basierend auf diesen Überlegungen stellte Zachariasen vier Regeln für die Bildung von Oxidgläsern auf:

1. Die Koordinationszahl des Kations muss klein sein.
2. Ein Sauerstoffion darf an nicht mehr als zwei Kationen gebunden sein.
3. Die Sauerstoff-Polyeder dürfen nur gemeinsame Ecken, nicht gemeinsame Kanten oder Flächen haben.
4. Mindestens drei Ecken jedes Sauerstoff-Polyeders müssen mit anderen Polyedern gemeinsam sein.

Diese Bedingungen werden durch die Oxide vom Typ R_2O_3 , RO_2 und R_2O_5 erfüllt. Dies wird durch das Auftreten von beispielsweise B_2O_3 , As_2O_3 , SiO_2 , GeO_2 oder P_2O_5 in glasiger Form bestätigt.

Warren's Röntgenaufnahmen von Gläsern konnten diese Hypothese ebenfalls bestätigen, weshalb auch oft von der Netzwerkhypothese nach Zachariasen-Warren gesprochen wird. Glasbildung kann auch in binären Systemen auftreten, beispielsweise R_2O-SiO_2 , wobei R für Alkalien steht. Der Einfluss von Alkalioxiden auf die Verbindungsstrukturen ist in **Abbildung 2-2** gezeigt. [5]

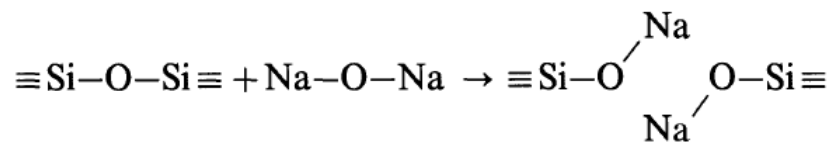


Abbildung 2-2: Strukturformel eines binären Glases aus SiO_2 und Na_2O [5]

Demnach bewirkt die Eingliederung von Na_2O in eine SiO_2 -Struktur eine wesentliche Änderung der Glasstruktur. Der Einbau des Na_2O sprengt den geschlossenen Verband von SiO_2 -Verbindungen auf. Die dadurch entstandenen Trennstellen resultieren in einfach gebundenen O^{2-} -Ionen, sogenannten Trennstellensauerstoffen, anstatt der sonst mit zwei Si^{4+} -Ionen gebundenen O^{2-} -Ionen, den sogenannten Brückensauerstoffen. Somit erzeugt jedes eingeführte Na_2O zwei Trennstellensauerstoffe.

Es ist daher naheliegend Kationen, welche netzwerkbildende Polyeder aufbauen, als Netzworkebildner zu bezeichnen, während Kationen, die das Netzwerk abbauen oder verändern, Netzworkewandler genannt werden. Netzworkebildner sind beispielsweise Si, Ge, B, As und P. Netzworkewandler sind unter anderem die Alkalien und Erdalkalien. [5]

Da viele physikalische Eigenschaften von Glas oder Glasschmelzen von der Zusammensetzung abhängig sind, ist die Zusammensetzung der von Stölzle Oberglas GmbH produzierten Verpackungsgläser in **Tabelle 2-1** angeführt.

Tabelle 2-1: Zusammensetzung der Gläser von Stölzle Oberglas GmbH

| | SiO₂ [m%] | CaO [m%] | MgO [m%] | Na₂O [m%] | K₂O [m%] | Al₂O₃ [m%] | SO₃ [m%] | Fe₂O₃ [m%] |
|------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|--|
| Weißglas | 70,1 | 10,4 | 3,0 | 11,5 | 1,7 | 3,0 | 0,2 | 0 |
| Braunglas | 69,8 | 10,0 | 2,5 | 12,3 | 1,6 | 3,0 | 0 | 0,3 |

2.1.2 Wärmekapazität von Glas

Bei der Wärmekapazität handelt es sich um das Vermögen eines Körpers, Energie in Form von thermischer Energie zu speichern. Sie ist eine essenzielle Größe für diese Arbeit und wird in Kapitel 2.3.1 genauer behandelt. An dieser Stelle wird die quantitative Herleitung der Wärmekapazität von Glas in Abhängigkeit der Temperatur und der Zusammensetzung beschrieben.

Die Wärmekapazität von festem Glas wird in der Publikation von Sharp und Ginther genau analysiert. Dafür wurden bereits veröffentlichte Messdaten sowie Funktionen zur Beschreibung der Wärmekapazität überprüft. Die Publikation leitet die empirisch ermittelte Formel (2.1) her. Mit dieser kann die Wärmekapazität im festen Zustand mit einer Genauigkeit von 1% bestimmt werden. [6]

$$c_p = \frac{\sum w_i (a_i * T + C_0)}{0,00146 * T + 1} \quad (2.1)$$

Dabei entspricht w_i dem Massenanteil der Komponenten. Die Werte für a_i und C_0 sind in **Tabelle 2-II** angeführt.

Tabelle 2-II: Empirisch ermittelte Werte von a_i und C_0 für verschiedene Oxide [6]

| Oxide | a_i [J/kgK ²] | C_0 [J/kgK] |
|--------------------------------|-----------------------------|---------------|
| SiO ₂ | 0,000468 | 0,1657 |
| Al ₂ O ₃ | 0,000453 | 0,1765 |
| CaO | 0,000410 | 0,1709 |
| MgO | 0,000514 | 0,2142 |
| K ₂ O | 0,000335 | 0,2019 |
| Na ₂ O | 0,000829 | 0,2229 |
| B ₂ O ₃ | 0,000625 | 0,198 |
| SO ₃ | 0,00083 | 0,189 |
| PbO | 0,000013 | 0,049 |

Für die Wärmekapazität von Glas im flüssigen Zustand ist dieses Berechnungsmodell nicht anwendbar. Die Bestimmung der Wärmekapazität von flüssigem Glas beruht auf der Näherung der Zusammensetzung durch ein ternäres Oxidsystem von CaO, Na₂O und SiO₂. In **Abbildung 2-3** ist das entsprechende Dreiphasendiagramm abgebildet.

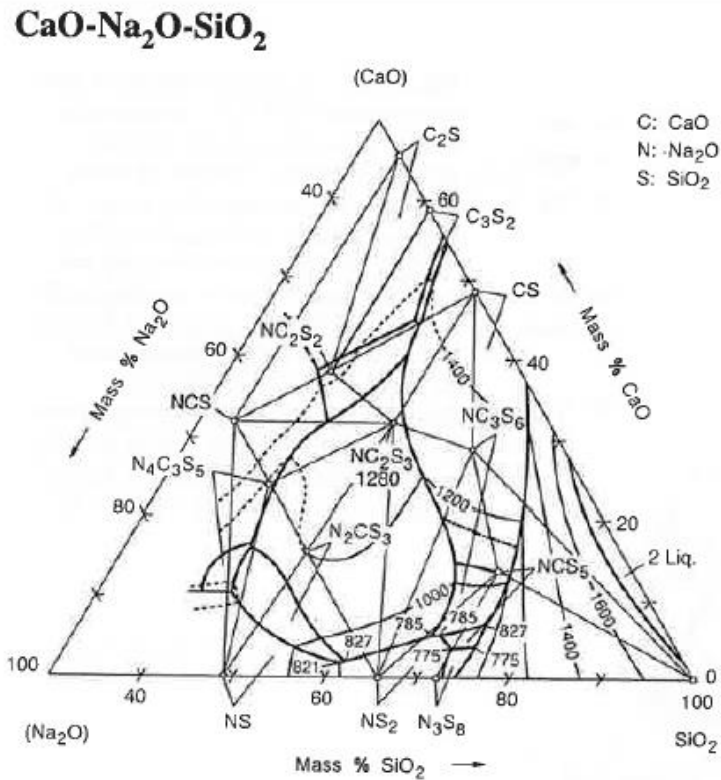


Abbildung 2-3: Dreiphasendiagramm von CaO, Na₂O und SiO₂ [7]

Bei einer Zusammensetzung von SiO₂ 70%, CaO 10% und Na₂O 10% ergibt sich eine Zusammensetzung im Dreiphasendiagramm, welches sich im Bereich des NCS₅-Gefügefilds befindet. NCS₅ steht hierbei für die Verbindung Na₂O*CaO*5SiO₂. Die Molmasse dieser Verbindung beträgt 418,56 g/mol. Daraus wird ein Massenanteil von Na₂O 14,8 m%, CaO 13,4 m% und SiO₂ 71,8 m% bestimmt. Die übrigen Komponenten des Realglases wurden dabei nicht berücksichtigt. Mit dem Simulationsprogramm HSC Chemistry 5.1 wurde die Wärmekapazität für den Temperaturbereich zwischen 800 und 1400°C der soeben hergeleitete Zusammensetzung ermittelt, siehe **Tabelle 2-III**. Dieses Programm beruht auf empirisch ermittelten Literaturwerten und bestimmt den gesuchten Wert durch Interpolation.

Tabelle 2-III: Spezifische Wärmekapazität der ternären Verbindung $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 5\text{SiO}_2$ bestimmt mit HSC Chemistry 5.1

| Temperatur [°C] | C_p [cal/molK] | C_p [J/gK] |
|-----------------|------------------|--------------|
| 800 | 120,65 | 1,206 |
| 900 | 122,63 | 1,225 |
| 1000 | 124,42 | 1,244 |
| 1100 | 126,05 | 1,260 |
| 1200 | 127,55 | 1,275 |
| 1300 | 131,33 | 1,313 |
| 1400 | 132,68 | 1,326 |

In dieser Arbeit werden die spezifischen Wärmekapazitäten bis zu einer Temperatur von 800°C mittels Formel (2.1) bestimmt. Darüber hinaus werden die Werte der Wärmekapazitäten von HSC Chemistry herangezogen. Dafür wurde eine Interpolation für Wärmekapazitäten für nicht angegebene Temperaturen durchgeführt.

2.1.3 Emissionskoeffizient ϵ von Glas

Die Bedeutung des Emissionskoeffizienten ϵ wird in Kapitel 2.3.3 erläutert. Im Allgemeinen ist der Emissionskoeffizient temperaturabhängig und muss experimentell bestimmt werden. Zur Emissionsreferenzierung wird eine präparierte Glasbehälterprobe in einem Ofen kontrolliert erhitzt. Wie in **Abbildung 2-4** dargestellt, wird die Temperatur der Glasprobe mit einem Thermoelement und einem Pyrometer, mit auf den Wert Eins festgelegten Emissionskoeffizienten, gemessen. Aus der Realtemperatur und der Strahlungstemperatur kann der Emissionskoeffizient berechnet werden.

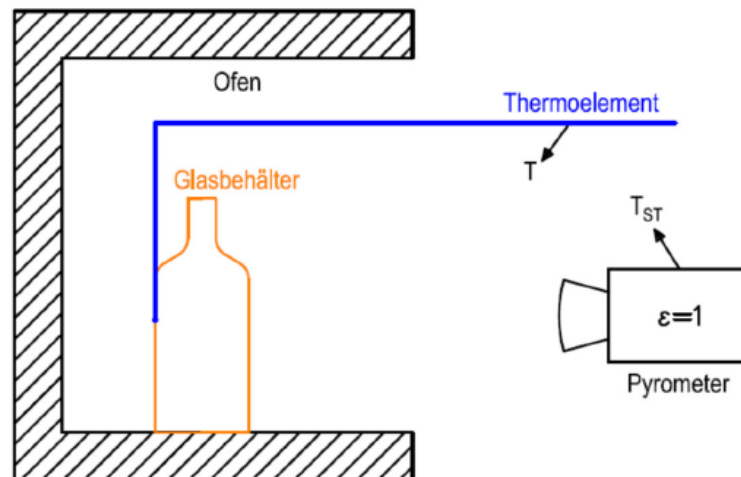


Abbildung 2-4: Emissionsreferenzierung von Glasbehältern [3]

Die Ergebnisse dieser experimentellen Bestimmung des Emissionskoeffizienten sind in Kapitel 3.3.2 erläutert.

2.2 Herangehensweise an die Energiebilanz

Eine Energiebilanz hat die Aufgabe, zugeführte und abgeführte Energie in einem definierten Energiesystem quantitativ darzustellen.

In der europäischen Norm EN 16247 sind die Anforderungen an qualitative Energieaudits festgelegt. Dies soll ermöglichen, dass die Durchführung eines Energieaudits für die systematische Erfassung des Energieeinsatzes der im Betrieb vorhandenen Anlagen, Systeme und Organisationen standardisiert ist. Somit bildet diese Norm eine wichtige Ausgangsbasis für die Optimierung der Energieeffizienz und des Energieverbrauchs der Industrie. Die Norm ist aus folgenden fünf Teilen aufgebaut: [8]

- EN 16247 - Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- EN 16247 - Teil 2: Gebäude
- EN 16247 - Teil 3: Prozesse
- EN 16247 - Teil 4: Transport
- EN 16247 - Teil 5: Kompetenz von Energieauditoren

Der erste Teil der Norm beinhaltet die allgemeinen Anforderungen und Qualitätskriterien, welche für alle Unternehmen, unabhängig von deren Branche oder Größe, einsetzbar sind. Außerdem sind auch allgemeine Anforderungen bezüglich der Qualifikation von Energieauditoren sowie der Ausführung des Audits und der anschließenden Berichterstattung

festgelegt. Die einzuhaltende Vorgehensweise eines solchen Energieaudits ist in **Abbildung 2-5** dargestellt. Die vorliegende Arbeit orientiert sich an dieser Struktur. [8]

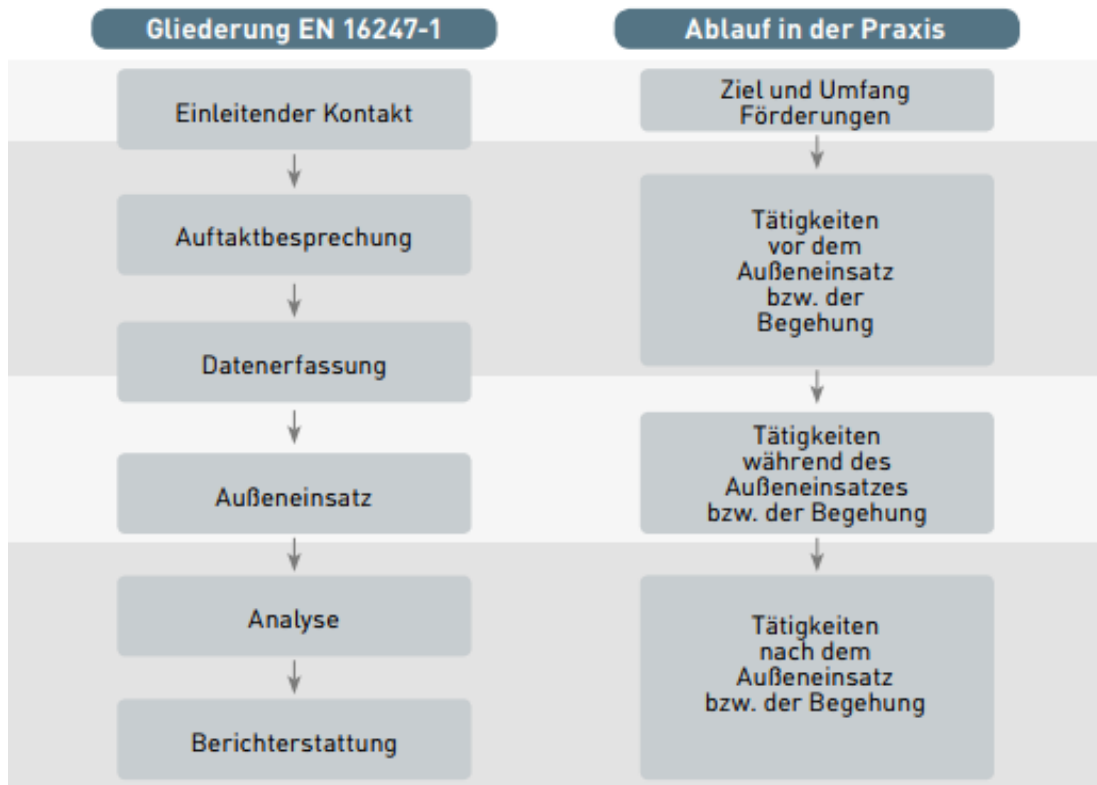


Abbildung 2-5: Struktur eines EN 16247 Energieaudits [8]

Einleitender Kontakt: Zunächst gilt es, alle Rahmenbedingungen sowie den Umfang des Audits zu bestimmen. Die Ziele und Erwartungen sind mit den Verantwortlichen des Unternehmens zu erfassen und die Kriterien, die für die Effizienzmaßnahmen entscheidend sind, müssen definiert werden.

Auftaktbesprechung: Die benötigten Daten, die Anforderungen an die Messungen und die Herangehensweise an das Audit sind vom Auditor vorzugeben. Des Weiteren ist die genaue Durchführung zu besprechen. Dies inkludiert, dass dem Auditor vom Unternehmen ein kompetenter Ansprechpartner zur Seite gestellt wird.

Datenerfassung: In diesem Schritt macht sich der Energieauditor mit den vom Unternehmen bereitgestellten Daten, in denen idealerweise auch Informationen zu den bereits durchgeführten Energieeffizienzmaßnahmen enthalten sind, vertraut. Zudem sind auch alle Wirtschaftsdaten sowie Konstruktions-, Betriebs- und Wartungsdokumente der Anlagen relevant.

Außeneinsatz: Die Anlage muss vom Auditor begangen werden, um weitere benötigte Daten und Informationen zu erfassen. Um erste Verbesserungsvorschläge machen zu können, müssen die Arbeitsabläufe sowie ihre Wirkung auf den Energieverbrauch ausführlich untersucht werden.

Analyse: In dieser Phase wird der Ist-Zustand festgestellt und der Energieverbrauch aufgegliedert. Beide Arbeitsschritte sind Grundlage für das Auffinden von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und Optimierung des Energieverbrauchs. Wenn Annahmen getroffen wurden, müssen diese zusammen mit der Berechnungsmethode und der Zuverlässigkeit der verwendeten Daten veranschaulicht und erklärt werden.

Berichterstattung: Die abschließende Dokumentation muss klar und eindeutig nachvollziehbar sein. Diese kann unter anderem allgemeine Informationen zum Hintergrund, eine Liste der möglichen Verbesserungen mit Empfehlungen und Plänen zur Umsetzung, Annahmen, Vorschläge für anwendbare Nachweisverfahren, mögliche Wechselwirkungen sowie Informationen über anwendbare Zuschüsse, eine geeignete Wirtschaftlichkeitsanalyse, eine Zusammenfassung und eine Schlussfolgerung enthalten. [8]

2.3 Wärmetechnische Grundlagen

Im Folgenden werden ausgewählte Grundlagen zum Themengebiet der Wärmetechnik und der Thermodynamik behandelt.

2.3.1 Die Wärmekapazität

Mit steigender Temperatur nimmt die Innere Energie U eines Stoffes zu. Das Ausmaß der Zunahme hängt von den Bedingungen ab, unter denen die Erwärmung stattfindet. Trägt man die Innere Energie bei konstantem Volumen gegen die Temperatur in einem Diagramm auf, erhält man eine nichtlineare Kurve. Die Steigung dieser Kurve bei einer spezifischen Temperatur wird als Wärmekapazität bei konstantem Volumen c_V eines Stoffes beschrieben. Diese Steigung ist in Formel (2.2) mathematisch beschrieben.

$$c_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \quad (2.2)$$

Bei steigender Temperatur eines Stoffes steigt auch seine Enthalpie H . Der Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Enthalpie hängt von den Bedingungen, beispielsweise Volumen- oder Druckkonstanz, ab. Praktische Relevanz hat Großteils die Bedingung bei

konstantem Druck. Trägt man die Enthalpie gegen die Temperatur auf, so erhält man eine nichtlineare Kurve, deren Steigung bei einer spezifischen Temperatur der Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p entspricht. Mathematisch ist dieser Zusammenhang durch Formel (2.3) beschrieben. [9]

$$c_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (2.3)$$

Die Wärmekapazität bei konstantem Druck ist in Analogie zur Wärmekapazität bei konstantem Volumen definiert. Es handelt sich jeweils um extensive Größen. Die dazu entsprechenden intensiven Größen sind die molare Wärmekapazität bei konstantem Druck $c_{p,m}$ bzw. jene bei konstantem Volumen $c_{v,m}$. [9]

Wird ein Körper aufgewärmt, ergibt sich die aufgenommene Wärmestrom laut Formel (2.4). Der Wärmestrom \dot{Q} ist die in einer Zeit übertragene Wärmemenge.

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * (T_2 - T_1) \quad (2.4)$$

Dabei entspricht c_p der spezifischen Wärmekapazität des Mediums bezogen auf die Masse, T_2 der Temperatur des Körpers nach dem Temperaturwechsel und T_1 der Temperatur zuvor. [10]

2.3.1.1 Spezifische Wärmekapazität von Abgasen

Wird in dieser Arbeit von der spezifischen Wärmekapazität gesprochen, ist immer von der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck die Rede. Die sogenannte PPDS-Gleichung beschreibt die spezifische Wärmekapazität von idealen Gasen wie folgt:

$$c_p = R_i \left[B + (C - B) \left(\frac{T}{A + T} \right)^2 \left[1 - \frac{A}{A + T} \left(D + E \frac{T}{A + T} + F \left(\frac{T}{A + T} \right)^2 + G \left(\frac{T}{A + T} \right)^3 \right) \right] \right] \quad (2.5)$$

Wobei R_i der spezifischen Gaskonstante eines Gases entspricht und über die universelle Gaskonstante R mit 8,314 J/(mol K) und die Molmasse M_i bestimmt wird.

$$R_i = \frac{R}{M_i} \quad (2.6)$$

Die Koeffizienten A bis G entsprechen empirisch ermittelten Werten und können aus **Tabelle 2-IV** entnommen werden.

Tabelle 2-IV: Auflistung der Koeffizienten zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität idealer Gase [11]

| Gas | CH ₄ | O ₂ | N ₂ | Ar | CO ₂ | H ₂ O |
|-------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------|-----------------|------------------|
| A | 1530,8043 | 2122,2098 | 432,2027 | 0,00 | 514,5073 | 706,3032 |
| B | 4,2038 | 3,5302 | 3,5160 | 2,50 | 3,4923 | 5,1703 |
| C | -16,615 | -7,1076 | 2,8021 | 2,50 | -0,9306 | -6,0865 |
| D | -3,5668 | -1,4542 | -4,1924 | 0,00 | -6,0861 | -6,6011 |
| E | 43,0563 | 30,6057 | 42,0153 | 0,00 | 54,1586 | 36,2723 |
| F | -86,5507 | -83,6696 | -114,2500 | 0,00 | -97,5157 | -63,0965 |
| G | 65,5986 | 79,4375 | 111,1019 | 0,00 | 70,9687 | 46,2085 |
| Molmasse [kg/kmol] | 16,04 | 31,998 | 28,01348 | 39,95 | 44,0098 | 18,015275 |

Die spezifische Wärmekapazität eines Gemisches idealer Gase wird mit Hilfe der Formel (2.8) bestimmt. [3]

2.3.2 Mischung von Fluiden

Bringt man zwei Fluide in Kontakt, so stellt sich nach einiger Zeit ein thermodynamisches Gleichgewicht ein. Die Gleichgewichtstemperatur oder Mischtemperatur T_m kann mit Hilfe der Formel (2.7) bestimmt werden. Die Voraussetzung für die Anwendung dieser Formel ist, dass kein Aggregatzustandswechsel auftritt und es sich um ein abgeschlossenes System handelt (Energieerhaltung).

$$T_m = \frac{m_1 * c_1 * T_1 + m_2 * c_2 * T_2}{m_1 * c_1 + m_2 * c_2} \quad (2.7)$$

Die Wärmekapazität einer Mischung lässt sich wie folgt bestimmen:

$$c_{p,gem} = \sum_i \frac{m_i}{m_{ges}} c_{p,i} \quad (2.8)$$

2.3.3 Die Grundformen der Wärmeübertragung

Ein essenzieller Teil der Thermodynamik ist die Wärmeübertragung, welche sich mit der genauen Untersuchung und Beschreibung von Wärmetransportvorgängen beschäftigt. Diese werden immer durch einen Temperaturunterschied hervorgerufen. Man unterscheidet drei Arten von Wärmetransporten: Wärmeleitung, konvektiver Wärmeübergang und Wärmestrahlung. Der Wärmetransport teilt sich, je nach Gegebenheiten, auf bis zu drei Wärmetransportvorgänge auf, ist aber nur in den wenigsten Fällen allein auf eine Art zurückzuführen.

Unter *Wärmeleitung* versteht man den Wärmetransport durch die Teilchen eines Festkörpers oder eines unbewegten Fluids, hervorgerufen durch einen Temperaturgradienten. Aus dem Fourier'schen Gesetz kann der eindimensionale Wärmestrom durch eine ebene Wand wie folgt definiert werden:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda * A}{L} (T_1 - T_2) \quad (2.9)$$

Wobei λ der Wärmeleitfähigkeit des Materials und L der Dicke der Wand entspricht.

Bei der *Konvektion* erfolgt der Wärmetransport durch die Überlagerung zweier Vorgänge: einerseits durch Wärmeleitung und andererseits durch die Teilchenbewegung des Mediums. Das bedeutet, dass Konvektion nur in bewegten, fluiden Medien auftreten kann. Man unterscheidet zwischen erzwungener Konvektion, bei der die Fluidbewegung durch äußere Einwirkungen wie Gebläse oder Pumpen hervorgerufen wird, und freier Konvektion, bei der die Fluidbewegung nur durch Wärmeübertragung und die daraus resultierenden Temperatur- und Dichteunterschiede im Medium hervorgerufen wird. Der Wärmetransport zwischen einem Fluid und einer Wand wird als Wärmeübergang bezeichnet und ist durch das Newton'sche Gesetz beschrieben:

$$\dot{Q} = \alpha * A (T_{Fluid} - T_{Wand}) \quad (2.10)$$

Somit ist der Wärmeübergangskoeffizient α eine elementare Kenngröße der Konvektion.

Bei der *Wärmestrahlung* erfolgt der Energietransport durch elektromagnetische Wellen. Elektromagnetische Wellen benötigen kein Trägermedium, weswegen Energie durch Wärmestrahlung auch im Vakuum transportiert werden kann. Daher ist Wärmestrahlung, im Gegensatz zu Wärmeleitung und Konvektion, nicht stoffgebunden. Trifft Wärmestrahlung auf einen Körper, wird diese teilweise absorbiert, wodurch sich der Körper erwärmt, während der Rest der Wärmestrahlung reflektiert oder transmittiert wird. Der absorbierte Anteil wird durch den Absorptionsgrad α , der reflektierte Anteil durch den Reflexionsgrad ρ und der

transmittierte Anteil durch den Transmissionsgrad τ ausgedrückt. Dabei gibt jeder Parameter an, welcher Anteil der einfallenden Strahlung absorbiert, reflektiert oder transmittiert wird. Aufgrund der Energieerhaltung gilt: [10]

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.11)$$

Ein schwarzer Strahler ist ein Körper, welcher die gesamte eintreffende Strahlung absorbiert. An ihm treten weder Reflexion noch Transmission auf. Es gilt daher:

$$\alpha_S = 1 \quad (2.12)$$

Ein schwarzer Strahler strahlt bei jeder Wellenlänge die maximal mögliche Energie ab. Körper, welche nicht dem Ideal entsprechen und damit weniger Strahlung emittieren, werden graue Strahler genannt. Der Emissionsgrad ϵ gibt das Verhältnis des realen Abstrahlwerts zu dem des schwarzen Strahlers an. Er liegt zwischen Null und Eins und ist nur von der Wellenlänge λ und der Temperatur T abhängig. [12]

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschreibt den Wärmefluss durch Strahlung eines schwarzen Strahlers:

$$\dot{Q}_S = \sigma * A * T_S^4 \quad (2.13)$$

Wobei σ die Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,670 * 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$) bezeichnet und T_S die Temperatur des Strahlers in Kelvin. Es besagt, dass die spezifische Ausstrahlung des schwarzen Körpers proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur ist. Dies ist in weiterer Folge der Grund, weshalb Wärmestrahlung bei Hochtemperaturprozessen eine große Rolle spielt. Für graue Strahler muss das Gesetz von Stefan Boltzmann mit dem Emissionskoeffizienten ϵ erweitert werden.

$$\dot{Q}_G = \epsilon(T) * \sigma * A * T^4 \quad (2.14)$$

Setzt man Formel (2.13) und Formel (2.14) gleich, so erhält man einen Zusammenhang für den Emissionskoeffizienten, welcher das Verhältnis der Ausstrahlung bei einer bestimmten Temperatur T zur Ausstrahlung eines schwarzen Körpers mit der gleichen Temperatur darstellt. Die Temperatur ist dabei in Kelvin einzusetzen. [10]

$$\epsilon(T_S) = \frac{T_S^4}{T^4} \quad (2.15)$$

Wurde die Temperatur eines grauen Strahlers mit einem $\varepsilon = 1$ bestimmt, kann bei bekanntem realen Emissionskoeffizienten die tatsächliche Temperatur wie folgt bestimmt werden:

$$T = \sqrt[4]{\frac{T_s^4}{\varepsilon(T_s)}} \quad (2.16)$$

2.4 Temperaturerfassung

Zur Temperaturerfassung bieten sich eine Reihe von Sensoren an. Grundsätzlich lassen sich in Messen mit Kontakt und berührungsloses Messen unterteilen. Für diese Arbeit wurden Thermoelemente und eine Wärmebildkamera eingesetzt.

2.4.1 Thermoelement

Die Temperaturmessung mittels Thermoelements beruht auf dem Seebeck-Effekt. Der Ursprung dieses thermoelektrischen Effektes liegt in der Bindung zwischen den Metallatomen, insbesondere der frei beweglichen Elektronen. Wird ein Metalldraht betrachtet, sind die Elektronen darin gleichmäßig verteilt und führen eine ungeordnete Wärmebewegung aus. Der Betrag der mittleren Geschwindigkeit der Elektronen hängt von der Temperatur ab. Je wärmer der Körper ist, desto schneller ist die thermische Bewegung der Elektronen. Wird ein Ende erhitzt, dann liegt dort eine höhere mittlere Geschwindigkeit und ebenfalls eine höhere Energie vor. Somit haben die Elektronen, welche sich von warm nach kalt bewegen, eine höhere Energie als jene, die von kalt nach warm laufen. Der mittlere Geschwindigkeitsvektor zeigt somit immer zum kalten Ende. Dies führt zu einer ungleichen Ladungsverteilung zwischen den beiden Drahtenden. Es hat sich eine elektrische Spannung entlang des Leiters gebildet. Diese Spannung wird auch Seebeck-Spannung genannt.

Würde man einen einfachen Draht zur Temperaturmessung einer Wärmequelle verwenden, würde sich der Draht durch die ausgeprägte Wärmeleitung in Metallen gleichmäßig erwärmen. Aufgrund der fehlenden Temperaturdifferenz zwischen den Enden wäre demnach keine Thermospannung messbar. Aus diesem Grund benötigt man zwei unterschiedliche Metalle, die sich in der Stärke des Seebeck-Effektes unterscheiden. Die unterschiedlichen Drähte werden an einem Ende leitend miteinander verbunden. An der Verbindungsstelle wird die zu messende Temperatur erfasst. Die jeweils anderen Enden führen zur sogenannten Vergleichs- oder Referenzstelle, deren Temperatur in der Regel die Umgebungstemperatur ist. Die vom Messgerät erfasste Spannung, die sogenannte Thermospannung U_{th} , ist proportional zur

Temperaturdifferenz zur Verbindungsstelle. Der Wert der Thermospannung liegt im Allgemeinen bei wenigen Millivolt. Der Proportionalitätsfaktor wird als Thermokoeffizient k_{th} bezeichnet.

$$U_{th} = k_{th} * \Delta T \quad (2.17)$$

Mit Thermoelementen lassen sich Temperaturen von -200 bis rund 2300°C erfassen. Thermoelemente für die industrielle Anwendung sind genormt. Eine Auswahl an Thermoelementen nach DIN 43710 bzw. ANSI wird in **Tabelle 2-V** gezeigt.

Vorteile von Thermoelementen sind relativ kurze Reaktionszeiten, mechanische Robustheit, großer Messbereich, platzsparende Bauweise und kleine Messspitzen. [13]

Tabelle 2-V: Kenndaten von industriell eingesetzten Thermoelementen [13]

| Thermopaarung | Einsatztemp. [°C] | Thermokonstante [µV/K] | ANSI- Kennbuchstabe |
|-------------------|----------------------|---------------------------|------------------------|
| W5 Re - W26 Re | 0...2300 | 16 | C |
| NiCr - Konstantan | -40...900 | 81 | E |
| Fe - Konstantan | -180... 750 | 56 | J |
| NiCr-Ni | -180... 1350 | 43 | K |
| Pt13 Rh – Pt | -50... 1700 | 10 | R |
| Pt10 Rh – Pt | -50... 1750 | 9 | S |
| Cu - Konstantan | -250... 400 | 46 | T |

2.4.2 Wärmebildkamera

Mit einer Wärmebildkamera ist es möglich, Infrarot- bzw. Wärmestrahlungen zu empfangen und diese visuell darzustellen. Jeder Körper mit einer Temperatur über 0 Kelvin (absoluter Nullpunkt) sendet elektromagnetische Strahlung aus. Diese sogenannte Eigenstrahlung ist proportional zur Temperatur des Körpers. Der Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung erstreckt sich von 0,1 bis 100 µm. Somit umfasst sie auch das sichtbare Licht zwischen 0,38 µm (Violett) und 0,78 µm (Rot). Der langwellige Bereich des Spektrums ist Infrarotstrahlung, mit einer Wellenlänge von 0,78 bis 100 µm. Durch die Detektion dieser Strahlung kann auf die Temperatur des Körpers rückgeschlossen werden. [10]

Den Aufbau einer Wärmebildkamera bilden vier wichtige Bestandteile. Die Linsen einer Wärmebildkamera bestehen in der Regel aus einkristallinen Halbleitermaterialien, aber auch Germanium, Germaniumlegierungen oder Zinksalze werden verwendet. Der Detektor befindet sich unmittelbar hinter der Linse. Er ist das Herzstück der Wärmekamera, wobei dafür am häufigsten ein „focal plane array“ verwendet wird. Dabei handelt es sich um einen integrierten Bildsensor mit einer Größe von 20.000 bis 1 Million Pixel. Jeder Pixel ist ein 17×17 bis $35 \times 35 \mu\text{m}$ großes Mikrobolometer. Solche 150 nm dünnen, thermischen Empfänger werden durch Wärmestrahlung innerhalb von 10 ms erwärmt. Diese hohe Empfindlichkeit kann durch eine äußerst geringe Wärmekapazität und eine sehr gute Isolation gegenüber der Umgebung erreicht werden. Die umgewandelten Signale werden dann an die Steuer-Platine weitergeleitet. Diese verarbeitet die Messwerte, um sie im Anschluss an das Display der Wärmebildkamera weiterzuleiten.

Da die erfasste Temperatur eines grauen Strahlers abhängig vom Emissionsfaktor ϵ ist, verfügen Infrarotthermometer oftmals über die Möglichkeit, diesen manuell einzugeben. Die korrigierte Temperatur wird schlussendlich auf dem Display des Messgeräts angezeigt.

Die Vorteile der berührungslosen Temperaturmessung sind die Möglichkeit zur Messung an bewegten bzw. schwer zugänglichen oder sehr heißen Objekten, sehr kurze Mess- und Ansprechzeiten, rückwirkungsfreie Messung, keine Beeinflussung des Messobjektes, zerstörungsfreie Messung, Langlebigkeit der Messstelle sowie kein Verschleiß. [12]

2.5 Verbrennung von Erdgas

Erdgas ist ein brennbares, natürlich entstandenes Gasgemisch. Es tritt häufig zusammen mit Erdöl auf. Erdgas besteht hauptsächlich aus Methan CH_4 und zählt zu den fossilen Energieträgern.

2.5.1 Verbrennungsrechnung

Eine Verbrennung ist eine exotherme, chemische Reaktion, bei der Brennstoff mit Sauerstoff reagiert und dabei Energie in Form von Wärme und Licht frei wird. Der Brennstoff kann für den Ablauf der Reaktion fest, flüssig oder gasförmig vorliegen. Aufgrund der Relevanz für diese Arbeit wird der theoretische Exkurs an dieser Stelle ausschließlich anhand der Verbrennung von Methan CH_4 weitergeführt.

Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen vollständiger und unvollständiger Verbrennung. Bei einer vollständigen Verbrennung ist ausreichend Sauerstoff O_2 vorhanden, um den gesamten im Brennstoff enthaltenen Kohlenstoff C zu oxidieren. [14]



Bei einer unvollständigen Verbrennung steht zu wenig O_2 für die vollständige Reaktion zur Verfügung und es entsteht Kohlenmonoxid CO. Kohlenmonoxid ist ein farbloses, geruchloses und giftiges Gas. [14]



Der minimale Luftbedarf l_{min} zur vollständigen Verbrennung von Erdgas ist somit über die Stöchiometrie bestimmt. Aufgrund der Gefahr lokaler unterstöchiometrischer Verbrennungen wird zumeist ein Verbrennungsluftüberschuss angestrebt. Das Verhältnis der Masse an Verbrennungsluft l und dem minimalen Luftbedarf wird über die Luftverhältniszahl λ ausgedrückt. [14]

$$\lambda = \frac{l}{l_{min}} \quad (2.20)$$

Die Zusammensetzung von Luft ist in **Tabelle 2-VI** gelistet.

Tabelle 2-VI: Zusammensetzung von Luft [11]

| Stoff | Molanteil |
|-------|-----------|
| N_2 | 0,7812 |
| Ar | 0,0092 |
| O_2 | 0,2096 |

Der Molanteil x_i berechnet sich nach Formel (2.21). Einen weiteren wichtigen Quotienten stellt der Massenanteil w_i dar, welcher laut Formel (2.22) berechnet wird. Die beiden Quotienten stehen über Formel (2.23) in Verbindung. [9]

$$x_i = \frac{n_i}{n_{ges}} \quad (2.21)$$

$$w_i = \frac{m_i}{m_{ges}} \quad (2.22)$$

$$x_i = \frac{\frac{w_i}{M_i}}{\sum_{z=1}^Z \frac{w_z}{M_z}} \quad (2.23)$$

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. Zur Bestimmung des Restsauerstoffs im Abgas wird folgende Beziehung verwendet:

$$m_{O_2} = 2 * V_{CH_4}(\lambda - 1) \frac{M_{O_2}}{22,4} \quad (2.24)$$

Die Masse an Stickstoff bzw. Argon im Abgas entspricht der Masse dieser Komponente, die über die Verbrennungsluft in den Verbrennungsprozess eingebracht wird:

$$m_{N_2/Ar} = V_L * x_{N_2/Ar} \frac{M_{N_2/Ar}}{22,4} \quad (2.25)$$

Die Masse an Kohlenstoffdioxid und Wasser im Abgas ergibt sich aus der Verbrennungsgleichung von Erdgas. Demnach entstehen aus einem Mol Erdgas ein Mol Kohlenstoffdioxid und zwei Mol Wasser. Zur Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass das gesamte Erdgas stöchiometrisch verbrannt wird, auch wenn bei reduzierenden Verbindungen unterstöchiometrisch verbrannt wird. Als zweite Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass es sich bei der Verbrennungsluft um trockene Luft handelt. [3]

$$m_{CO_2} = V_{CH_4} \frac{M_{CO_2}}{22,4} \quad (2.26)$$

$$m_{H_2O} = 2 * V_{CH_4} \frac{M_{H_2O}}{22,4} \quad (2.27)$$

Die Gesamtmasse des Abgases, die über einen Zeitraum gebildet wird, wird über die Summation der soeben genannten Komponenten gebildet.

$$m_{Abgas} = m_{O_2} + m_{Ar} + m_{N_2} + m_{CO_2} + m_{H_2O} \quad (2.28)$$

2.5.2 Brennwert und Heizwert

Bei einem Verbrennungsprozess wird chemische Energie freigesetzt, welche entweder als Brennwert oder als Heizwert angegeben wird. Beide Größen werden grundsätzlich auf den Masseneinsatz bezogen.

Der Brennwert, auch oberer Heizwert genannt, ist ein Maß für die in einem Stoff enthaltene thermische Energie. Er gibt jene Wärmemenge an, die freigesetzt wird, wenn der Brennstoff verbrannt und das Verbrennungsgas anschließend auf 25°C abgekühlt wird. Dabei wird der beim Verbrennungsprozess entstandene Wasserdampf kondensiert. Somit ist die Kondensationsenergie ($r_{H_2O} = 24442 \text{ kJ/kg}$) ein Teil des Brennwertes.

Der Heizwert, auch als unterer Heizwert bezeichnet, ist jene Wärmemenge, die bei Verbrennung und anschließenden Abkühlung auf 25°C frei wird, ohne dabei das Verbrennungswasser zu kondensieren. [15]

$$H_u = H_o - r_{H_2O} * m_{H_2O} \quad (2.29)$$

Der Energieeintrag über Erdgas wird wie folgt berechnet:

$$\dot{Q} = \dot{m} * H_u \quad (2.30)$$

Der Heizwert von Methan entspricht 50,409 MJ/kg. [11]

2.6 Ventilatoren

Ventilatoren sind Strömungsmaschinen, welche gasförmige Medien fördern. Sie werden in der Glasproduktion hauptsächlich zur Kühlung verschiedenster Aggregate eingesetzt.

2.6.1 Schwerlinienverfahren

Die über einen Luftstrom abgeführte Wärmemenge wird laut Formel (2.4) berechnet. Um diese zu berechnen ist es notwendig, den Massenstrom an Luft, welcher zur Kühlung aufgewendet wird, zu bestimmen. Das Schwerlinienverfahren nach VDI/VDE 2640 wird zur

Messung von Volumenströmen verwendet. Über die Dichte des Gases kann anschließend der Massenstrom bestimmt werden.

$$\dot{m} = \dot{V} * \rho(T) \quad (2.31)$$

Die Bestimmung des Volumenstroms erfolgt über eine Luftgeschwindigkeitsmessung mittels Flügelradanemometers. Dazu wird die kreisförmige Ansaugöffnung des Ventilators in flächengleiche Kreisringe mit entsprechenden Radien r , welche nach Formel (2.32) berechnet werden, unterteilt. Dabei steht R für den Radius der Ansaugöffnung, n für die Anzahl der Kreisringe und i für den Index. Die Geschwindigkeit des Luftstroms wird auf der entsprechenden Schwerlinie y mit dem Anemometer ermittelt. Der Abstand der Schwerlinie vom Außenkreis wird mit Formel (2.33) bestimmt. In **Abbildung 2-6** sind die Kreisringradien und Schwerlinien für $n=5$ Teilflächen dargestellt. Der Volumenstrom \dot{V} berechnet sich aus dem arithmetischen Mittelwert der gemessenen Geschwindigkeiten, laut Formel (2.34). [3]

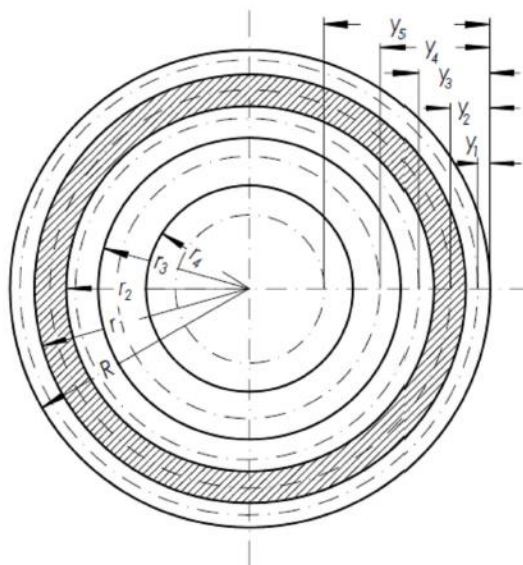


Abbildung 2-6: Anordnung der Messpunkte nach dem Schwerlinienverfahren für $n=5$ Teilflächen

[3]

$$r_i = R * \sqrt{1 - \frac{i}{n}} \quad (2.32)$$

$$y_i = R * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2i-1}{2n}} \right) \quad (2.33)$$

$$\dot{V} = R^2 \pi \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (2.34)$$

2.6.2 Technische Arbeit

Bei einem System, das einen Ventilator bzw. mehrere Ventilatoren beinhaltet, handelt es sich in der Regel um ein offenes System. Offene Systeme tauschen sowohl Energie als auch Materie mit der Umgebung aus. Der Begriff technische Arbeit W_t beschreibt die Wellenarbeit einer Maschine in einem offenen System.

$$W_t = \int V * dp + W_{diss} + \Delta E_a \quad (2.35)$$

Hierbei steht W_{diss} für Verluste und ΔE_a für die Änderung der äußeren Energie, also die Änderung der Summe aus kinetischer und potenzieller Energie. Unter der Annahme, dass nur Volumenänderungsarbeit geleistet wird ($\Delta E_a = 0$) und der Prozess reversibel abläuft ($W_{diss} = 0$) ergibt sich Formel (2.36).

$$W_t = \int V * dp \quad (2.36)$$

Bezieht sich die Arbeit auf die Zeit, in der sie geleistet wird, so erhält man die Leistung P . [16]

$$P = \int \dot{V} * dp \quad (2.37)$$

3 Energiebilanz des heißen Endes

Die Herangehensweise an eine Energiebilanz nach der europäischen Norm EN 16247 ist in Kapitel 2.2 erläutert.

3.1 Auftaktbesprechung

Für eine aussagekräftige und nachvollziehbare Energiebilanz ist es unverzichtbar, klar definierte Bilanzgrenzen zu ziehen. Das Bilanzgebiet wurde in **Abbildung 1-2** dargestellt.

Eine elementare Bezugsgröße stellt die Umgebungstemperatur dar. Diese ist mit 15°C und trockener Luft für diese Arbeit festgelegt.

Die Berechnungsbasis einer Energiebilanz kann aufgrund zweier Parameter festgelegt werden: Betrachtungszeitraum oder Massenstrom des Glases. Der gleichzeitige Bezug einer Energiebilanz auf beide Parameter ist nicht möglich, dennoch stehen sie in einem Abhängigkeitsverhältnis. Beide Parameter haben eine erhebliche Relevanz für ein Unternehmen. In dieser Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf den monatlichen Energieverbräuchen. Der spezifische Energieverbrauch wird ausschließlich in Kapitel 3.4.6 behandelt.

Der Betrachtungszeitraum dieser Energiebilanz erstreckt sich über sechs Monate vom 1.4.2019 bis zum 30.9.2019. Dieser Zeitraum wurde aus mehreren Gründen als repräsentativ und geeignet betrachtet, die anschließend erläutert werden.

- Von Dipl.-Ing. Gregor Berger wurde bereits der Einfluss der jahreszeitlichen Außenbedingungen auf den Energieeinsatz untersucht. Es konnte kein Zusammenhang zwischen den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen und dem Energieverbrauch festgestellt werden. Aus diesem Grund stellt es kein Problem dar, dass der gewählte Zeitraum die kalte Jahreszeit nicht umfasst. [3]
- Es muss sich beim gewählten Zeitraum um eine repräsentative Zeitspanne handeln. Da sechs Monate einen langen Zeitraum darstellen, in dem keine relevanten Ausfälle, Umbauten oder Störfälle verzeichnet wurden, wird diese Anforderung erfüllt.
- Die neue Weißglasproduktionslinie 20 wurde im Februar 2019 in Betrieb genommen. Mitte März waren alle messtechnischen Erfassungen funktionstüchtig installiert. Aus diesem Grund wurde der Beginn des Betrachtungszeitraums mit Anfang April festgelegt.

Der Massenstrom, der in den Wannen geschmolzenen Rohstoffe, von Glas während der gewählten Zeitspanne beträgt rund $175 \text{ t}_{\text{Weißglas}}/\text{Tag}$ und $125 \text{ t}_{\text{Braunglas}}/\text{Tag}$. Die Bezugsgröße Massenstrom ist essenziell für diese Arbeit und wird an dieser Stelle genauer analysiert und ihre Bestimmung aufgezeigt.

Da der Zeitraum bereits klar definiert wurde, können die Massenströme von Glas nicht vollständig auf die produzierten Aufträge bezogen werden. An einem Auftrag wird in der Regel über mehrere Tage produziert. Aus diesem Grund überschreiten Aufträge die bereits definierten zeitlichen Grenzen. Somit muss eine tagesbasierte Massenstromaufzeichnung und keine artikelbezogene Erhebung herangezogen werden. Dafür eignen sich die Aufzeichnungen von Volker Skrbinjek (Daten Wanne 2.xlsx bzw. Daten Wanne 4.xlsx) und das computergestützte Aufzeichnungsprogramm iAfis (Internet Article DeFects Information System). Die Gegenüberstellung der beiden Aufzeichnungen ermöglicht einen Vergleich und eine Verifizierung der Daten sowie die Detektion etwaiger Abweichungen.

Bei iAfis handelt es sich um ein Produktionskontrollsystem für die Herstellung von Behälterglas mit den Aufgaben Datenerfassung, Echtzeitverarbeitung und Datendarstellung. iAfis zeichnet eine Fülle von Daten der einzelnen Produktionslinien auf. In **Abbildung 3-1** ist ein Ausschnitt aus iAfis für die Linie 20 über den Betrachtungszeitraum dargestellt. Die Daten von Herrn Skrbinjek beinhalten Aufzeichnungen über die Tagestonnage der Schmelzwannen der gesamten Weißglas- und Braunglasproduktion.



Abbildung 3-1: Ausschnitt aus dem Produktionskontrollsystem iAfis – Linie 20

Der Unterschied der Aufzeichnungen beider Quellen ist beträchtlich und in **Tabelle 3-1** gegenübergestellt.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der Tonnagenaufzeichnungen von Stölzle Oberglas GmbH

| | iAfis [Tonnen/Tag] | Daten Wanne 2/4 [Tonnen/Tag] | Differenz [Tonnen/Tag] |
|----------------|------------------------------|--|----------------------------------|
| Wanne 2 | 155,3 | 174,8 | 19,5 |
| Wanne 4 | 114,5 | 123,8 | 9,3 |
| Gesamt | 269,8 | 298,6 | 28,8 |

Die Aufzeichnungen weisen eine Abweichung von rund 10% auf. Dies wird zum Teil auf iAfis und dessen fehlendes Erfassungsvermögen des Ausschusses, welcher durch Ausfall einer Station in einer IS-Maschine durch Gebrechen oder Umbauten anfällt und direkt in die Ausschusswanne geleitet wird, zurückgeführt. Weitere bekannte und in einem relevanten Ausmaß auftretende Abweichungen sind verschmutzte optische Sensoren, fehlende Datenerhebungen von eingelagerten bzw. ausgelagerten Produkten auf der Strecke zwischen dem Ausgang des Kühlofens und der Zählleinheit sowie die Hochrechnung der Tonnage aufgrund gemittelter Flaschengewichte und Schnittzahlen.

Aufgrund der genannten Ungenauigkeiten und der daraus resultierenden Abweichungen des Produktionskontrollsystems bilden die Daten von Herrn Skrbinjek die Grundlage dieser Arbeit. Alle weiterführenden Massenströme werden über Prozentsätze, welche sich aus den Daten von iAfis ergeben, und den Gesamtmassenstrom ermittelt. Die Abweichungen der Aufzeichnungen werden als Ausschuss, welcher direkt nach der Tropfenschere und damit bereits in der IS-Maschine entsteht, behandelt. In **Tabelle 3-II** und **Tabelle 3-III** sind die Massenströme inklusive Ausschüsse der einzelnen Linien gelistet. Die Auflistung „Ausschuss Tropfen“ entspricht dem Ausschuss während Umbauarbeiten an der IS-Maschine und die Auflistung „Ausschuss IS-Maschine“ dem Ausschuss aufgrund der periodischen Schmierungen der Formen.

Tabelle 3-II: Weißglasmassenstrom aufgeteilt auf Produktionslinien

| | Einheit | L 25 | L 24 | L 23 | L 22 | L 21 | L 20 | Summe |
|---------------------------|---------|------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|
| Anteil am \dot{M}_{ges} | % | 9 | 8 | 20 | 26 | 17 | 21 | 100 |
| \dot{M} Feeder | t/M | 479 | 403 | 1.055 | 1.379 | 882 | 1.134 | 5.333 |
| Ausschuss Tropfen | t/M | 54 | 22 | 57 | 75 | 48 | 61 | 317 |
| \dot{M} IS-Maschine | t/M | 425 | 381 | 998 | 1.305 | 834 | 1.073 | 5.016 |
| Ausschuss IS-Maschine | t/M | 15 | 13 | 47 | 45 | 38 | 32 | 190 |
| \dot{M} Transportband | t/M | 410 | 368 | 950 | 1.259 | 797 | 1.041 | 4.825 |
| Ausblasen Transportband | t/M | 17 | 12 | 31 | 62 | 34 | 33 | 190 |
| \dot{M} Kühlofen | t/M | 393 | 356 | 919 | 1197 | 762 | 1008 | 4.635 |
| Gesamt-ausschuss | % | 18 | 12 | 13 | 13 | 14 | 11 | 13 |

Tabelle 3-III: Braunglasmassenstrom aufgeteilt auf Linien

| | Einheit | L 44 | L 43 | L 42 | L 41 | L 40 | Summe |
|---------------------------|---------|------|------|------|------|------|-------|
| Anteil am \dot{M}_{ges} | % | 40 | 16 | 18 | 13 | 13 | 100 |
| \dot{M} Feeder | t/M | 1507 | 605 | 681 | 485 | 496 | 3774 |
| Ausschuss Tropfen | t/M | 115 | 46 | 52 | 37 | 38 | 289 |
| \dot{M} IS-Maschine | t/M | 1392 | 559 | 629 | 448 | 458 | 3486 |
| Ausschuss IS-Maschine | t/M | 80 | 28 | 25 | 27 | 16 | 177 |
| \dot{M} Transportband | t/M | 1311 | 532 | 603 | 421 | 442 | 3309 |
| Ausblasen Transportband | t/M | 71 | 10 | 16 | 13 | 15 | 124 |
| \dot{M} Kühlofen | t/M | 1241 | 521 | 588 | 408 | 427 | 3185 |
| Gesamt-ausschuss | % | 18 | 14 | 14 | 16 | 14 | 16 |

3.2 Datenerfassung

Während der Datenerfassung wird erhoben, über welche relevanten Daten für die Energiebilanz das Unternehmen bereits verfügt. In Anhang A ist eine Liste angehängt, welche die zu erhebenden Daten für die Energiebilanz, die Einheiten dieser Größen, den Status und die Quellen bzw. Erhebungsart der Daten aufzeigt. Ein Großteil, der darin aufgelisteten Daten, ist auf einige wenige Quellen zurückzuführen, welche aus internen Aufzeichnungen von Stölzle Oberglas GmbH stammen. Hier werden die wichtigsten Quellen aufgezählt, deren Inhalt bzw. Aufbau kurz erläutert und Ansprechpartner gelistet:

- Daten Wanne 2.xlsx bzw. Daten Wanne 4.xlsx – Volker Skrbinjek

Hierbei handelt es sich um eine tagesaktuelle Aufnahme der wichtigsten Daten der Glasschmelze um 06:00 des jeweiligen Tages. Aufgezeichnet werden diverse Temperaturen, Erdgaseinsatz, elektrischer Energieeinsatz der elektrischen Zusatzheizung (EZH) und Tonnagen.

- Umbautemp.xls – Volker Skrbinjek

Hier wird jede Produktänderung und somit die Änderungen der Zustände im jeweiligen Feeder festgehalten. Die Spalten umfassen Daten zu Schnitzzahlen, Gewicht der Tropfen, Tonnage und Zonentemperaturen.

- Gasverbrauch_Monat_2019.xls – Volker Skrbinjek

Für die betriebsinterne Monatskostenabrechnung wird ein Excelsheet erstellt, welches die Gasverbräuche in Nm³ des Unternehmens und die EZH der Wannen in kWh mit den entsprechenden Kostenstellen zusammenfasst. Die Gasverbräuche werden auf Aggregatebene aufgelistet.

- Energie 2019.xls – Herbert Kolb

Hierbei handelt es sich um monatliche Stromzählerdaten diverser Messstellen. Neben Stromzählern für die Druckluft- und Vakuumbereitstellung sind 80 weitere Messstellen gelistet. Die Differenz zwischen dem Gesamtverbrauch und den erhobenen Daten wird administrativen Gebäuden zugeordnet.

3.2.1 Produktionsaggregate

Im Folgenden wird auf die einzelnen Produktionsaggregate eingegangen. Da es kaum Unterschiede zwischen den Datenerfassungen der einzelnen Aggregate gibt, wird im Folgenden die Situation der Datenlage anhand der Linie 20 erläutert. Besteht ein Unterschied zu Aggregaten aus anderen Produktionslinien, wird im entsprechenden Kapitel ausdrücklich darauf hingewiesen.

3.2.1.1 Wannen & Regeneratoren

Da der Energiebedarf nicht von der Umgebungstemperatur, sondern hauptsächlich von der Tonnage abhängig ist, werden die beiden Größen in **Tabelle 3-IV** gegenübergestellt. Wanne 4 hat eine monatliche Tonnage von rund 70% und einen Energieeintrag von rund 64% der Werte von Wanne 2.

Tabelle 3-IV: Vergleich Wanne 2 und Wanne 4

| | Wanne 2 | Wanne 4 |
|-------------------------------|---------|---------|
| Tonnage [t/M] | 5.332 | 3.774 |
| Energieeintrag [MWh/M] | 10.872 | 6.916 |

Die Aufgabe der Regeneratoren besteht in der Vorwärmung der Verbrennungsluft zur Verringerung der Abgasverluste. Um diese zu bilanzieren stehen lediglich Aufzeichnungen zweier Messstellen pro Regenerator zur Verfügung. Diese Aufzeichnungen werden täglich um 06:00 Uhr aufgenommen. Dementsprechend gibt es keinen zeitlichen Verlauf der Temperaturen. Die Messstellen befinden sich am Eingang und Ausgang des Regenerators. Die geringste Temperatur, die während der Messperiode aufgezeichnet wurde, betrug 58°C und die höchste rund 1420°C. Die Minimaltemperatur trat am 25. September 2019 auf. Dabei kann es sich nicht um die Temperatur der Frischluft handeln. Daraus kann geschlossen werden, dass ein sehr signifikanter Anteil der gemessenen Temperatur vom Wärmespeichermaterial des Regenerators stammt. Aus diesem Grund wurde für diese Betrachtung die Näherung herangezogen, dass die Temperatur des Abgases bzw. der Verbrennungsluft jener des Wärmespeichermaterial entspricht. Da die Verluste der Regeneratoren nicht erfasst werden können, wird ein Wirkungsgrad von 100% angenommen. Aus den Daten geht hervor, dass das Abgas von 1.388°C auf 520°C abgekühlt wird.

Alle Energieströme der Glasschmelzwanne sind in **Abbildung 3-2** dargestellt. Die dazugehörigen Bilanzgrößen zur Bestimmung der Energiebilanz sind in **Tabelle 3-V** gelistet. Dabei ist in der letzten Spalte symbolisch dargestellt, welche Bilanzgrößen durch Stölzle Oberglas GmbH erfasst werden (✓) und welche im Außeneinsatz erhoben werden müssen (✗).

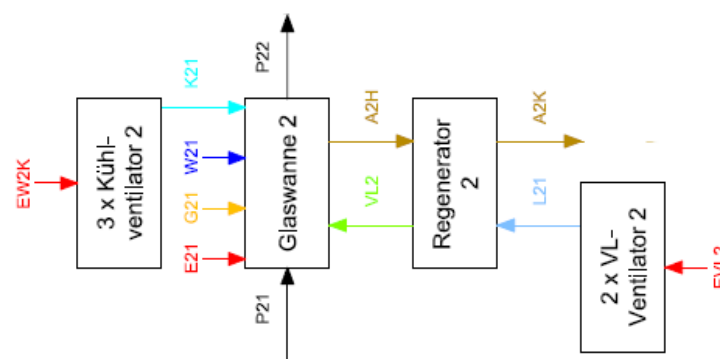


Abbildung 3-2: Ströme Glaswanne 2

Tabelle 3-V: Auflistung der Bilanzgrößen der Wanne 2 & Regenerator

| Wanne 2 & Regenerator | | | | | |
|-----------------------------|------|--------|----------------------------|--------------------|-----|
| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓/✗ |
| Rohstoffe | P21 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Scherben | P21 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Strom der EZH | E21 | In | Energieverbrauch/Stunde | kWh | ✓ |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ |
| Erdgas | G21 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ |
| Kühlung Elektroden (Wasser) | W21 | In | Massenstrom | kg/h | ✗ |
| | | | Temperatur Vorlauf | °C | ✓ |
| | | | Temperatur Rücklauf | °C | ✓ |
| | | | Energieverbrauch der Pumpe | kWh | ✗ |
| | | | Leistung | kW / % | ✗ |
| Wannenkühlung (Luft) | K21 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ |
| | EW2K | In | Energieverbr. der Vent. | kWh | ✓ |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ |
| Verbrennungsluft | VL2 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| | L21 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| | EVL2 | In | Energieverbr. der Vent. | kWh | ✓ |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ |
| Glasschmelze | P22 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Abgas | A2H | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| | A2K | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |

Durch die betriebsinternen Aufzeichnungen über die Glasschmelzwannen sind die Energieströme der elektrischen Zusatzheizung und des Erdgases sowie der Massenstrom und die Temperatur der Glasschmelze bekannt.

Die Wanne wird an zwei Stellen durch Zwangskonvektion gekühlt: Luftkühlung an den Seitenwänden der Schmelzwanne und Wasserkühlung der Elektrodensockel. Dabei handelt es sich um erfassbare Verluste, welche im Rahmen der Datenerhebung ermittelt werden.

3.2.1.2 Arbeitswannen und Feeder

Arbeitswanne und Feeder haben dieselbe Funktion, die Verteilung der Schmelze und den Erhalt bzw. die Einstellung der richtigen Temperatur für die weitere Verarbeitung in der IS-Maschine. Die Ströme der Aggregate sind in **Abbildung 3-3** dargestellt, die Bilanzgrößen sind in **Tabelle 3-VI** und **Tabelle 3-VII** gelistet.

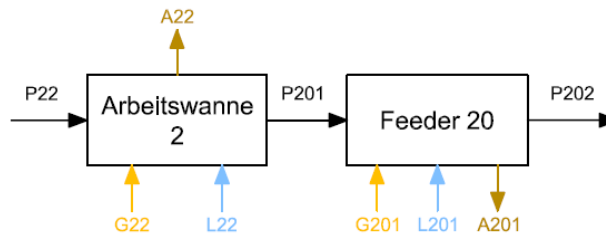


Abbildung 3-3: Ströme Arbeitswanne 2 und Feeder 20

Tabelle 3-VI: Auflistung der Bilanzgrößen der Arbeitswanne 2

| Arbeitswanne 2 | | | | | |
|---------------------|------|--------|--------------|--------------------|-----|
| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓/✗ |
| Glasschmelze | P22 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Erdgas | G22 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ |
| Luft | L22 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Abgas | A22 | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ |
| | | | Temperatur | °C | ✗ |
| Glasschmelze zu L20 | P201 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Glasschmelze zu L21 | P211 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Glasschmelze zu L22 | P221 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Glasschmelze zu L23 | P231 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Glasschmelze zu L24 | P241 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Glasschmelze zu L25 | P251 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |

Tabelle 3-VII: Auflistung der Bilanzgrößen der Feeder 20

| Feeder 20 | | | | | |
|--------------|------|--------|--------------|---------|-----|
| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓/✗ |
| Glasschmelze | P201 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Erdgas | G201 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ |
| Luft | L201 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Abgas | A201 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ |
| | | | Temperatur | °C | ✗ |
| Glasschmelze | P202 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |

Die durchschnittlichen Temperaturen der Glasschmelzen sind in **Tabelle 3-VIII** aufgelistet.

Tabelle 3-VIII: Glasschmelztemperaturen

| | Weißglasschmelze | Braunglasschmelze |
|---|------------------|-------------------|
| Wannenaustrittstemperatur | 1312°C | 1095°C |
| Arbeitswannenaustrittstemperatur | 1269°C | 1302°C |
| Feederaustrittstemperatur | 1259°C | 1280°C |

Auffallend ist die niedrige Wannenaustrittstemperatur der Braunglasschmelze, welche anschließend stark erhitzt werden muss. Die Weißglasschmelze zeigt dagegen einen leichten, kontinuierlichen Temperaturabfall.

Sowohl Arbeitswanne als auch Feeder haben die gleichen Input- und Outputströme (Erdgas, Glasschmelze, Luft und Abgas). Die Erdgasverbräuche der Arbeitswannen werden von Zählern erfasst. Die Gasverbräuche, angeführt in **Tabelle 3-IX**, zeigen einen geringeren Bedarf der Braunglasarbeitswanne.

Tabelle 3-IX: Gasverbräuche der Arbeitswannen und aller Feeder

| | Arbeitswanne 2 [m ³] | Arbeitswanne 4 [m ³] | Feeder [m ³] |
|------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| April | 75.704 | 58.801 | 201.505 |
| Mai | 79.702 | 56.385 | 268.853 |
| Juni | 64.470 | 57.505 | 251.073 |
| Juli | 80.454 | 67.653 | 225.910 |
| August | 91.751 | 68.821 | 255.993 |
| September | 77.185 | 66.585 | 234.111 |
| Mittel | 78.211 | 62.625 | 239.574 |

Aufgrund der ungünstigen Betriebsumgebung für Gaszähler und der daraus resultierenden kurzen Lebenszeiten sind für die Feeder keine Zähler installiert. Der Verbrauch aller Feeder als Gesamtes wird durch die Differenz der Gesamtgasabrechnung und der Summe aller erhobenen Verbraucher bestimmt. Das Aufgliedern des Gesamtverbrauchs an Erdgas auf die einzelnen Feeder ist somit nicht möglich.

Nach Angaben von Volker Skrbinjek beträgt das Verbrennungsluftverhältnis λ im Mittel 0,85 für Braunglas und 1,11 für Weißglas. Die Abgastemperaturen werden in Kapitel 3.3.4 erhoben.

3.2.1.3 IS-Maschine

An den Linien 20, 21, 22, 41 und 44 werden in der Regel größere Behälter produziert. Aufgrund der größeren Masse und deren gespeicherter Wärme, werden die Formen an diesen Linien zusätzlich gekühlt. Dieses Kühlsystem wird Vertiflow genannt und führt neben der Formenkühlung zusätzlich Wärme ab. In **Abbildung 3-4** sind die Ströme der IS-Maschine dargestellt und in **Tabelle 3-X** sind die dazugehörigen Bilanzgrößen gelistet.

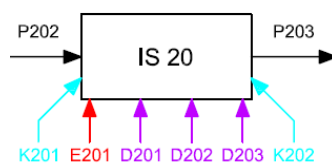
**Abbildung 3-4:** Ströme IS-Maschine 20

Tabelle 3-X: Auflistung der Bilanzgrößen der IS-Maschine 20

| IS-Maschine 20 | | | | | |
|----------------------|------|--------|-------------------------|---------|-------|
| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ |
| Glasschmelze | P202 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Formenkühlung (Luft) | K201 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ |
| | | | Energieverbr. des Vent. | kWh | ✓ |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ |
| Steuerung | E201 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ |
| Druckluft 4 bar | D201 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ |
| Druckluft 8 bar | D202 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ |
| Druckluft Vakuum | D203 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ |
| Vertiflow (Luft) | K202 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ |
| | | | Energieverbr. des Vent. | kWh | ✓ |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ |
| Glas | P203 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✗ |

An dieser Stelle sei erwähnt, dass ein Problem mit den Stromzählern festgestellt wurde. In dieser Arbeit gab es bislang nur die elektrische Zusatzheizung der Wannen, welche als bedeutender Verbraucher separat erfasst wird. An anderen Verteilern sind hingegen mehrere unterschiedliche Verbraucher angeschlossen und werden gesammelt von Stromzählern erfasst. Diese historische Entwicklung hat zur Folge, dass Stromzählerdaten nicht ausschließlich einem Aggregat zugeordnet werden können.

Diese Stromzählerproblematik zeigt sich anhand der IS-Maschinen am deutlichsten. Insgesamt können sieben Stromzähler, zu einem unbekanntem Anteil, den IS-Maschinen zugeschrieben werden. Die Stromzähler messen meistens mehrere Maschinen. Dabei werden die Linien 20 und 41 von nur einem Stromzähler erfasst. Die Linien 40, 42, 43 und 44 werden

von zwei gemeinsamen Stromzählern erfasst und die Linien 21 und 22 werden von drei Stromzählern erfasst. Der Verbrauch der Linien 23, 24 und 25 wird von keinem ausgewiesenen Stromzähler erfasst. Die soeben erläuterte Erfassung des Stromverbrauchs der IS-Maschinen ist in **Tabelle 3-XI** angeführt.

Tabelle 3-XI: Zuordnung der Stromzähler den IS-Maschinen

| Stromzähler | Zugeordnete IS-Maschinen |
|--------------------|---------------------------------|
| 1 | 43, 44 |
| 2 | 40 |
| 3 | 43, 43, 44 |
| 4 | 21, 22, 40, 41, 42 |
| 5 | 21, 22 |
| 6 | 21, 22, 20 |

Aliquot aufgerechnet ergibt das für die IS-Maschinen der Weißglasproduktion einen mittleren Energieverbrauch von 13,14 MWh/M und für die der Braunglasproduktion 7,79 MWh/M, wie in **Tabelle 3-XII** ersichtlich.

Tabelle 3-XII: Verbrauch der IS-Maschinen an elektrischer Energie anhand vorhandener Stromzählerdaten

| IS-Maschine | Verbrauch [kWh/M] |
|-----------------------------|--------------------------|
| 20 | 6.766 |
| 21 | 16.327 |
| 22 | 16.327 |
| 40 | 14.707 |
| 41 | 3.228 |
| 42 | 7.546 |
| 43 | 6.734 |
| 44 | 6.734 |
| Mittelwert Weißglas | 13.140 |
| Mittelwert Braunglas | 7.790 |

Es ist offensichtlich, dass die Stromzählerdaten keine Aussagekraft haben. Aus diesem Grund wird der mittlere Monatsverbrauch der sechs Stromzähler ermittelt und der Verbrauch den IS-Maschinen aliquot zugerechnet.

Die Stromzählerdaten für die 4 bar Druckluft- und Vakuumversorgung sind hingegen sehr vertrauenswürdig. Da ausschließlich bei den IS-Maschinen Vakuum benötigt wird und keine Aufzeichnung über den Verbrauch der einzelnen Linien besteht, wird auch dieser Verbrauch anteilig hochgerechnet. Die 4 bar Druckluftschiene wird ebenfalls ausschließlich für die IS-Maschinen benötigt. Seit Februar 2020 verfügt Stölzle Oberglas GmbH über digitale Druckluftverbrauchsmessungen für die Weißglaslinien. Zur Bestimmung der Anteile des Druckluftbedarfs wurden über eine Messperiode (5.2.2020 13:04 bis 11.2.2020 8:12) Verbrauchsdaten aufgenommen. Es zeigte sich ein relativ gleichmäßiger durchschnittlicher Verbrauch der Weißglaslinien von 324.000 Bm³ pro Linie. Im selben Zeitraum haben die Kompressoren 3.789.000 Bm³ komprimiert. Mit der Annahme, dass die Braunglaslinien ebenfalls den gleichen Mittelwert besitzen, ergibt das einen Verbrauch von 1.620.000 Bm³. Das bedeutet einen prozentuellen Anteil am Gesamtverbrauch für die Weißglaslinien von 51,3% und für die Braunglaslinien von 42,7%. Somit können 6,0% keinem Verbraucher zugeschrieben werden und entsprechen Leckagen. Der Stromverbrauch für die 4 bar Druckluftbereitstellung liegt bei 1.607 MWh/M und kann über den Anteil am Druckluftverbrauch den Linien zugeschrieben werden.

3.2.1.4 Transportband

Alle Ströme des Transportbands sind in **Abbildung 3-5** dargestellt. Die entsprechenden Bilanzgrößen zur Bestimmung der Energiebilanz sind in **Tabelle 3-XIII** dargestellt.

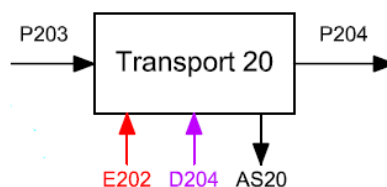


Abbildung 3-5: Ströme Transportband 20

Tabelle 3-XIII: Auflistung der Bilanzgrößen des Transportbands 20

| Transport 20 | | | | | |
|--------------|------|--------|-------------------------|---------|-----|
| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓/✗ |
| Glas | P203 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✗ |
| Strom | E202 | In | Energieverbrauch/Stunde | kWh | ✓ |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ |
| Druckluft | D204 | In | Energieverbrauch/Stunde | kWh | ✗ |
| Ausschuss | AS20 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✗ |
| Glas | P204 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✗ |

Am Transportband wird 8 bar Druckluft verwendet um fehlerhafte Glasbehälter vom Transportband zu blasen. Zur Bestimmung des dafür benötigten Volumenstroms ist es notwendig die Geschwindigkeit der Druckluft beim Austritt aus der Düse zu kennen. Die Austrittsgeschwindigkeit ist dabei abhängig vom Druckverhältnis p_r .

$$p_r = \frac{p_u}{p_0} \quad (3.1)$$

Wobei p_u für den Umgebungsdruck und p_0 für den Innendruck steht. Bei einem Druckverhältnis von Eins ist die Austrittsgeschwindigkeit gleich Null, da $p_u = p_0$ und somit keine treibende Kraft vorhanden ist. Mit steigendem Druckunterschied nimmt das Druckverhältnis ab und die Austrittsgeschwindigkeit zu. Ab einem gewissen Druckverhältnis, dem sogenannten kritischen Druckverhältnis ist eine Maximalgeschwindigkeit erreicht. Ab dem kritischen Druckverhältnis, welches 0,528 beträgt, entspricht die Austrittsgeschwindigkeit der Schallgeschwindigkeit. [17]

Da die Ausblasung mit 8 bar Druckluft realisiert ist, beträgt das Druckverhältnis 0,125. Damit wird das kritische Ruhedruckverhältnis deutlich unterschritten. Daher wird der Druckluftverbrauch auf Basis der Schallgeschwindigkeit, des Durchmessers einer Düse von

9 mm, der Impulsdauer von 0,5 s und der Anzahl an ausgeschiedenen Flaschen, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, bestimmt. So werden in Summe 40.840 Bm³ im Monat für das Ausblasen aufgewendet, was 35,8% des Gesamtbedarfs an 8 bar Druckluft entspricht.

Der Strombedarf ist äußerst gering und wird auf Basis der Nennleistungen der Motoren des Transportbands (4 kW und 3 kW) bestimmt. Den Energieverbrauch eines Aggregats während einer bestimmten Zeitspanne bestimmt man aus der Multiplikation der mittleren Leistung und der Zeitspanne:

$$W_{el} = P * t \quad (3.2)$$

3.2.1.5 Kühlöfen

Wie bisher für alle Produktionsaggregate sind auch hier die Ströme der Kühlöfen in **Abbildung 3-6** dargestellt und die entsprechenden Bilanzgrößen in **Tabelle 3-XIV** übersichtlich gelistet.



Abbildung 3-6: Ströme Kühllofen 20

Tabelle 3-XIV: Auflistung der Bilanzgrößen eines Kühllofens

| Kühllofen 20 | | | | | |
|--------------|------|--------|-------------------------|--------------------|-----|
| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓/✗ |
| Glas | P204 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✗ |
| Strom | E203 | In | Energieverbrauch/Stunde | kWh | ✓ |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ |
| Erdgas | G203 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ |
| Luft | L203 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ |
| | | | Temperatur | °C | ✓ |
| Abgas | A203 | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ |
| | | | Temperatur | °C | ✗ |
| Glas | P205 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ |
| | | | Temperatur | °C | ✗ |

Mit rund 9% des Erdgasverbrauchs sind die Kühlöfen relevante Verbraucher. Die Verbräuche der einzelnen Kühlöfen sind in **Tabelle 3-XV** gelistet.

Tabelle 3-XV: Gasverbrauch der Kühlöfen

| Linie | April [Nm ³] | Mai [Nm ³] | Juni [Nm ³] | Juli [Nm ³] | Aug. [Nm ³] | Sep. [Nm ³] | Mittel [Nm ³] |
|-------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 20 | 8.045 | 10.485 | 9.075 | 9.243 | 8.618 | 7.429 | 8.816 |
| 21 | 17.727 | 11.888 | 10.151 | 10.277 | 14.035 | 11.005 | 12.514 |
| 22 | 10.160 | 10.564 | 12.188 | 14.223 | 14.345 | 10.297 | 11.963 |
| 23 | 14.780 | 14.147 | 14.466 | 17.598 | 16.284 | 14.442 | 15.286 |
| 24 | 14.131 | 13.949 | 17.596 | 16.535 | 15.492 | 14.720 | 15.404 |
| 25 | 11.075 | 10.796 | 10.751 | 11.312 | 10.816 | 9.071 | 10.637 |
| 40 | 12.397 | 14.186 | 16.968 | 18.011 | 16.555 | 14.249 | 15.394 |
| 41 | 7.769 | 10.619 | 15.828 | 14.370 | 13.865 | 10.582 | 12.172 |
| 42 | 10.835 | 12.854 | 12.966 | 13.061 | 13.611 | 13.341 | 12.778 |
| 43 | 6.416 | 7.946 | 8.882 | 9.063 | 9.022 | 8.546 | 8.313 |
| 44 | 9.186 | 16.134 | 14.426 | 8.760 | 15.802 | 19.787 | 14.016 |
| ∑ | 122.521 | 133.568 | 143.297 | 142.453 | 148.445 | 133.469 | 137.292 |

Der Gaszähler der Linie 44 ist im Mai ausgefallen und im September getauscht worden, wodurch in diesem Zeitraum die Verbrauchsdaten des Kühlöfens 44 aus der Differenz des Gesamtverbrauchs der Kühlöfen und der erhobenen Verbräuche der einzelnen Öfen ermittelt wurden. Damit werden Abweichungen durch Messungenauigkeiten der Gaszähler den Verbräuchen des Kühlöfens 44 zugerechnet.

Die Aufstellung zeigt, dass die Kühlöfen 20 und 43 den geringsten Verbrauch haben. Den gr o ten Verbrauch haben im Betrachtungszeitraum jeweils die Kühlöfen 40 und 24 mit

durchschnittlich ca. 15.400 Nm³/M Erdgas verbraucht. Somit verbrauchen sie doppelt so viel Erdgas wie die Kühlöfen 20 und 43.

Der elektrische Verbrauch der Kühlöfen ist äußerst unterschiedlich, siehe **Tabelle 3-XVI**.

Tabelle 3-XVI: Elektrischer Verbrauch der einzelnen Kühlöfen

| Kühlöfen | Strom [kWh/M] | Anteil [%] |
|--------------|----------------|------------|
| 20 | 6.708 | 6,7 |
| 21 | 14.124 | 14,1 |
| 22 | 15.281 | 15,3 |
| 23 | 6.194 | 6,2 |
| 24 | 5.513 | 5,5 |
| 25 | 6.663 | 6,7 |
| 40 | 7.124 | 7,1 |
| 41 | 18.572 | 18,6 |
| 42 | 5.566 | 5,6 |
| 43 | 3.969 | 4,0 |
| 44 | 10.395 | 10,4 |
| Summe | 100.109 | |

Der Anteil schwankt zwischen 4 und 20% des Gesamtverbrauchs der Kühlöfen, was wiederholt auf die Stromz hlerproblematik aufmerksam macht. Somit sind die vorhandenen Daten der elektrischen Verbraucher auch an dieser Stelle nicht akkurat. Da der Energieverbrauch der Kühlöfen nur rund 4% des Gesamtenergieverbrauchs ausmacht, kann an dieser Stelle mit ausreichender Genauigkeit mit Mittelwerten fortgefahren werden.

3.2.2 Abgasweg

Als Abgasweg wird die Abgasbehandlung der Abgase aus den Glasschmelzwannen bezeichnet.

3.2.2.1 Frischluftquenche

Die Aufgabe der Frischluftquenche liegt darin, den E-Filter vor thermischer Überbeanspruchung zu schützen. Dieser darf mit höchstens 415°C warmem Abgas gespeist werden. Die Temperatur der Mischung der beiden Abgasströme aus den Regeneratoren beträgt jedoch 488°C. Die Regelung der Eingangstemperatur wird über das Mischen von Frischluft zum Abgasstrom mit Hilfe einer regelbaren Klappe realisiert.

3.2.2.2 Elektrofilter

Nach der Frischluftquenche wird der Staub aus dem Abgas der Glasschmelzwannen gefiltert. Der elektrische Verbrauch wird von Stölzle Oberglas GmbH erhoben und beträgt im Mittel 59,4 MWh/M. Der Elektrofilter wird mittels 8 bar Druckluft kontinuierlich gereinigt. Da es keine Aufzeichnungen des Verbrauchs gibt und eine Abschätzung nicht möglich ist, kann dieser Energieverbrauch in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Grundsätzlich wird die Temperatur im Abgasstrom an drei Stellen erfasst – vor dem E-Filter, nach dem E-Filter sowie nach dem Wärmeübertrager. Diese Daten werden im Prozessleitsystem zeitaktuell angezeigt, jedoch nicht aufgezeichnet. Die Eingangstemperatur des Abgases für den E-Filter ist aufgrund von Werkstoffeigenschaften auf 415°C vorgeschrieben. Da die Umgebungstemperatur in dieser Betrachtung mit 15°C als konstant angenommen wurde, ist das System somit stationär. Aufgrund dessen kann die Annahme getroffen werden, dass die Verluste konstant sind. Somit ist es legitim, eine durchschnittliche Ausgangstemperatur des Abgases aus dem E-Filter, die am 11.2.2020 zwischen 9:30 und 10:00 ausgelesen wurde, mit 395°C als konstant anzunehmen. Diese Temperatur bildet somit die Ausgangsbasis für die Bilanzierung des Wärmeübertragers.

3.2.2.3 Wärmeübertrager

Die Auskopplung an Fernwärme ist technisch über einen Wärmeübertrager realisiert. Für den Betrieb der Anlage wird nur elektrische Energie für den Betrieb von Pumpen und Messeinrichtungen benötigt. Der Strombedarf beträgt laut firmeninternen Aufzeichnungen im Mittel 13,1 MWh/M.

Die Daten von Stölzle Oberglas GmbH über die ausgekoppelte Wärmemenge zeigen, wie in **Tabelle 3-XVII** gelistet, eine relativ konstante Wärmeauskopplung.

Tabelle 3-XVII: Fernwärmeauskopplung im Betrachtungszeitraum

| Monat | Fernwärme [MWh/M] |
|-----------|-------------------|
| April | 1.727 |
| Mai | 1.505 |
| Juni | 1.526 |
| Juli | 1.968 |
| August | 1.754 |
| September | 1.849 |
| Mittel | 1.722 |

3.2.2.4 Abgasventilator und Kamin

Der Abgasventilator erzeugt im Abgasweg einen Unterdruck, wodurch das Abgas durch den Regenerator, den Elektrofilter und den Wärmeübertrager zum Kamin befördert wird.

Der Energieverbrauch des Ventilators wird über Formel (2.36) bestimmt. Die Druckdifferenz wird nach dem Regenerator erfasst und beträgt 9 mbar.

3.3 Außeneinsatz

Durch die Datenerfassung wurde die bestehende Datenlage von Stölzle Oberglas GmbH erfasst. Im Folgenden wird erörtert, wie fehlende Messdaten in mehreren Messkampagnen erhoben wurden.

3.3.1 Verwendete Messgeräte

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Messgeräte beschrieben.

3.3.1.1 Thermoelement mit Datenlogger

Für die Temperaturmessung mittels Thermoelement Typ K wird in dieser Arbeit der Datenlogger Almemo 2690 verwendet, abgebildet in **Abbildung 3-7**.



Abbildung 3-7: Datenlogger ALMEMO 2690-8 [18]

Bei dem Datenlogger handelt es sich um ein akkubetriebenes Handgerät, welches zur Messung mittels unterschiedlichster Fühler und Peripheriegeräte verwendet werden kann. Die Messgeräte verfügen über fünf galvanisch getrennte Messeingänge und werden über Messstecker am Datenlogger angeschlossen. Die Vergleichsstellenkompensation von Thermoelementen erfolgt mit einem eingebauten Temperaturfühler im Messstecker. Diese Stecker können für alle Typen an Thermoelementen verwendet werden. Standardmäßig werden alle Messstellen mit einer Messrate von 10 Messwerten pro Sekunde abgefragt. [18]

3.3.1.2 Infrarot-Wärmebildkamera

VarioCAM hr head der Firma InfraTec ist ein Thermografiesystem bestehend aus einer Infrarot-Wärmebildkamera und einem PC-Interface. Die Wärmebildkamera, abgebildet in **Abbildung 3-8**, erfasst den langwelligen, infraroten Spektralbereich von 7,5 bis 14 μm . Das Objektiv bildet die Objektszenarie auf einem Mikrobolometer-Array ab und detektiert ein elektrisches Signal. Dieses Signal wird in der internen Elektronik verarbeitet. Die Bedienung erfolgt über eine PC-Schnittstelle. Als Schnittstellen sind FireWire (IEEE 1394) und RS232 verfügbar. Die wichtigsten technischen Daten des Systems sind in **Tabelle 3-XVIII** angeführt.



Abbildung 3-8: VarioCam hr head Infrarot-Wärmebildkamera [19]

Tabelle 3-XVIII: Ausgewählte technische Daten des VairoCAM hr head Thermografiesystems [19]

| | |
|---------------------------------|---|
| Temperaturmessbereich | -40 - 1.200°C |
| Temperaturauflösung | <0,05 K |
| Messgenauigkeit | 2% |
| Emissionskoeffizient | einstellbar von 0,1 bis 1,0 in 0,01 Schritten |
| Bildfrequenz | 50 Hz |
| Arbeitstemperaturbereich | -15 - 50°C |
| Lagertemperaturbereich | -40 - 70°C |
| Abmessungen | 133 x 106 x 110 mm |
| Gewicht | ca. 1,3 kg |

3.3.1.3 Flügelradanemometer

Für die Datenerhebung von Luftgeschwindigkeiten in dieser Arbeit wurde ein testo 416 Flügelradanemometer, **Abbildung 3-9**, verwendet.



Abbildung 3-9: testo 416 Flügelradanemometer [20]

Dieses Anemometer mit dem ausziehbaren Teleskop hat die Möglichkeit, den Minimal- und Maximalwert während der Messperiode anzuzeigen. Die grundlegenden technischen Daten des Messgeräts sind in **Tabelle 3-XIX** aufgelistet. [20]

Tabelle 3-XIX: Charakteristische Größen eines testo 416 Flügelradanemometer [20]

| | | | |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|
| Messbereich | +0,6 ... 40 m/s | Betriebstemperatur | -20 ... +50°C |
| Einsatzbereich | 0 ... +60°C | Gewicht | 525 g |
| Genauigkeit | +/- (0,2 +1,5% v.Mw.) | Standzeit | 80 h |
| Auflösung | 0,1 m/s | Abmessungen | 182 x 64 x 40 mm |

3.3.1.4 Absaugpyrometer

Zur Bestimmung von Temperaturen von Gasen in Gegenwart von sehr heißen, strahlenden Oberflächen ist nur der konvektive Anteil der Wärme von Interesse, während der Anteil der Strahlungsenergie nicht berücksichtigt werden darf. Um den Strahlungsanteil für die Messung auszuschließen, muss die Messstelle von Thermostrahlung abgeschirmt werden. Für derartige Messaufgaben werden Absaugpyrometer (ASPM) eingesetzt.

Das Brenngas bzw. Rauchgas wird an der Spitze des ASPM angesaugt und an einem Thermoelement vorbeigeführt. Das Thermoelement ist durch einen doppelten keramischen Strahlungsschirm ummantelt, um den unerwünschten Einfluss durch Strahlung auszuschließen. In dieser Konfiguration kann mit dem Thermoelement die wahre Gastemperatur durch Konvektion gemessen werden. Eine Wasserkühlung schützt das ASPM gegen die hohe thermische Beanspruchung. Durch diese Messmethode kann eine hohe Messgenauigkeit mit einer Abweichung von wenigen Kelvin erreicht werden. [21]

Für diese Arbeit wurde das wassergekühlte Absaugpyrometer in der VDI-Ausführung der Firma Paul Gothe GmbH aus Bochum, Deutschland verwendet.

Die Messeinrichtung, wie in **Abbildung 3-10** dargestellt, besteht aus dem ASPM mit Keramikaufsatz, Kühlschlange, Kondensatabscheider, Ejektor und Anschlussschläuchen. Zusätzlich ist zwischen Kondensatabscheider und Ejektor ein Schwebekörper-Durchflussmesser, um die abgesaugte Gasmenge zu erfassen, vorgesehen. Ein Durchflussmesser für das Kühlwasser ist vor dem Kühlwassereinlaufventil am ASPM zur Absicherung eingebaut. [22]

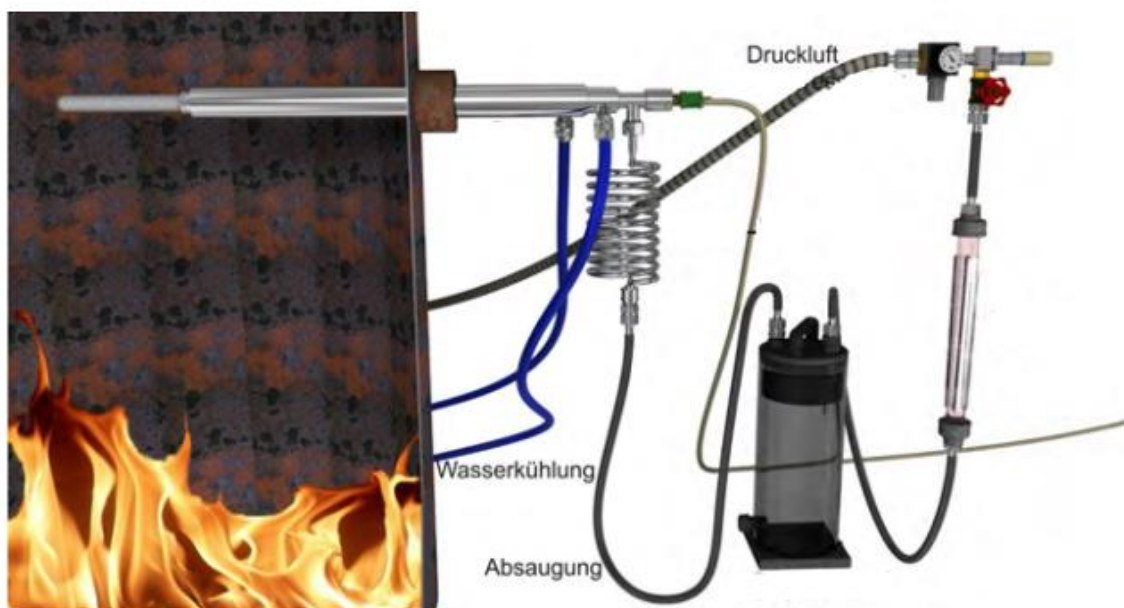


Abbildung 3-10: Messaufbau eines Absaugpyrometers [22]

Das Absaugpyrometer besteht aus drei konzentrisch angeordneten Röhren aus Edelstahl, wie in **Abbildung 3-11** ersichtlich. Das innerste Rohr ist eine Führung und Schirmung für das Thermoelement.

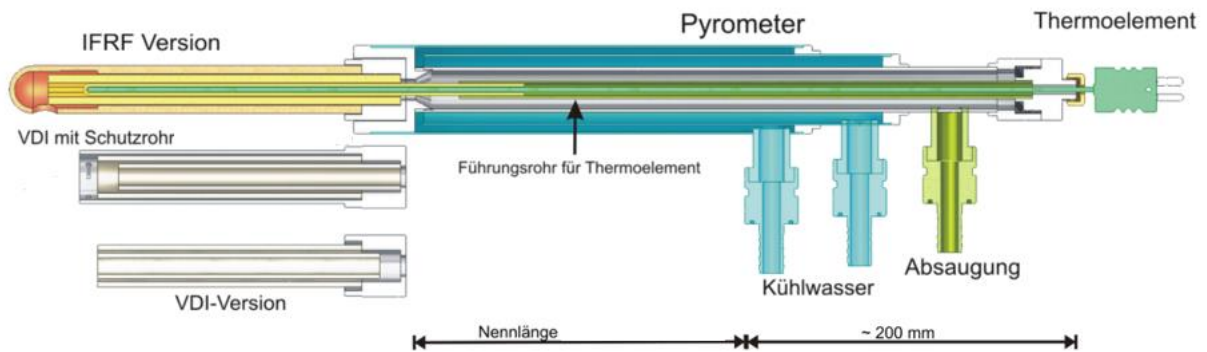


Abbildung 3-11: Aufbau des kühlbaren Absaugpyrometers IFRF und VDI Version [22]

Das Führungrohr verfügt über außen angebrachte Zentrierungen, damit es bei langen Rohren nicht zum Durchbiegen kommt. Am Ende des Pyrometers ist das Führungrohr mit einem Gewinde festgeschraubt. Das Gas, dessen Temperatur erfasst werden soll, wird zwischen Führungrohr und Innenwand des ASPM von der Spitze bis zum Ende geleitet, wo der Absaugschlauch (bzw. die Kühlschlange) durch eine Kupplung befestigt werden kann. Das Gas tritt an der Spitze über einen Keramikauflage ein. Zwischen dem zweiten und dritten Rohr befindet sich die Wasserkühlung. Zwei mit einer Gravur, für den Einlass und Auslass, beschriftete Anschlüsse markieren die Kühlwasseranschlüsse. Die wichtigsten technischen Daten sind in **Tabelle 3-XX** aufgelistet. [22]

Tabelle 3-XX: Technische Daten des VDI Absaugpyrometers [22]

| | |
|--------------------------------|----------------|
| Material | Edelstahl |
| Durchmesser | 50 mm |
| Nennlänge | 2000 mm |
| Einsatztemperatur | bis ca. 1600°C |
| Gewicht ohne Kühlwasser | 6 kg |
| Gewicht mit Kühlwasser | 11 kg |
| Durchbiegung | 100 mm |

Die Kühlschlange ist direkt am Absaugpyrometer befestigt und dient zur zusätzlichen Kühlung des heißen Gases bei Hochtemperaturanwendungen. Das Abgas wird dadurch so weit abgekühlt, dass der Abgasschlauch thermisch geschont wird und der

Kondensatabscheider unversehrt bleibt. Letzterer ist auf eine Dauertemperaturbelastung zwischen -10 und 60°C ausgelegt. Der Kondensatabscheider besteht aus einem klaren PVC-Zylinder mit 160 mm Durchmesser und einer Höhe von 400 mm, in den das Gas über ein Rohr eingeleitet wird. Ein Kunststoffgeflecht bildet den Tröpfchenabscheider, bevor das Abgas über eine Öffnung im Deckel zum Schwebekörper-Durchflussmessern und Ejektor weitergeleitet wird. Damit die Wärme des Strahlungseinflusses von außen die Messung nicht beeinflusst, empfiehlt der Hersteller eine Gasgeschwindigkeit von 80 m/s am Thermoelement. Damit wird gewährleistet, dass von den Keramikrohren übertragene Wärme konvektiv abgeführt wird. Diese Geschwindigkeit ist abhängig vom abgesaugten Abgasvolumenstrom (Absaugrate) und damit von dessen Temperatur. In **Tabelle 3-XXI** ist die zur Gewährleistung der erforderlichen Geschwindigkeit am Thermoelement geforderte Absaugrate am Schwebekörper-Durchflussmesser in der Gasstrecke in Abhängigkeit von der Eingangstemperatur angeführt.

Tabelle 3-XXI: Erforderliche Absaugrate des ASPM in Abhängigkeit der erwarteten Temperatur.
[22]

| Geschwindigkeit am Thermoelement [m/s] | Notwendige Absaugrate bei 1000°C [m ³ /h] | Notwendige Absaugrate bei 1200°C [m ³ /h] | Notwendige Absaugrate bei 1600°C [m ³ /h] |
|--|--|--|--|
| 80 | 3,8 | 3,3 | 2,6 |

Bei Schwebekörper-Durchflussmessern ist zu beachten, dass diese nicht lageunabhängig sind, sondern vertikal positioniert sein müssen. Der Ejektor CV 20, dargestellt in **Abbildung 3-12**, erfüllt die Funktion der Absaugung mittels Druckluft.

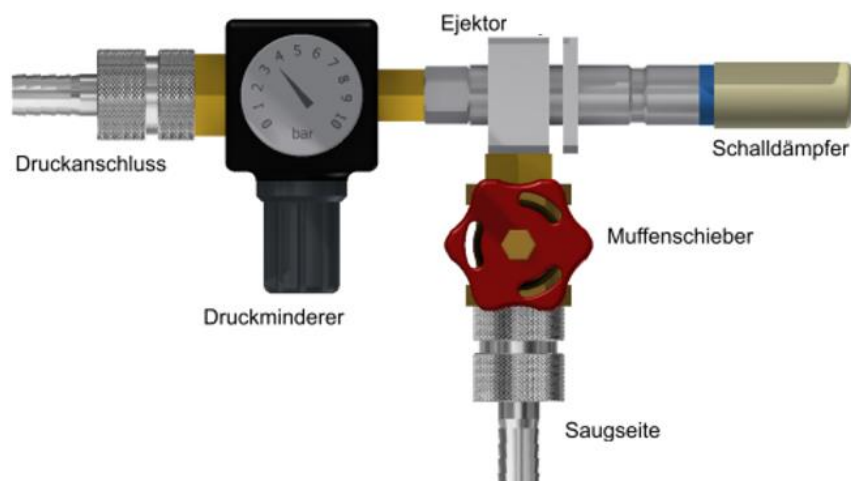


Abbildung 3-12: Ejektor CV 20 [22]

Im Ejektor befindet sich eine Düse, welche die Druckluft auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigt. Dabei wird der Venturi-Effekt genutzt, welcher zu einem statischen Unterdruck führt und das Abgas ansaugt. Dementsprechend ist die Absaugrate vom Vordruck und daraus folgend vom Unterdruck an der Ansaugseite abhängig. Daher besteht die Möglichkeit, über einen Druckminderer die Absaugrate einzustellen. Die Absaugrate und der Druckluftverbrauch in Abhängigkeit des Vordrucks sind in **Tabelle 3-XXII** aufgelistet. Als Hilfestellung zeigt ein Barometer den Druck in bar auf der Druckseite an. Das Gasgemisch wird über einen Schalldämpfer an die Umgebung abgegeben. [22]

Tabelle 3-XXII: Absaugrate in Abhängigkeit des Druckluftverbrauchs [22]

| Vordruck Druckluft [bar] | Absaugrate [m ³ /h] | Druckluftverbrauch [l/min] |
|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 5 | 9,0 | 180 |
| 4 | 8,5 | 150 |
| 3 | 7,5 | 120 |
| 2 | 5,5 | 90 |

Zum Schutz des ASPM ist es unverzichtbar, dass bei Hochtemperaturmessungen die Wasserkühlung des ASPM ordnungsgemäß funktioniert. Aus diesem Grund ist ein mechanisches Durchflussmessgerät vor dem Einlassventil angebracht. Aus Gründen der Sicherheit für das ASPM ist dieses lageunabhängig. Dies wird durch eine kalibrierte Feder ermöglicht, deren Dehnung, aufgrund eines erzeugten Strömungswiderstands, proportional zur Durchflusgeschwindigkeit ist. Vom Hersteller ist ein Wasserdurchfluss von rund 20 l/min für das ASPM vorgeschrieben. Das Messgerät besitzt einen Messbereich von 2 bis 30 l/min mit einer Genauigkeit von $\pm 5\%$ vom Skalenendwert. Der Betriebsdruck liegt zwischen 1 und 10 bar. Da Wasser nahezu inkompressibel ist, ist die Messung druckunabhängig. [22]

3.3.2 1. Messkampagne – Flaschentemperatur

Für die Ermittlung der Energiebilanz der IS-Maschine, der Transportbänder und der Kühlöfen ist die Temperaturerfassung der Flaschen notwendig. Die Messung dieser intensiven Zustandsgröße stellt eine nicht triviale Herausforderung dar. Um diese zu erfassen wurden zwei Messmethoden ausgewählt: Messung mittels Kontaktthermoelement vom Typ K und mittels Infrarot-Wärmebildkamera. Die Flaschentemperaturen wurden an den Linien 44, 43, 25

und 21 erfasst. Sie wurden nach der letzten Station der IS-Maschinen und vor dem Einschleiben in den Kühlöfen gemessen.

Zur experimentellen Bestimmung des Emissionskoeffizienten ϵ der Gläser von Stölzle Oberglas GmbH wurde der Widerstandsofen P3000, mit einem Temperaturbereich von 30 bis 3000°C, verwendet. Es wurden Braun-, Grün- und Weißglasproben vorbereitet und in 50°C Schritten vermessen. Der Erweichungspunkt lag bei allen Proben bei rund 700°C. Die somit empirisch ermittelten Werte sind in **Abbildung 3-13** dargestellt.

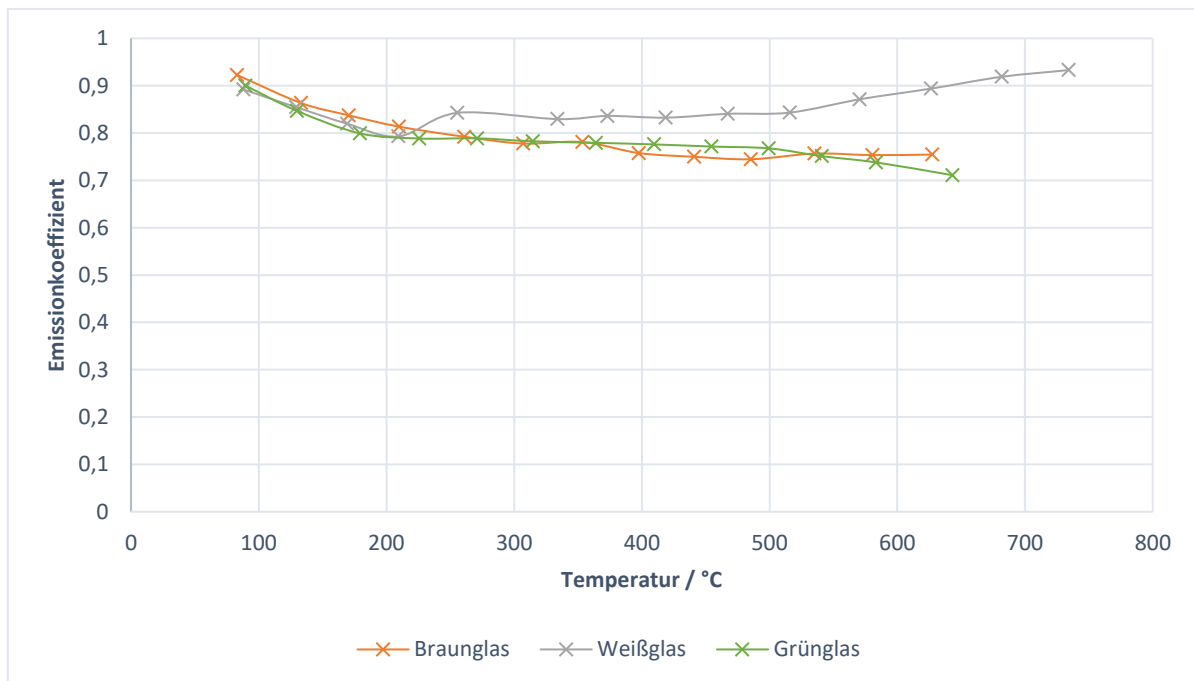


Abbildung 3-13: Temperaturabhängigkeit des Emissionskoeffizienten verschiedener Gläser von Stölzle Oberglas GmbH

Der aufwendige Aufbau der Messeinrichtung für die Infrarotmessung mittels Infrarot-Wärmebildkamera, Stativ und Messcomputer war am Ausgang der IS-Maschinen nicht möglich. Die gewünschte Position, am Ende der IS-Maschine noch vor der Ausblasung am Transportband, war aufgrund des laufenden Produktionsbetriebs zum Teil nur eingeschränkt möglich. Die Beleuchtung in diesem Bereich und heiße Oberflächen im Umfeld führten zu Störstrahlungen. Die Auswertung der Messung mit der Infrarot-Wärmebildkamera ergab große Schwankungen und dementsprechend unschlüssige Ergebnisse. Aus diesem Grund wurde an dieser Stelle mit Kontaktthermoelementen gemessen. Die Bestimmung mit dem Thermoelement geschah in einer für diese Messung präparierten Halbschale aus Stahl. Die Halbschale wurde mit einer feuerfesten Dämmwolle ausgekleidet, um die Abkühlung des Glasbehälters beim Messen durch Wärmeleitung zu verlangsamen. Die Thermoelemente wurden so positioniert, dass ihre Messspitzen durch die Dämmwolle ragen. Die Stichproben

an Glasbehältern, deren Temperaturen erfasst werden sollten, wurden auf die Messspitzen der Thermoelemente gedrückt, um deren Oberflächentemperaturen zu erfassen. Mit dieser Methodik wurde eine durchschnittliche Temperatur von 665°C gemessen. Die Messung mittels Infrarotmessung am Beginn des Querbands, dem Ende des Transportbands, erbrachte plausible Ergebnisse. Die mit der Kamera aufgenommenen Bilder wurden manuell ausgewertet. Dabei wurden jene Aufnahmen zur Temperaturbestimmung herangezogen, welche ein Behälterglas mittig erfasst haben. Eine exemplarische Aufnahme ist in **Abbildung 3-14** dargestellt.

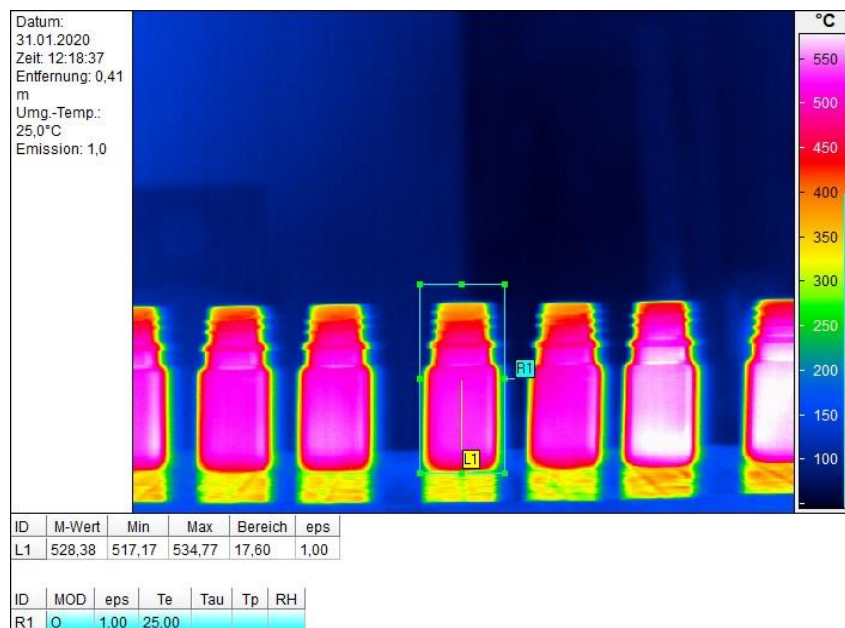


Abbildung 3-14: Aufnahme eines Behälterglases mittels Infrarot-Wärmebildkamera an Linie 43

Die Temperatur wurde über den Mittelwert einer Messstrecke (L1) erfasst. Da die Aufnahme mit einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon=1$ aufgenommen wurde und der reale Emissionskoeffizient $\varepsilon<1$ ist, muss die tatsächliche Temperatur nach Formel (2.16) bestimmt werden. Der Mittelwert der erfassten Temperaturen ergab 572°C. Demnach ist die Temperatur der Gefäße um rund 10°C/m gesunken. In **Tabelle 3-XXIII** sind die Ergebnisse der Messkampagne nochmals zusammengefasst.

Tabelle 3-XXIII: Ergebnisse der Flaschentemperaturbestimmung

| Messort | Messart | Ergebnis |
|----------------------|--------------------------|----------|
| Anfang Transportband | Thermoelement | 665°C |
| Ende Transportband | Infrarot-Wärmebildkamera | 572°C |

3.3.3 2. Messkampagne: Wannen-, Formen-, Vertiflow- und Elektrodenkühlung

In der 2. Messkampagne wurden diverse Daten zur Bestimmung von Kühlmengen erhoben.

3.3.3.1 Wannenkühlung

Um den abgeführten Wärmestrom der Glasschmelzwannen nach Formel (2.4) zu bestimmen, muss der Massenstrom an Kühlluft sowie der Temperaturanstieg ermittelt werden. Mittels Thermoelement wird die Temperatur erhoben. Der Massenstrom wird über die Dichte von trockener Luft und den Volumenstrom nach Formel (2.31) kalkuliert. Der Volumenstrom wird mittels Schwerlinienverfahren (siehe Kapitel 2.6.1) und einem Anemometer am Kühlluftventilator erhoben. Das Ergebnis, siehe **Tabelle 3-XXIV**, zeigt eine annähernd gleiche Kühlung beider Wannen. Während der Messung waren zwei Ventilatoren (Ventilator 2 und Ventilator 3) für die Kühlung der Wanne 2 und nur ein Ventilator (Ventilator 3) für die Kühlung der Wanne 4 aktiv.

Tabelle 3-XXIV: 2. Messkampagne – Wannenkühlung

| | Wannenkühlung 2 | | Wannenkühlung 4 |
|-------------------------------|-----------------|--------------|-----------------|
| | Ventilator 2 | Ventilator 3 | Ventilator 3 |
| \dot{V} [m ³ /s] | 8,6 | 8,2 | 10,5 |
| T_{in} [°C] | 20 | 27 | 18 |
| T_{out} [°C] | 62 | | 72 |

3.3.3.2 Formen- und Vertiflowkühlung

Der Massenstrom der Formen- und Vertiflowkühlung wird ebenfalls mit der gleichen Vorgangsweise wie bei der Wannenkühlung erhoben. Da die Formen- und Vertiflowkühlung periodisch und somit pulsweise realisiert ist, ergibt sich eine hohe Schwankungsbreite zwischen erfasstem Maximal- und Minimalwert der Volumenstrommessung. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Schwankungen am Randbereich der Ansaugung ausgeprägter sind als in der Mitte. Besonders ungünstig zeigt sich die Pulsung beim Ventilator der Vertiflowkühlung der Linie 21, an dem periodisches Ausblasen der Ansaugluft am Ansaugstutzen auftritt. Diese Schwankungen wurden erfasst und der Mittelwert zur Bestimmung des Volumenstroms herangezogen. Die Erfassung der Temperatur der Kühlluft nach deren Erwärmung in der Formen- bzw. im Vertiflow ist aufgrund schnell bewegter

Apparaturen, sowie Platzmangel nicht möglich. Die Ergebnisse der Erhebung der Weißglasproduktion sind in **Tabelle 3-XXV** gelistet, die der Braunglasproduktion in **Tabelle 3-XXVI**.

Tabelle 3-XXV: 2. Messkampagne – Ergebnisse Weißglasformenkühlung

| | | \dot{V} [Bm ³ /s] | \dot{M} [kg/s] | T _{in} [°C] |
|--------------|---------------|--------------------------------|------------------|----------------------|
| IS 20 | Formenkühlung | 6,4 | 7,5 | 27,5 |
| | Vertiflow | 0,4 | 0,5 | 28,0 |
| IS 21 | Formenkühlung | 3,1 | 3,7 | 26,5 |
| | Vertiflow | 0,6 | 0,7 | 26,5 |
| IS 22 | Formenkühlung | 1,2 | 1,4 | 26,0 |
| | Vertiflow | 2,1 | 2,5 | 25,0 |
| IS 23 | Formenkühlung | 1,1 | 1,3 | 23,7 |
| IS 24 | Formenkühlung | 2,1 | 2,4 | 23,0 |
| IS 25 | Formenkühlung | 2,0 | 2,4 | 24,0 |
| Summe | | 19,1 | 22,4 | |

Tabelle 3-XXVI: 2. Messkampagne – Ergebnisse Braunglasformenkühlung

| | | \dot{V} [Bm ³ /s] | \dot{M} [kg/s] | T _{in} [°C] |
|--------------|---------------|--------------------------------|------------------|----------------------|
| IS 40 | Formenkühlung | 3,7 | 4,5 | 20,5 |
| IS 41 | Formenkühlung | 4,0 | 4,7 | 23,0 |
| | Vertiflow | 1,3 | 1,5 | 21,0 |
| IS 22 | Formenkühlung | 3,4 | 4,1 | 19,5 |
| IS 23 | Formenkühlung | 3,3 | 4,0 | 19,0 |
| IS 24 | Formenkühlung | 7,7 | 8,8 | 34,0 |
| | Vertiflow | 1,1 | 1,3 | 34 |
| Summe | | 24,5 | 28,8 | |

3.3.3.3 Elektrodenkühlung

Die elektrische Zusatzheizung der Glaswannen ist mittels Elektrodenheizung realisiert. Deren Anschlusssockeln sind Grenzen in der Betriebstemperatur gesetzt, weshalb sie mittels Wasserkühlung vor thermischer Überbelastung geschützt werden müssen. Das offene Pumpsystem versorgt neben den Elektrodenkühlungen eine Wasserkühlung des Glasgebers, welcher die Rohstoffe in die Wanne befördert. Somit führt die Kühlung des Glasgebers ebenfalls Wärmeenergie aus der Glaswanne ab und wird daher in die Elektrodenkühlung inkludiert. Bei Wanne 4 sind Schwebekörper-Durchflussmessungen installiert sowie analoge Thermometer, welche die Rücklaufemperatur erheben. Ein Ablesen der Messeinrichtungen ergab die in **Tabelle 3-XXVII** angeführten Werte. Die Berechnung nach Formel (2.7) ergibt eine Mischtemperatur von 43,8°C. Die Eintrittstemperatur kann im Sammelbehälter gemessen werden und beträgt 19,5°C.

Tabelle 3-XXVII: 2. Messkampagne – Elektrodenkühlung

| | \dot{V} [l/h] | T_{out} [°C] | | \dot{V} [l/h] | T_{out} [°C] |
|----------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------|
| Elektrodenkühlung 1 | 470 | 44 | Elektrodenkühlung 9 | 470 | 45 |
| Elektrodenkühlung 2 | 470 | 44 | Elektrodenkühlung 10 | 450 | 48 |
| Elektrodenkühlung 3 | 475 | 45 | Elektrodenkühlung 11 | 425 | 43 |
| Elektrodenkühlung 4 | 345 | 47 | Elektrodenkühlung 12 | 390 | 46 |
| Elektrodenkühlung 5 | 455 | 46 | Elektrodenkühlung 13 | 480 | 40 |
| Elektrodenkühlung 6 | 380 | 45 | Elektrodenkühlung 14 | 450 | 41 |
| Elektrodenkühlung 7 | 400 | 44,5 | Elektrodenkühlung 15 | 475 | 41 |
| Elektrodenkühlung 8 | 400 | 46 | Glasgeber | 375 | 36 |

Da weder Schwebekörper-Durchflussmessungen noch analoge Thermometer bei Wanne 2 installiert sind und sich der Aufbau der Wannen stark ähnelt, muss die Annahme getroffen werden, dass beide Elektrodenkühlungen die gleichen Betriebszustände aufweisen.

3.3.4 3. Messkampagne – Abgastemperatur Arbeitswanne und Feeder

Für die Bilanzierung der Arbeitswannen und der Feeder sind die Temperaturen der Abgase, welche in die Produktionshalle abgeleitet werden, erforderlich. Bei dieser Temperaturmessung ist der Einfluss thermischer Strahlung zu berücksichtigen. Um diese Fehlerquelle auszuschließen wird ein Absaugpyrometer, beschrieben in Kapitel 3.3.1.4, zur Datenerhebung herangezogen. In **Abbildung 3-15** sind die zugänglichen Messstellen der Braunglasproduktion, an denen Messdaten erhoben wurden, eingezeichnet.



Abbildung 3-15: Absaugpyrometermesspunkte an der Braunglasproduktion

Bevor die Messdaten erhoben werden, wird die Kühlwasserversorgung kontrolliert. Anschließend wird die Absaugrate über den Ejektor eingestellt und das ASPM in Position gebracht. Dabei wird die Keramikspitze zentriert und so nahe wie möglich an den Abgasauslass herangeführt. Damit soll die Ansaugung von Falschluff aus der Umgebung vermieden werden. Das Thermoelement benötigt einige Minuten, um die Abgastemperatur annehmen zu können. Grundsätzlich ist anzumerken, dass eine periodische Schwankung der Messwerte festzustellen ist. Diese Schwankung, die maximal 80°C betrug, ist auf die

Regelaktivität der Gasbrenner zurückzuführen. Die erhobenen Werte entsprechen den Mittelwerten der Schwankungen und sind in **Tabelle 3-XXVIII** aufgelistet.

Tabelle 3-XXVIII: Messdaten des Absaugpyrometers an der Braunglasproduktion

| Messpunkt | Messort | T [°C] |
|---------------------------------|--------------|--------|
| 1 | Feeder 44 | 1.015 |
| 2 | Arbeitswanne | 850 |
| 3 | Feeder 43 | 890 |
| 4 | Feeder 42 | 1.010 |
| 5 | Arbeitswanne | 970 |
| 6 | Feeder 41 | 1.130 |
| 7 | Feeder 40 | 1.020 |
| Mittelwert Arbeitswannen | | 910 |
| Mittelwert Feeder | | 1.013 |

Aus den Messwerten ist ersichtlich, dass der zusätzliche Heizbedarf mit der Distanz zur Glasschmelzwanne steigt. Aufgrund der hohen Temperatur der aus der Glaswanne kommenden Glasschmelze und der kurzen Distanz zu den Messpunkten 2 und 3 sind die hier erhobenen Temperaturen geringer. Dementsprechend ist die Zusatzheizung an diesen beiden Stellen hauptsächlich wegen der reduzierenden Produktionsbedingungen notwendig. Der höhere Massenstrom durch die Abgänge zweier Feeder und die konsekutiv geringere Verweilzeit der Schmelze im Bereich des Messpunkts 5 lässt den Heizbedarf hier geringfügig steigen.

Für die Bestimmung des Abwärmestroms durch das Abgas wird für die Arbeitswannen eine gemittelte Temperatur von 910°C und für Feeder 1.013°C herangezogen.

Aufgrund der Produktionssituation der Weißglasbehälter im Zusammenspiel mit einem geplanten Stillstand der Linie 20 sind die Abgasauslässe, mit Ausnahme von einem, abgedeckt. Dabei handelt es sich um einen Auslass der Arbeitswanne kurz vor dem Feeder 21, bei dem 1.020°C gemessen wurde. Aufgrund dessen wird die Bestimmung des Wärmestroms des Abgases der AW und Feeder der Weißglasproduktion auf Grundlage der bei Braunglas erhobenen Temperaturen berechnet.

3.3.5 4. Messkampagne – Abgastemperatur Kühlöfen

Die Kühlöfen setzen die fertigen Flaschen einer kontrollierten Atmosphärentemperatur aus, um innere Spannungen kontrolliert abzubauen und somit die Sprödigkeit zu verringern. Da der Wärmeausdehnungskoeffizient abhängig von der Temperatur ist, schrumpft die Glasoberfläche bei zu schnellem Abkühlen in einem geringeren Ausmaß als das Glasinnere. Das führt zu Kühlspannungen, welche auch nach Erreichen der Raumtemperatur erhalten bleiben und das Gefäß bruchempfindlicher machen. Um diese inneren Spannungen abzubauen, werden die Glasbehälter im Kühlöfen zunächst erhitzt und anschließend langsam abgekühlt. Das Abgas der gasbefeuchten Kühlöfen soll über Auslässe an der Oberseite des Ofens abgeführt werden, aber auch am Eingang und Ausgang des Kühlöfens kann Abgas austreten. [3]

Aufgrund des äußerst geringen Volumenstroms sind die Abgasströme an den Auslässen an der Oberseite der Öfen grundsätzlich nicht bis kaum messtechnisch erfassbar. Die Temperaturen beim Ausgang des Kühlöfens konnten an vier von insgesamt 11 Kühlöfen gemessen werden und betragen im Mittel 70°C. Luftgeschwindigkeitsmessungen an denselben vier Messstellen ergaben, dass kein Luftstrom oder Abgasstrom austritt. Aufgrund dessen wird davon ausgegangen, dass das gesamte Abgas am Eingang der Kühlöfen entweicht.

Die Atmosphärentemperaturen am Einlass der Glasbehälter werden von Stölzle Oberglas GmbH mit Thermoelementen gemessen, welche vor Wärmestrahlung baulich geschützt sind. Stichprobenmessungen ergeben sehr gute Übereinstimmungen mit den erfassten Werten. Aus diesem Grund werden im Folgenden die von Stölzle Oberglas GmbH erfassten Werte verwendet, welche in **Tabelle 3-XXIX** gelistet sind. Die mittlere Temperatur des Abgases der Kühlöfen für Weißglas beträgt somit 570°C und jene von Braunglas 563°C.

Tabelle 3-XXIX: Abgastemperaturen am Eingang der Kühlöfen

| Kühlöfen | T [ C] | Mittlere Temp. [ C] |
|----------|--------|---------------------|
| 20 | 570 | 570 |
| 21 | 580 | |
| 22 | 560 | |
| 23 | 595 | |
| 24 | 560 | |
| 25 | 555 | |
| 40 | 575 | 563 |
| 41 | 560 | |
| 42 | 560 | |
| 43 | 560 | |
| 44 | 560 | |

3.4 Analyse des Energieverbrauchs des heißen Endes

Anhand der vorhandenen Strom- und Gasz hlerdaten wird an dieser Stelle der grundsätzliche Energieverbrauch des heißen Endes der Glashütte analysiert. Es werden die Energieverbräuche von Strom und Erdgas dargestellt.

3.4.1 Gesamtverbrauch

Durchschnittlich wurden im Betrachtungszeitraum, wie aus **Tabelle 3-XXX** ersichtlich, 20,4 GWh/M für das heiße Ende aufgewendet. Rund 75% der Energie wird in Form von Erdgas bezogen. Die zwei gr o ten Verbraucher sind mit 35,7% und 23,2% am Gesamtenergieverbrauch die Glasschmelzwannen 2 und 4. Somit wird zum Schmelzen der Rohstoffe rund 58,9% der Gesamtenergie benötigt. Die Arbeitswannen und Feeder benötigen zudem jeweils rund 18,7% der Gesamtenergie. Somit werden für das Schmelzen der Rohstoffe und deren Verteilung ca. 77,6% der Gesamtenergie benötigt.

Tabelle 3-XXX: Durchschnittlicher Gesamtenergieverbrauch pro Monat

| | Strom [kWh] | Gas [Nm³] | Gas [kWh] | Summe [kWh] | Anteil [%] |
|-----------------------------|------------------------|---------------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Gemein- haus | 17.315 | 0 | 0 | 17.315 | 0,08 |
| Glaswanne 2 | 813.835 | 645.871 | 6.476.013 | 7.289.848 | 35,73 |
| Glaswanne 4 | 883.232 | 383.727 | 3.847.550 | 4.730.782 | 23,19 |
| Rauchgas- weg | 85.760 | 0 | 0 | 85.760 | 0,42 |
| Arbeits- wanne 2 | 0 | 78.211 | 784.205 | 784.205 | 3,84 |
| Arbeits- wanne 4 | 0 | 62.625 | 627.928 | 627.928 | 3,08 |
| Feeder | 0 | 239.574 | 2.402.158 | 2.402.158 | 11,77 |
| IS- Maschinen | 143.952 | 0 | 0 | 143.952 | 0,71 |
| Formen- kühlung | 702.561 | 0 | 0 | 702.561 | 3,44 |
| Vertiflow | 90.556 | 0 | 0 | 90.556 | 0,44 |
| Formenofen | 0 | 1.111 | 11.140 | 11.140 | 0,05 |
| Rinnenofen | 0 | 1.284 | 12.878 | 12.878 | 0,06 |
| Kühlöfen | 100.107 | 138.085 | 1.384.549 | 1.484.656 | 7,28 |
| Druckluft 4 bar | 1.606.922 | 0 | 0 | 1.606.922 | 7,88 |
| Druckluft 8 bar | 336.799 | 0 | 0 | 336.799 | 1,65 |
| Druckluft Vakuum | 76.966 | 0 | 0 | 76.966 | 0,38 |
| Summe | 4.858.003 | 1.550.488 | 15.546.421 | 20.404.426 | 100,00 |
| Anteil | 23,8 | | 76,2 | 100,0 | |

3.4.1.1 Elektrischer Energieverbrauch

Im Betrachtungszeitraum (April bis September 2019) wurden am heißen Ende durchschnittlich 4,86 GWh elektrische Energie im Monat verbraucht. In **Abbildung 3-16** ist die Aufschlüsselung der Anteile der entsprechenden Aggregate dargestellt.

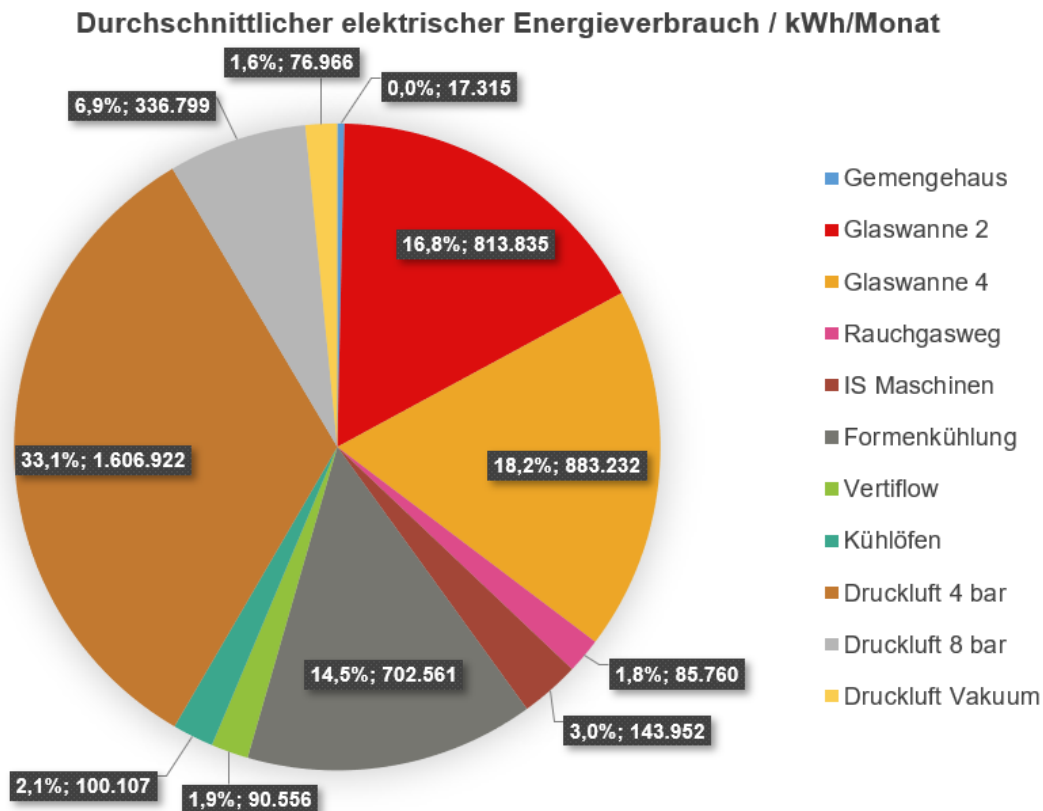


Abbildung 3-16: Durchschnittlicher elektrischer Energieverbrauch in kWh/M

Der größte Einzelverbraucher ist, mit rund einem Drittel des Gesamtverbrauchs, die Druckluftbereitstellung von 4 bar. Alle Kompressoren benötigen 41,6% der Gesamtenergie. Die Glasschmelzwannen verbrauchen zusammen 35,0% der elektrischen Gesamtenergie. Als dritter relevanter Verbund für den Stromverbrauch sind die Formenkühlungen mit 14,5% zu nennen. Die Formenkühlung und der Vertiflow werden benötigt, um die Formen der IS-Maschine zu kühlen. Der Anteil der IS-Maschinen inkludiert auch die Verbräuche des Transportbandes, Querbandes und Einschubs. Fasst man nun die elektrischen Verbräuche der IS-Maschinen und der Maschinen zur Kühlluftbereitstellung (Formenkühlung und Vertiflow) zusammen, erhält man 19,4% des Gesamtverbrauchs.

Die soeben genannten Hauptverbraucher (Druckluftbereitstellung mit 40,0%, Glasschmelzwannen mit 35,0% und IS-Maschine mit 19,4%) haben einen Anteil von 94,4% des elektrischen Gesamtverbrauchs.

3.4.1.2 Erdgasverbrauch

Der durchschnittliche Erdgasverbrauch der Aggregate im Betrachtungszeitraum (April bis September 2019) von Stölzle Oberglas GmbH ist in **Abbildung 3-17** dargestellt. Im Durchschnitt wurden 1,55 Mio. Nm³ oder 15,55 GWh Erdgas pro Monat verbraucht.

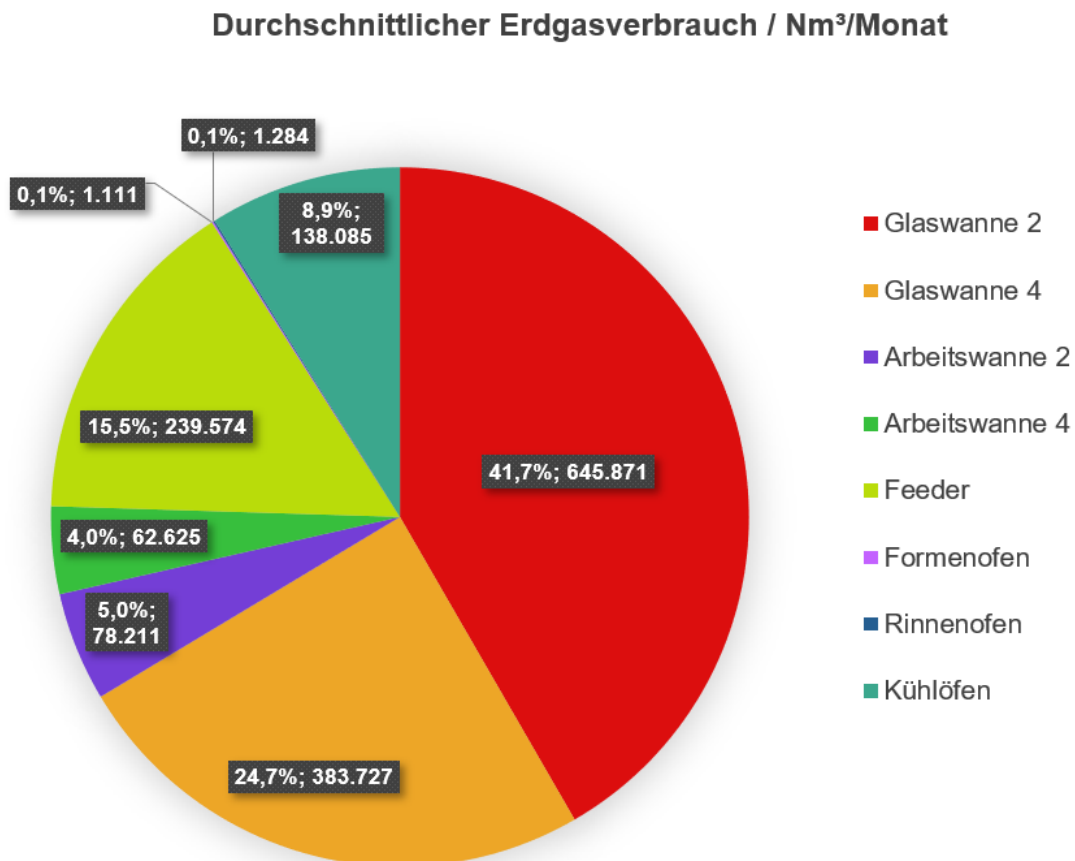


Abbildung 3-17: Durchschnittlicher Erdgasverbrauch in Nm³/M

Mit 1,41 Mio. Nm³ Erdgas pro Monat bzw. 90,9% ist der Verbrauch für das Aufschmelzen und Verteilen der Glasschmelze bis zur IS-Maschine überwiegend.

Die Aggregate Formenofen und Rinnenofen sind für die Gesamtbetrachtung vernachlässigbar. Da es sich bei diesen um Hilfsaggregate für die IS-Maschine handelt, werden sie in der Energiebetrachtung nicht weiterverfolgt.

3.4.2 Gegenüberstellung der Energiedaten von 2018 und 2019

Die Daten dieser Arbeit werden mit den Daten der Vorgängerarbeit von Dipl.Ing. Gregor Berger aus dem Zeitraum von Februar bis August 2018 verglichen. Im Folgenden wird dieser Zeitraum mit „2018“ abgekürzt und der Betrachtungszeitraum dieser Arbeit (April bis September 2019) mit „2019“.

Ein besonderes Augenmerk liegt auf den Veränderungen aufgrund der Erweiterung der Weißglasproduktion um die Linie 20. Der Energieverbrauch hat sich von 2018 auf 2019 von 19.466 MWh/M auf 20.404 MWh/M gesteigert. Das entspricht einem Zuwachs von 938 MWh/m oder 4,8%.

3.4.2.1 Vergleich Massenstrom

In **Tabelle 3-XXXI** sind die Massenströme von 2018 und 2019 gegenübergestellt.

Tabelle 3-XXXI: Vergleich Massenstrom 2018 / 2019

| | Massenstrom 2018 [Tonnen/Tag] | Massenstrom 2019 [Tonnen/Tag] |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Wanne 2 | 137 | 175 |
| Wanne 4 | 118 | 124 |
| Gesamt | 255 | 299 |

Der Massenstrom, welcher eingeschmolzen wurde, hat sich bei Weißglas um 38 Tonnen pro Tag und damit um 27,7% auf Basis von 2018 gesteigert. Damit entfällt der Zuwachs beinahe zur Gänze auf die neue Linie 20, welche 37,2 Tonnen pro Tag verarbeitet. Der Massenstrom der Braunglassschmelze konnte ebenfalls um rund 5% erhöht werden.

3.4.2.2 Vergleich elektrischer Energieverbrauch

Der monatliche elektrische Energieverbrauch von 2018 zu 2019 hat sich um 21% erhöht, siehe **Tabelle 3-XXXII**.

Tabelle 3-XXXII: Vergleich durchschnittlicher elektrischer Energieverbrauch pro Monat 2018 / 2019

| | Durchschnitt 2018 [kWh/M] | Durchschnitt 2019 [kWh/M] | Änderung [kWh/M] | Änderung [%] |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------|
| Gemengehaus | 17.642 | 17.315 | -327 | -1,9 |
| Glaswanne 2 | 503.234 | 813.835 | 310.601 | 61,7 |
| Glaswanne 4 | 790.456 | 883.232 | 92.776 | 11,7 |
| Rauchgasweg | 78.187 | 85.760 | 7.573 | 9,7 |
| IS-Maschinen | 147.140 | 143.952 | -3.188 | -2,2 |
| Formenkühlung | 561.097 | 702.561 | 141.464 | 25,2 |
| Vertiflow | 73.876 | 90.556 | 16.680 | 22,6 |
| Kühlöfen | 93.416 | 100.106 | 6.691 | 7,2 |
| Druckluft 4 bar | 1.454.894 | 1.606.921 | 152.028 | 10,4 |
| Druckluft 8 bar | 224.164 | 336.799 | 112.635 | 50,2 |
| Vakuum | 72.283 | 76.965 | 4.683 | 6,5 |
| Summe | 4.016.389 | 4.858.002 | 841.613 | 21,0 |

Besonders auffallend ist der verstärkte Einsatz der elektrischen Zusatzheizung der Glaswanne 2. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass aufgrund des erhöhten Massenstroms die Gasbrenner an Kapazitätsgrenzen stoßen und somit mit elektrischer Energie ein Ausgleich geschaffen werden muss. Die zweite Auffälligkeit ist der enorme Zuwachs des Energieverbrauchs für 8 bar Druckluft von rund 50%. Auch der unproportionale Mehrverbrauch bei Formenkühlung und Vertiflow sind schwer schlüssig nachzuvollziehen.

Die Stromzählerdaten sind, wie bereits mehrfach erwähnt, mit besonderer Sorgsamkeit zu betrachten. Die Aufzeichnungen über die elektrischen Zusatzheizungen, die Druckluftbereitstellungen sowie die Vakuumversorgung sind zuverlässig und können als solche direkt zum Vergleich herangezogen werden.

3.4.2.3 Vergleich Erdgasverbrauch

Der monatliche Durchschnittserdgasverbrauch ist von 1.540.859 Nm³ im Jahr 2018 um 0,6% auf 1.550.488 Nm³ im Jahr 2019 gewachsen. In **Tabelle 3-XXXIII** sind die Werte von 2018 jenen von 2019 gegenübergestellt.

Tabelle 3-XXXIII: Vergleich Erdgasdurchschnittsverbrauch pro Monat 2018 / 2019

| | Durchschnitt 2018 [Nm ³] | Durchschnitt 2019 [Nm ³] | Änderung [Nm ³] | Änderung [%] |
|-----------------------|---|---|--------------------------------|-----------------|
| Wanne 2 | 588.812 | 645.871 | 57.059 | 9,7 |
| Wanne 4 | 368.138 | 383.727 | 15.589 | 4,2 |
| Arbeitswanne 2 | 99.871 | 78.211 | -21.660 | -21,7 |
| Arbeitswanne 4 | 75.813 | 62.625 | -13.188 | -17,4 |
| Feeder | 285.918 | 239.574 | -46.344 | -16,2 |
| Formenofen | 1.275 | 1.111 | -164 | -12,9 |
| Rinnenofen | 1.533 | 1.284 | -249 | -16,2 |
| Kühlöfen | 119.499 | 138.085 | 18.586 | 15,6 |
| Summe | 1.540.859 | 1.550.488 | 9.629 | 0,6 |

Der Zuwachs des Verbrauchs ist hauptsächlich den Schmelzwannen zuzuordnen. Aufgrund des gestiegenen Massenstroms ist der Mehrverbrauch leicht erklärbar. Ein zweiter Grund für den Mehrverbrauch ist die gestiegene Temperatur der Glasschmelze aus den Wannen. Diese Temperatur lag für Wanne 2 2018 bei 1.236°C und 2019 bei 1.312°C. Der gesunkene Verbrauch der Arbeitswannen und Feeder ist somit trotz steigenden Massenstroms nachvollziehbar. Der gesunkene Verbrauch bei den Aggregaten Formenofen und Rinnenofen ist erfreulich, allerdings im Gesamtkontext marginal und damit vernachlässigbar.

Der gestiegene Verbrauch der Kühlöfen ist nur zu rund der Hälfte der neuen Linie zuzuschreiben. Aus **Tabelle 3-XXXIV** ist ersichtlich, dass der Kühlöfen 20 einen Erdgasverbrauch von rund 8.800 Nm³ Erdgas hat und somit einen sehr geringen Verbrauch aufweist. Der Vergleich der Einzelkühlöfenverbräuche zeigt besonders einen Mehrverbrauch der Kühlöfen 41 und 23. Im Durchschnitt ist der Erdgasverbrauch der bestehenden Kühlöfen

um 12,7% gestiegen. Da die Messwerte aus **Tabelle 3-XXXIII** und aus **Tabelle 3-XXXIV** aus verschiedenen Quellen stammen, gibt es eine geringe Diskrepanz. Die Abweichung zwischen den monatlichen Durchschnittsverbräuchen beträgt etwa 0,5% und kann mit Messungenauigkeiten erklärt werden.

Tabelle 3-XXXIV: Vergleich Kühlöfenverbräuche 2018 / 2019

| Linie | Durchschnitt 2018 [Nm ³] | Durchschnitt 2019 [Nm ³] | Änderung [Nm ³] | Änderung [%] |
|--------------|---|---|--------------------------------|-----------------|
| 20 | | 8.816 | 8.816 | |
| 21 | 12.569 | 12.514 | -55 | -0,4 |
| 22 | 11.238 | 11.963 | 725 | 6,5 |
| 23 | 13.665 | 15.286 | 1.621 | 11,9 |
| 24 | 14.791 | 15.404 | 613 | 4,1 |
| 25 | 10.083 | 10.637 | 554 | 5,5 |
| 40 | 14.379 | 15.394 | 1.015 | 7,1 |
| 41 | 9.345 | 12.172 | 2.827 | 30,3 |
| 42 | 12.023 | 12.778 | 755 | 6,3 |
| 43 | 8.483 | 8.313 | -171 | -2,0 |
| 44 | 15.221 | 14.016 | -1.205 | -7,9 |
| Summe | 121.797 | 137.292 | 15.495 | 12,7 |

3.4.3 Bilanzierung der einzelnen Produktionsaggregate

Zur Bilanzierung der einzelnen Produktionsaggregate wurden diese in Form einer Blackbox betrachtet. Eine Blackbox bezeichnet ein System, welches anhand der ein- und ausgehenden Ströme beschrieben wird. Für die Bilanzierung sind die inneren Prozesse des Systems nicht von Interesse.

3.4.3.1 Wannen & Regeneratoren

Die erhobenen Daten aus den Kapiteln 3.2.1.1 und Kapitel 3.3.3 ermöglichen eine Bilanzierung der Wannen und Regeneratoren, wie in **Abbildung 3-18** dargestellt. Darin sind absolute Energieinhalte der Ströme angegeben.

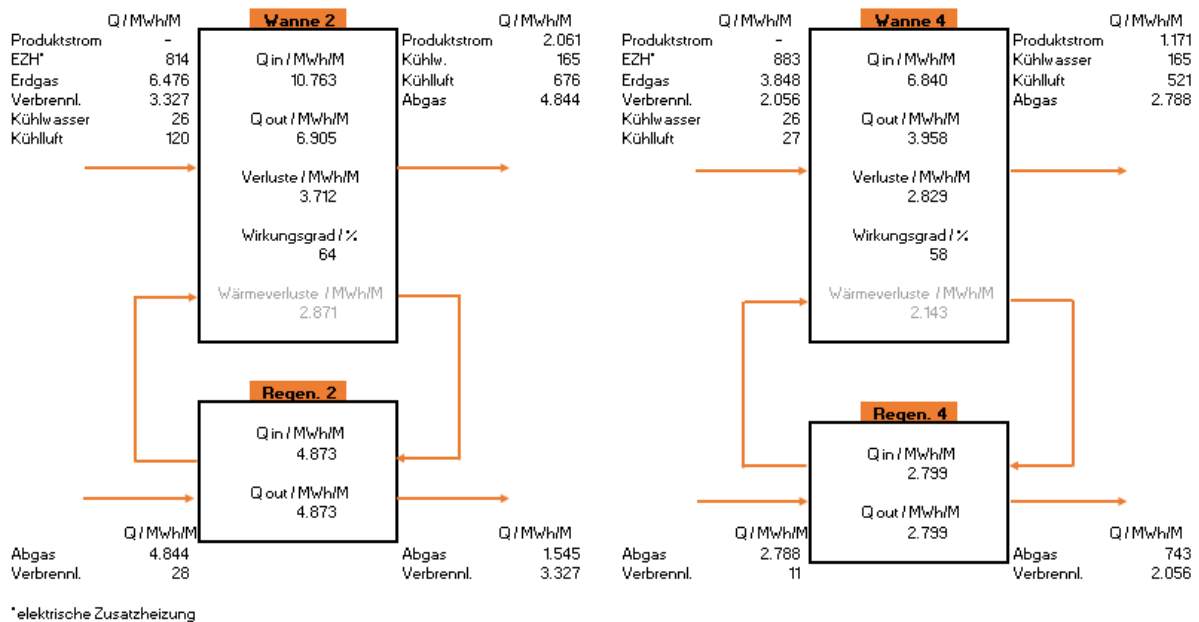


Abbildung 3-18: Bilanzierung der Wannen & Regeneratoren

Zur Bilanzierung des Regenerators wird die Formel (2.4) verwendet. Aus der Massenbilanz des verbrannten Erdgases und dem Luftüberschuss λ ist die Menge an Abgasen der Wannen bekannt. Die Eingangs- und Ausgangstemperaturen der Abgase sind ebenfalls bekannt und die Wärmekapazität des Gasgemisches wird wie in Kapitel 2.3.1.1 erläutert ermittelt. Daraus ergibt sich für den Regenerator 2 eine abgegebene Energie von 3,3 GWh/M und für den Regenerator 4 eine Energie von 2,0 GWh/M, was dem Energieinhalt der Verbrennungsluft entspricht. Die Verbrennungsluft wird mit rund 1.300°C den Brennern zugeführt und trägt somit einen wesentlichen Anteil zum Schmelzvorgang bei.

Da die Rohstoffe nicht vorgewärmt werden, haben sie keinen Energieeintrag beim Eingang in die Schmelzwannen. Nach dem Schmelzen der Rohstoffe hat der Produktstrom des Weißglases eine durchschnittliche Temperatur von 1.312°C und jener des Braunglas 1.095°C. Auch der Wärmeinhalt des Produktstroms wird über Formel (2.4) bestimmt. Somit verlässt die Weißglasschmelze die Wanne mit einem Energieinhalt von 2,1 GWh/M und Braunglasschmelze mit 1,2 GWh/M.

Die erhobenen Daten, wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, ergeben einen Energieinhalt der Kühlluft nach dem Erwärmen von 676 MWh/M für Wanne 2 und 521 MWh/M für Wanne 4. Das

entspricht einer Energieabfuhr über die Luftkühlung von 556 MWh/M bei Wanne 2 und 494 MWh/M bei Wanne 4. Dazu kommt für die Elektrodenkühlung über Kühlwasser eine Wärmeabfuhr von 139 MWh/M. Wie aus der Bilanzierung in **Abbildung 3-18** ersichtlich, handelt es sich bei den erfassbaren Wärmeverlusten durch Wannen- und Elektrodenkühlung um einen Bruchteil der Gesamtverluste der Aggregate. Die abgeführte Wärme mittels Luft und Elektrodenkühlung wurden nach Formel (2.4) bestimmt. Weitere Wärmeverluste treten in Form von Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung auf. Der Wirkungsgrad ist der Quotient aus ausgehender Energie (Produktstrom und Abgas) und zugeführter Energie. In **Abbildung 3-19** sind die Energieflüsse der Wannen und der Regeneratoren graphisch dargestellt.

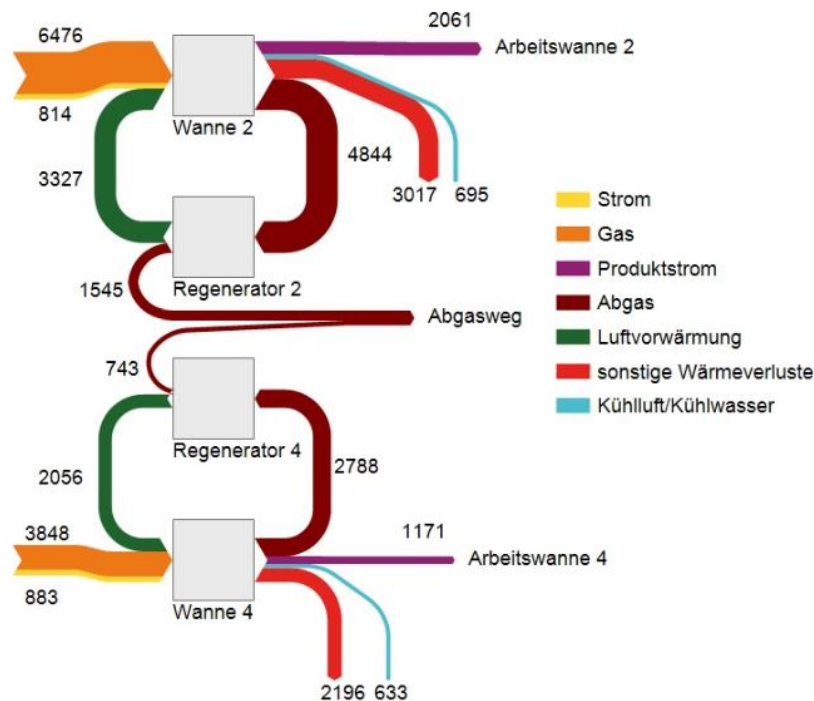


Abbildung 3-19: Darstellung der Energieflüsse der Wannen & Regeneratoren in MWh/M

3.4.3.2 Arbeitswannen und Feeder

Aus der Energiebilanz der Aggregate, siehe **Abbildung 3-20**, lässt sich anhand der nicht erfassten Verluste erkennen, dass ein durchaus relevanter Anteil durch Strahlung und Konvektion verloren geht. Die Wärmehalte des Abgases der Weißglasaggregate betragen 1,1 GWh/M und jene der Braunglasaggregate 1,0 GWh/M. In **Abbildung 3-21** sind die Energieflüsse der Arbeitswannen und der Feeder dargestellt.

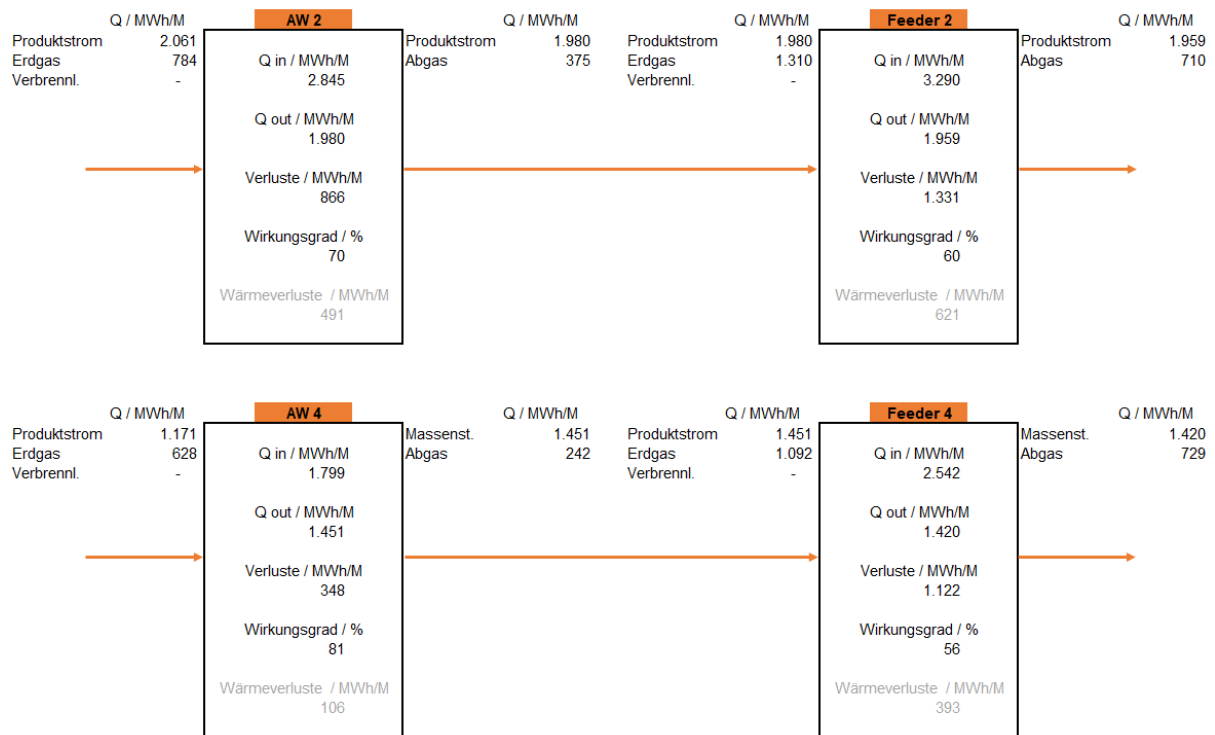


Abbildung 3-20: Energiebilanz der Arbeitswannen und Feeder

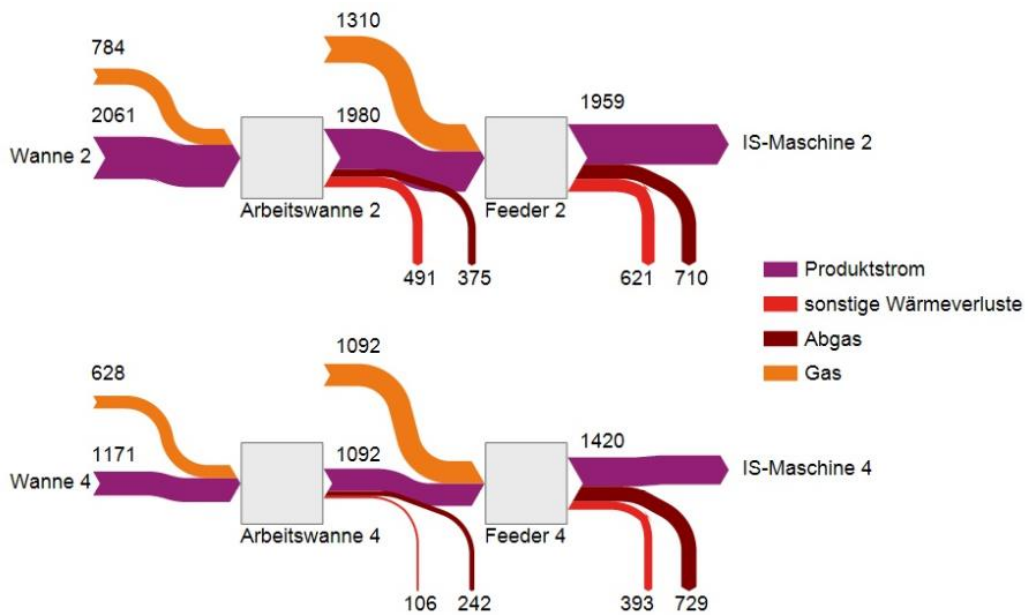


Abbildung 3-21: Darstellung der Energieflüsse der Arbeitswannen und Feeder in MWh/M

3.4.3.3 IS-Maschine

Die Datenerfassung in Kapitel 3.2.1.3 zeigte einige fehlende Daten zur Bilanzierung auf. Der Massenstrom an Kühlluft der Formenkühlung und des Vertiflows wurde in Kapitel 3.3.3 erhoben und die Glastemperatur in Kapitel 3.3.2.

Die Erfassung der Temperatur der Kühlluft nach deren Erwärmung in der Formenkühlung bzw. im Vertiflow ist aufgrund schnell bewegter Apparaturen, sowie Platzmangel nicht möglich. Sie wird rechnerisch über die Energiezunahme ermittelt, die der Energieabgabe der Tropfen beim Erstarren zu Flaschen entspricht. Dabei werden der Einfluss von Wärmestrahlung, die Wärmeleitung an angrenzenden Bauteilen und die durch freie Konvektion abgeführte Wärmemenge vernachlässigt. Die Temperatur der Glastropfen wurde in Kapitel 3.2.1.2 beschrieben und die Temperatur der fertigen Glasbehälter wurde in Kapitel 3.3.2 bestimmt. Die Auswertung dieser Erhebungen ergibt einen Energieinhalt der Luft nach dem Kühlen von 1.133 MWh/M bei Weißglas und 901 MWh/M bei Braunglas. Das ergibt eine Wärmeabfuhr von 956 MWh/M für Weißglas und 686 MWh/M für Braunglas. Unter der Prämisse, dass in jeder Station der IS-Maschine die gleiche Wärmemenge abgeführt wird, ergibt das eine Ausgangstemperatur der Kühlluft von 85°C für Weißglas und 58°C für Braunglas.

In **Abbildung 3-22** ist die Energiebilanz und in **Abbildung 3-23** sind die Energieflüsse der IS-Maschinen von Weißglas und Braunglas dargestellt.

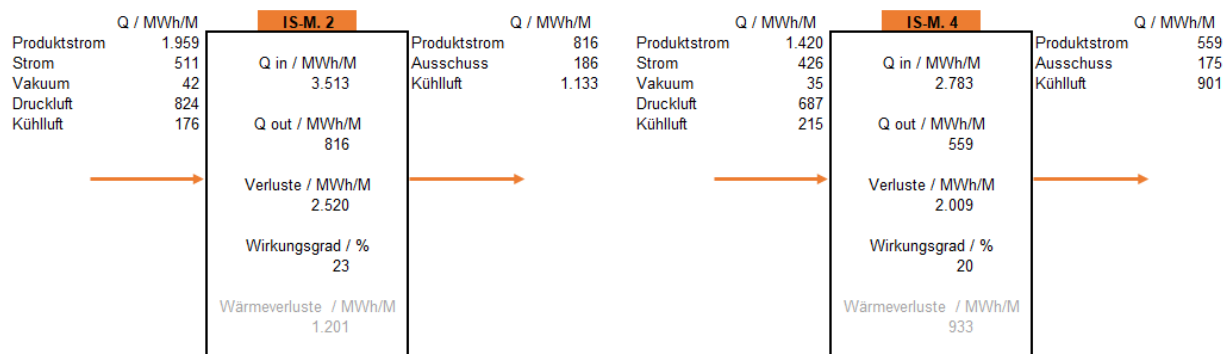


Abbildung 3-22: Energiebilanz der IS-Maschinen

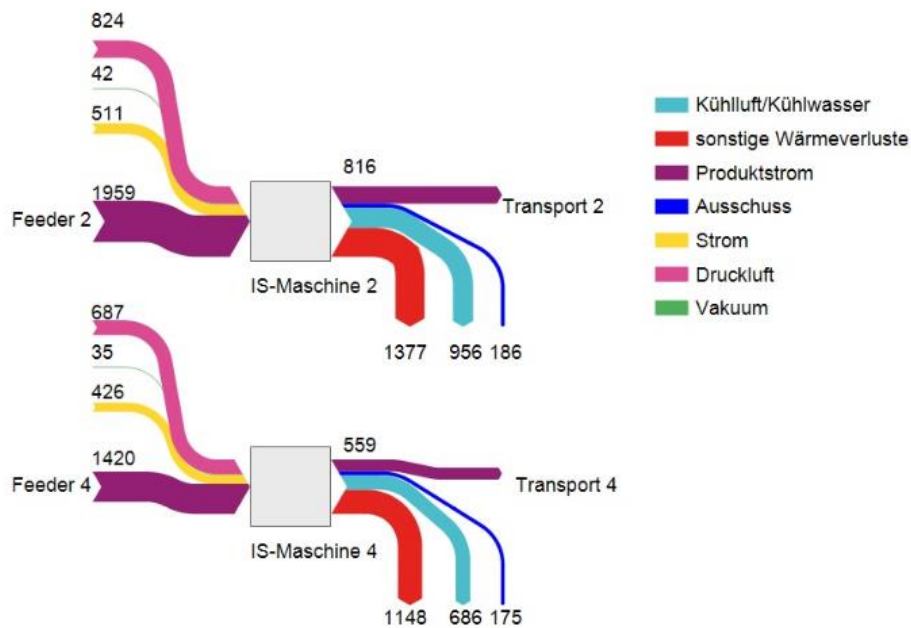


Abbildung 3-23: Darstellung der Energieflüsse der IS-Maschinen in MWh/M

3.4.3.4 Transportband

Die Energiebilanz der Transportaggregate ist in **Abbildung 3-24** ersichtlich.

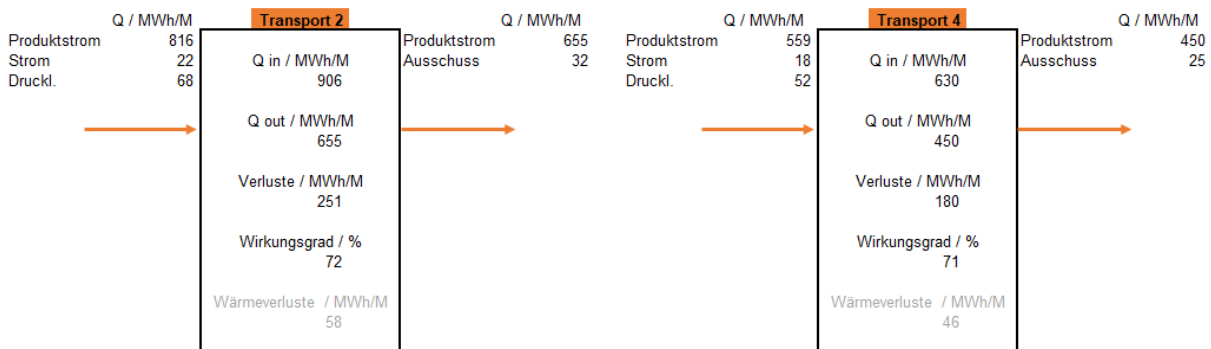


Abbildung 3-24: Energiebilanz der Transportbänder

Der Energieverlust der fertigen Behältergläser an die Umgebung, aufgrund von Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung, ergibt sich durch den Energieinhalt der Glasbehälter vor und nach dem Transportband nach Formel (2.4). Die Bestimmung der Temperaturen der Gläser wurde in Kapitel 3.3.2 beschrieben. Damit betragen die Verluste durch den Transport 161 MWh/M für Weißglas und 109 MWh/M für Braunglas. Der Wärmeinhalt des Ausschusses beträgt hingegen nur 32 MWh/M bei Weißglas und 25 MWh/M bei Braunglas. Zum Ausblasen des Ausschusses wurde rund doppelt so viel Energie aufgewendet. Die Energieflüsse der Transportbänder sind in **Abbildung 3-25** dargestellt.

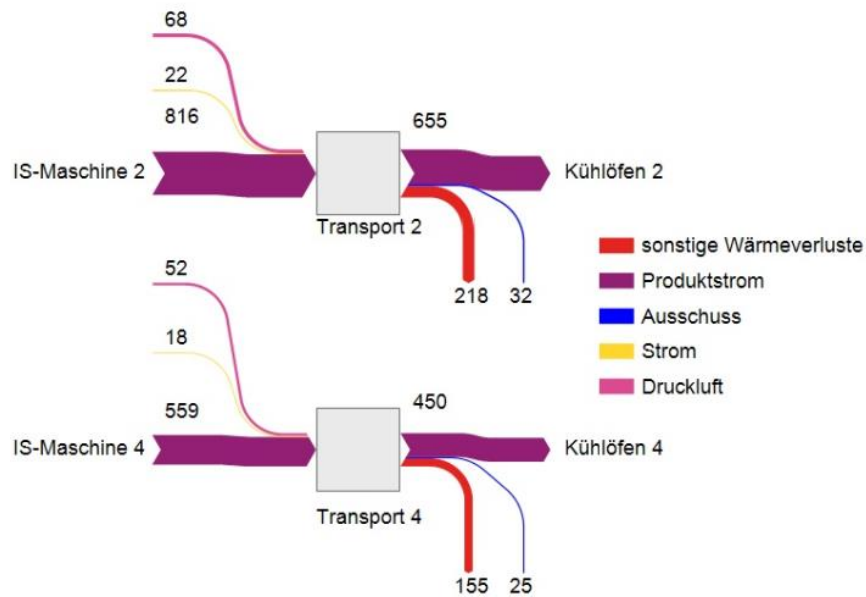


Abbildung 3-25: Darstellung der Energieflüsse der Transportbänder in MWh/M

3.4.3.5 Kühlöfen

Die Flaschentemperaturen betragen wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben am Eingang des Kühlofens 572°C und am Ausgang 70°C. Da die Gasbrenner der Kühlöfen über keine Verbrennungsluftmessung verfügen und manuell eingestellt werden, wird näherungsweise eine Luftzahl von 1,1 angenommen. Die Abgastemperatur beträgt wie in Kapitel 3.3.5 beschrieben 563°C für Braunglas und 570°C für Weißglas. Somit sind alle Größen für eine Energiebilanz bestimmt und es ergibt sich eine Energiebilanz wie in **Abbildung 3-26** dargestellt.

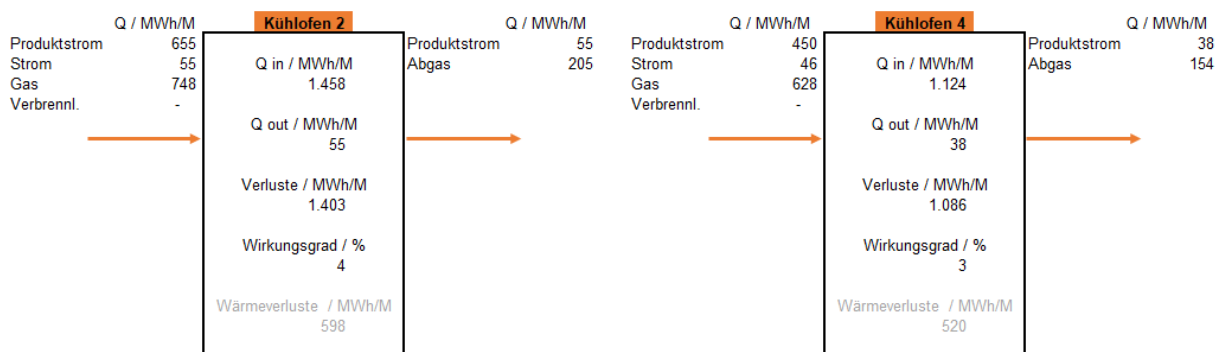


Abbildung 3-26: Energiebilanz der Kühlöfen

Der große Anteil an nicht erfassten Verlusten lässt sich auf nicht quantifizierbaren Abgasströme aus dem Dach des Ofens zurückführen. Etwaige andere Verlustquellen sind schwer zu erheben und benötigen eine nähere Betrachtung der Brennertechnik, der

Abgaszusammensetzung sowie der Verfahrensführung. Dieser große Energiestrom ist in **Abbildung 3-27** ebenfalls ersichtlich. Der elektrische Bedarf der Aggregate ist in Relation zu den anderen Energieströmen äußerst gering und daher in der Grafik schwer ersichtlich.

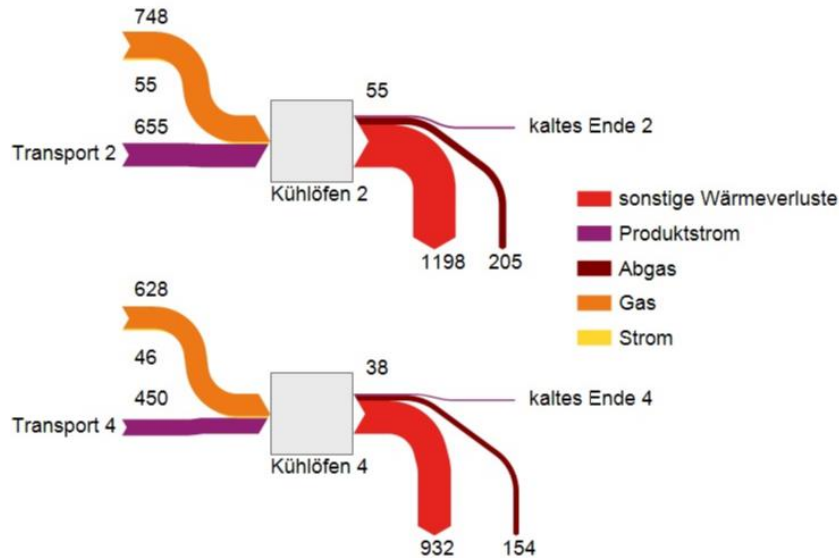


Abbildung 3-27: Darstellung der Energieflüsse der Kühltöfen in MWh/M

3.4.4 Bilanzierung des Abgaswegs

Nach dem Produktionsprozess werden nun die einzelnen Bestandteile des Abgaswegs bilanziert.

3.4.4.1 Frischluftquenche

Um das Abgas auf 415°C abzukühlen, wird Frischluft beigemengt, wodurch sich nach Formel (2.8) eine neue Wärmekapazität einstellt. Da die Umgebungstemperatur mit 15°C die Bezugsgröße dieser Bilanzierung darstellt, besitzt die Umgebungsluft keinen Energieinhalt. Somit wird dem Abgasstrom durch die Beimengung von Frischluft keine Energie zu- oder abgeführt. Aufgrund der Energieerhaltung kann der Bedarf an Frischluft rekursiv berechnet werden.

Die rekursive Bestimmung des Massenstroms an benötigter Frischluft ergibt 3.146 t/M bei einer Temperatur von 15°C. Somit wird rund 22% des Abgasmassenstroms an Frischluft beigemengt, um die höchstzulässige Temperatur nicht zu überschreiten.

3.4.4.2 Elektrofilter

Die Energieströme des Elektrofilters sind in **Abbildung 3-28** bilanziert.

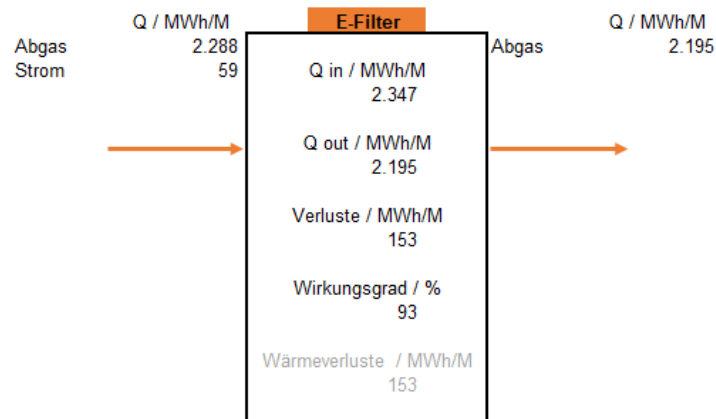


Abbildung 3-28: Energiebilanz des E-Filters

Der Energieinhalt des Abgases wird vor und nach dem Elektrofilter mittels Formel (2.4) bestimmt. Die Wärmeverluste werden aus der Differenz der Ströme berechnet und setzen sich nicht nur aus Wärmeleitung und Wärmestrahlung zusammen, da auch der Austrag an warmem Staub berücksichtigt werden muss. Die Energieströme des E-Filters sind in **Abbildung 3-29** dargestellt.

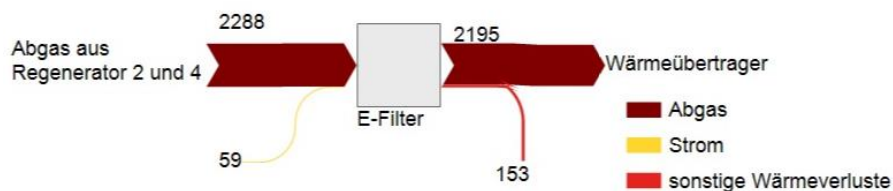


Abbildung 3-29: Darstellung der Energieflüsse des E-Filters in MWh/M

3.4.4.3 Wärmeübertrager

Es wird festgelegt, dass die gesamte aus dem Abgas entnommene Energie ohne Verluste auf das Wasser des Fernwärmenetzes übertragen wird. Dies ist aufgrund der Tatsache, dass Wärmeübertrager einen ausgesprochen hohen Wirkungsgrad besitzen, und des Umstandes, dass die Temperaturen im Abgasstrom nicht aufgezeichnet werden plausibel. In der Gesamtbetrachtung erreicht das Aggregat einen Wirkungsgrad von 99%, da der elektrische Energiebedarf der Mess- und Pumpeinrichtungen mit rund 1% berücksichtigt werden muss. Es ergibt sich eine Temperaturabnahme des Abgases von 395°C auf 103°C. In **Abbildung 3-30** ist die Energiebilanz und in **Abbildung 3-31** sind die Energieströme des Wärmeübertragers ersichtlich.

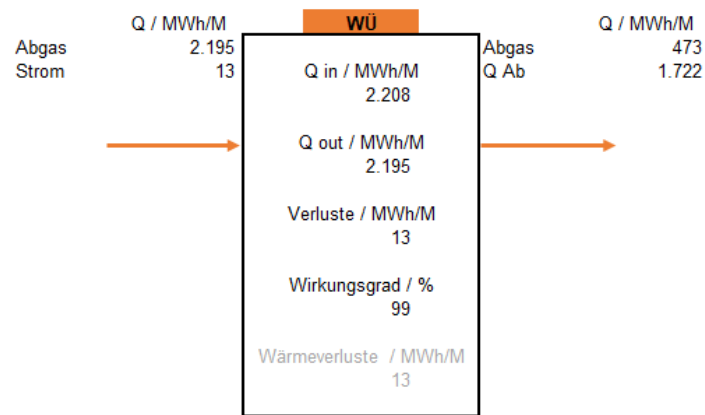


Abbildung 3-30: Energiebilanz des Wärmeübertragers

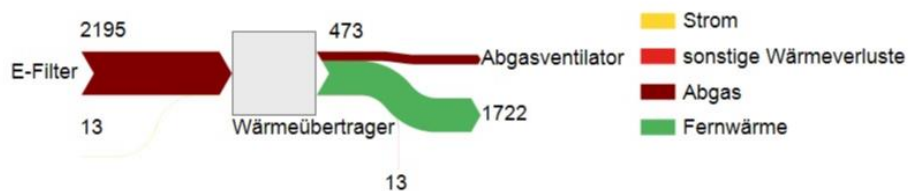


Abbildung 3-31: Darstellung der Energieflüsse des Wärmeübertragers in MWh/M

3.4.4.4 Abgasventilator und Kamin

Der elektrische Wirkungsgrad eines Ventilators liegt bei rund 40%, wodurch sich ein Energieverbrauch von rund 13 MWh/M ergibt [23]. Aus **Abbildung 3-32** ist ersichtlich, dass 473 MWh/M den Produktionsprozess über den Kamin verlassen. Die Energieströme des Abgasventilators sind in **Abbildung 3-33** dargestellt.

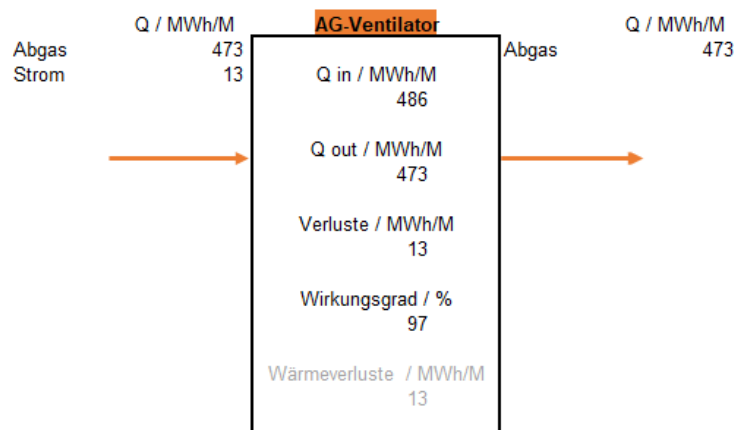


Abbildung 3-32: Energiebilanz des Abgasventilators

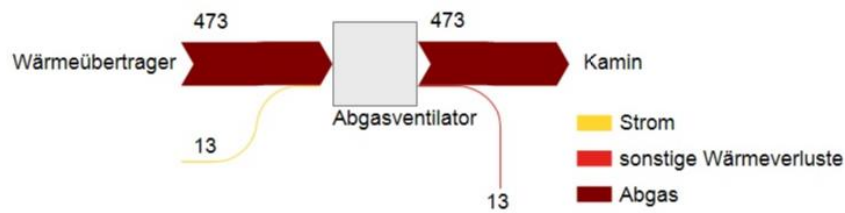


Abbildung 3-33: Darstellung der Energieflüsse des Abgasventilators in MWh/M

3.4.5 Sankey-Diagramm des heißen Endes

In **Abbildung 3-34** sind die Energieströme der zuvor beschriebenen Aggregate graphisch mittels Sankey-Diagramms dargestellt. Ein Sankey-Diagramm stellt die Mengenflüsse durch proportional dicke Pfeile dar, welche sich farblich unterscheiden. Dabei werden alle Energieeintragsströme der Prozesskette dem ersten Prozessschritt zugeordnet und abzüglich der Verluste des entsprechenden Aggregats an den nächsten Prozessschritt weitergegeben.

Das Diagramm gibt einen schnellen und nachvollziehbaren Überblick über die Gesamtsituation des Produktionsprozesses. So ist ersichtlich, dass die Weißglasproduktion einen größeren Energiebedarf hat als die Braunglasproduktion. Dementsprechend wird mehr Abwärme über das Rauchgas aus der Weißglasproduktion der Abgasbehandlung zugeführt. Die Arten der Verluste sind in Kühlluft/Kühlwasser, Ausschuss und sonstige Verluste gegliedert. Die Verluste der Wannen und IS-Maschinen sind am größten. Hingegen sind die Verluste am Transportband für das Gesamtsystem vernachlässigbar gering.

Zur Abschätzung, wie viel Energie in die Produktionshalle abgegeben wird, stellt man die abgeführte Energie (Wärmemenge im Abgas der Glaswannen vor der Luftquenche und die Wärme der fertigen Glasbehälter) dem Energieeintrag des gesamten Produktionsprozesses gegenüber. Unter der Annahme, dass elektrische Energie zu 100% in Wärme umgewandelt wird, erhält man rund 17,6 GWh/M, die in die Produktionshalle abgegeben werden. Das entspricht einem Anteil von 86% der Gesamtenergie des Produktionsprozesses.

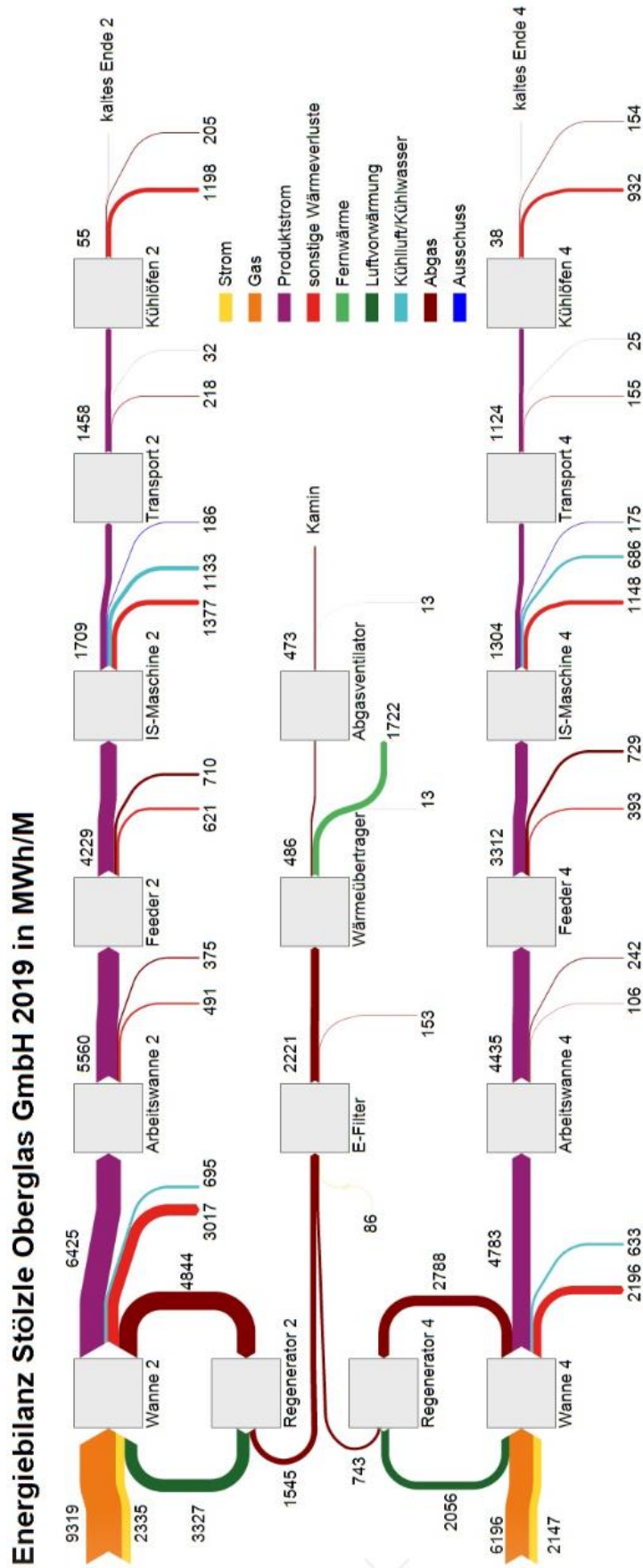


Abbildung 3-34: Sankey-Diagramm des heißen Endes

3.4.6 Spezifischer Energieverbrauch

Auf Basis der in Kapitel 3.1 beschriebenen Massenströme kann der spezifische Energieverbrauch bestimmt werden. In **Tabelle 3-XXXV** sind die spezifischen Energieverbräuche der produzierenden Aggregate, bezogen auf die geschmolzene Masse an Rohstoffen ($175 t_{\text{Weißglas/Tag}}$ und $125 t_{\text{Braunglas/Tag}}$), angeführt. Braunglas benötigt rund 0,1 kWh/kg weniger Energie als Weißglas.

Tabelle 3-XXXV: Spezifischer Energieverbrauch

| | Weißglas [kWh/kg] | Braunglas [kWh/kg] |
|--------------------|-------------------|--------------------|
| Wanne | 2,039 | 1,832 |
| AW | 0,534 | 0,477 |
| Feeder | 0,617 | 0,674 |
| IS-Maschine | 0,659 | 0,737 |
| Transport | 0,170 | 0,167 |
| Kühlofen | 0,273 | 0,298 |
| Summe | 4,291 | 4,184 |

Zum Schmelzen verschiedener Glasarten für Behälterglas werden im Durchschnitt rund 1,3 kWh/kg benötigt [1]. Stölzle Oberglas GmbH benötigt für den Schmelzvorgang bei Wanne 2 rund 60% und bei Wanne 4 rund 40% mehr Energie als in der Literatur angegeben. Allerdings werden in dieser Arbeit die Glasschmelzwannen und die Regeneratoren separat betrachtet. Dadurch ergibt sich ein zusätzlicher Energieeintrag durch die vorgewärmte Verbrennungsluft. Wird die Bilanzgrenze über die Glasschmelzwanne inklusive Regenerator gelegt, benötigt Stölzle Oberglas GmbH für den Schmelzvorgang bei Weißglas 1,37 kWh/kg und bei Braunglas 1,25 kWh/kg. Die Abhängigkeit des spezifischen Verbrauchs der Glaswanne 2 von der gewählten Bilanzgrenze ist in **Abbildung 3-35** dargestellt.

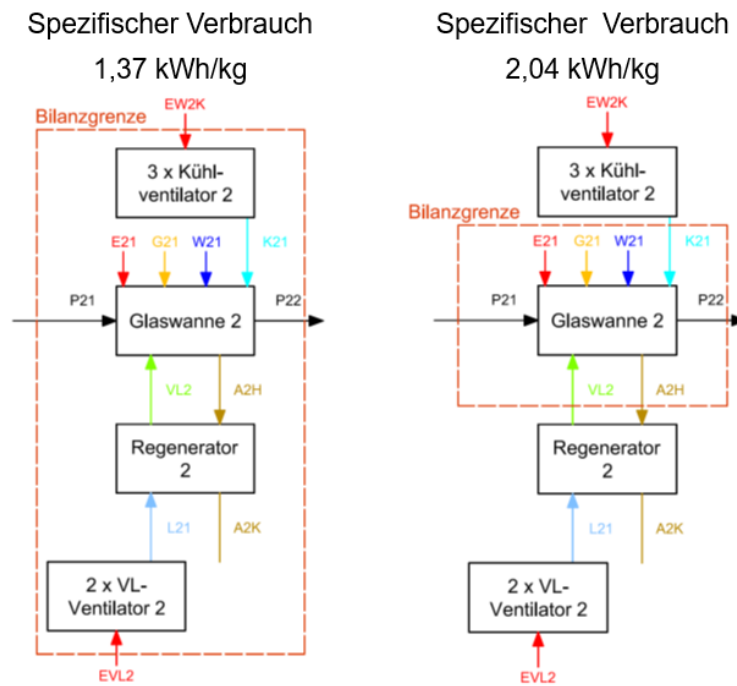


Abbildung 3-35: Spezifischer Verbrauch für den Schmelzvorgang der Glaswanne 2 in Abhängigkeit der Bilanzgrenze

4 Abwärmepotentialbestimmung

Aus Kapitel 3.4.5 geht hervor, dass erhebliche Abwärme am heißen Ende der Produktion vorliegt. Rund 17,6 GWh/M werden in die Produktionshalle abgegeben. Allerdings ist nur ein geringer Teil dessen für die Abwärmenutzung verwertbar. Grundsätzlich gibt es nur drei Aggregate, welche ein Abgas und damit ein mit angemessenem Aufwand nutzbares Abwärmepotential abgeben: Arbeitswanne, Feeder und Kühlöfen.

4.1 Arbeitswanne und Feeder

Wie in Kapitel 3.4.3.2 beschrieben, liegt der Energieinhalt des Abgases dieser Aggregate bei rund 2,1 GWh/M. Die entsprechenden Daten der Abgasströme sind in **Tabelle 4-I** nochmals aufgelistet. Zu erkennen ist, dass pro Weißglasfeeder etwa 118 MWh/M und pro Braunglasfeeder rund 146 MWh/M in die Produktionshalle abgegeben werden.

Tabelle 4-I: Abgaswerte der Arbeitswannen und Feeder

| | Weißglas | | Braunglas | |
|------------------|--------------|--------|--------------|--------|
| | Arbeitswanne | Feeder | Arbeitswanne | Feeder |
| m [t/M] | 1.127 | 1.883 | 702 | 1.867 |
| T [°C] | 910 | 1.013 | 910 | 1.013 |
| Q [MWh/M] | 375 | 710 | 242 | 729 |

Der Anteil an rückgewinnbarer Energie liegt bei 70 bis 80% [24]. Das bedeutet ein einfach zu nutzendes Abwärmepotential von bis zu 1,6 GWh/M. Zur Erfassung dieses Potentials stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung.

Eine Möglichkeit ist das Abgas den Regeneratoren der Glaswannen zuzuführen. Dazu müssten über den Arbeitswannen und Feeder Kanäle zur Abgasführung angebracht werden. Diese müssten mit hochtemperaturbeständigen Werkstoffen ausgeführt werden. Eine Problemstellung dabei ist, dass die Abgasöffnungen betriebsbedingt geöffnet bzw. geschlossen werden. Des Weiteren muss auf die statische Auslegung der bestehenden Konstruktion geachtet werden im Hinblick darauf, ob eine Mehrbelastung dieser Größenordnung zulässig ist. Außerdem ist zu beachten, dass an der Braunglaslinie reduzierende Bedingungen vorliegen, wodurch das Abgas unverbranntes Erdgas enthält. Daraus resultiert, dass das Gemisch ohne weitere Luftzufuhr einen gewissen Heizwert aufweist.

Als zweite Möglichkeit wäre eine Änderung der Verbrennungstechnik denkbar. Dafür würde sich, besonders an den Braunglaslinien wegen der vorgeschriebenen reduzierenden Bedingungen eine Rauchgasrezirkulation oder ein Regeneratorbrenner, wie in **Abbildung 4-1** abgebildet, anbieten und einen signifikanten Mehrwert bringen.

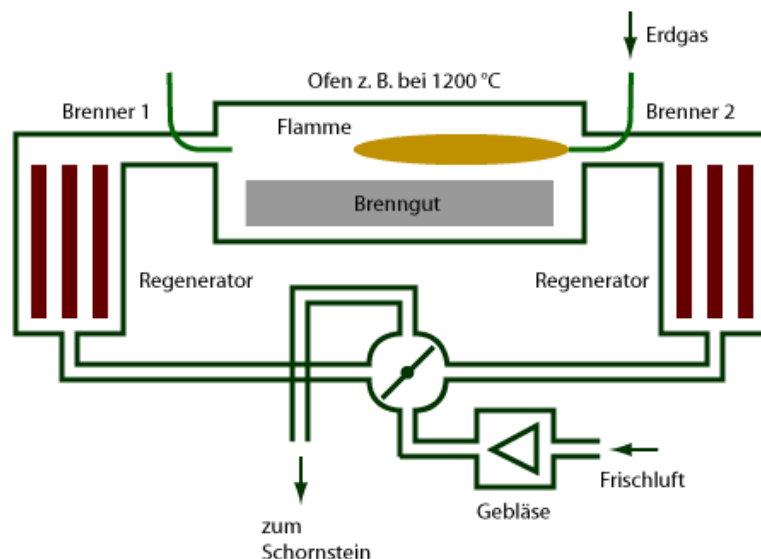


Abbildung 4-1: Prinzipschaubild eines Regeneratorbrenners [25]

Regenerative Brenner werden immer paarweise eingesetzt. Bei diesem Prinzip feuert ein Brenner in den Brennraum, während der zweite Brenner, welcher in der Regel gegenüberliegend angeordnet ist, die Ofenraumatmosphäre ansaugt. Nach dem Regeneratorprinzip wird das angesaugte Abgas über ein Speichermedium geleitet, welches

sich erwärmt. Nach festgelegten Zykluszeiten wird umgeschaltet und die kalt angesaugte Verbrennungsluft wird über das heiße Speichermedium vorgewärmt und anschließend dem Brenner zugeführt. [25]

Unabhängig von der Variante der Einbeziehung eines Regeneratorsystems bewirkt dies eine erhebliche Einsparung. Könnte das Rauchgas aus den Arbeitswannen und Feeder in einem Regenerator auf 300°C abgekühlt werden, würde man damit (unter der Berücksichtigung des Wirkungsgrades von 80%) rund 1,2 GWh/M mehr thermische Energie nutzbar machen. Damit ergibt sich eine Einsparung an Erdgas mit einem Energieinhalt von 1,2 GWh/M, da diese vom Abgas bezogen werden.

Bei Zufuhr des rund 300°C heißen Abgases zum bestehenden Abgasstrang der Glasschmelzwannen würde dem Wärmeübertrager für die Fernwärmenutzung mehr Energie zur Verfügung stehen. Ein positiver Synergieeffekt wäre dabei, dass durch die Mischung der Abgase eine Temperatursenkung vor der Frischluftquenche erfolgt, wodurch weniger Frischluft dem Abgas beigemischt werden muss. Vorausgesetzt der Elektrofilter kann eine derartige Zunahme des Massenstroms verarbeiten, kann der Wärmeinhalt des Abgases im Wärmeübertrager genutzt werden. Die Abkühlung des Abgases aus den Arbeitswannen und Feeder auf 103°C würde weitere 320 MWh/M an Fernwärmepotential eröffnen. Bei variabler Zyklendauer der Regeneratoren ist die auskoppelbare Energie ins Fernwärmenetz dementsprechend flexibel.

4.2 Kühltöfen

Aus Kapitel 3.3.5 geht hervor, dass die Kühltöfen ein Abgas mit einer Temperatur von 563°C und einem Energieinhalt von rund 660 MWh/M in die Produktionshalle abgeben. Diese Energie wird von sechs Weißglaskühltöfen und fünf Braunglaskühltöfen an die Produktionshalle abgegeben. Die entsprechenden Abgaswerte je Kühltöfen sind in **Tabelle 4-II** zusammengefasst.

Tabelle 4-II: Abgaswerte pro Kühllofen der Weißglas- und Braunglasproduktion

| | Weißglas Kühllofen | Braunglas Kühllofen |
|------------------|---------------------------|----------------------------|
| m [t/M] | 177.670 | 162.748 |
| T [°C] | 570 | 563 |
| Q [MWh/M] | 34 | 31 |

Das ergibt, wie bei der Berechnung des Abwärmepotentials der Arbeitswannen und Feeder hergeleitet, ein nutzbares Abwärmepotential von bis zu 530 MWh/M. Die Schwierigkeit dabei liegt in der schweren Erfassbarkeit des Abgases aus den Kühlöfen. Da der Einschieber, welcher die Flaschen vom Transportband in den Kühlöfen schiebt, einen großen Arbeitsradius aufweist, kann keine Absaugung installiert werden, ohne dabei große Mengen Falschluff mit anzusaugen.

Die Abwärme des Abgases aus den Dachöffnungen der Kühlöfen ist leicht nutzbar. Allerdings handelt es sich dabei nur um einen Bruchteil der Abwärme und sie ist daher zu vernachlässigen.

Aufzuzeigen ist an dieser Stelle, dass eine Überarbeitung der Betriebsweise der Kühlöfen am effizientesten wäre. Derzeit entweicht der größte Teil des Abgases am Eingang der Kühlöfen und nicht an den Abgasöffnungen am Dach. Um das Austreten des Abgases am Eingang zu verhindern, müsste der strömungstechnische Widerstand am Eingang erhöht werden oder eine Luftströmung in den Kühlöfen erzwungen werden. Letzteres könnte beispielsweise durch Verbrennungsluftzufuhr am Eingang in Richtung des Ausgangs geschehen oder durch eine Absaugung am Ende des Kühllofens. Dies würde nicht nur dazu führen, dass Abwärme an den Auslässen am Dach nutzbar gemacht wird, sondern auch, dass eine signifikante Energieeinsparung in der Betriebsweise der Kühlöfen auftreten würde. Diese Energieeinsparung ist darauf zurückzuführen, dass der hohe Energieinhalt des Abgases am Eingang des Kühllofens nun in Richtung der kälteren Zonen geleitet wird. Daher wird der Brennstoffeinsatz in den kälteren Zonen verringert.

5 Einspar- und Optimierungspotentiale

Im Rahmen dieser Arbeit sind einige Einspar- und Optimierungspotentiale aufgezeigt worden, welche nun erläutert werden.

5.1 Glasschmelzwanne 2

Wie in Kapitel 3.3.3 gezeigt, wird die Bereitstellung der Luftkühlung der Wanne 2 über zwei Ventilatoren bewerkstelligt. Der Ventilator 3 der Weißglaswannenkühlung ist in einer Ecke des Raumes platziert und der Ansaugstutzen in Richtung der Wand ausgerichtet. Dies bewirkt eine strömungstechnisch ungünstigere Position, wodurch die Ansaugtemperatur deutlich höher ist als jene von Ventilator 1 und 2, welche inmitten des Raumes platziert sind. Der Betrieb mit Ventilator 1 und 2 würde aufgrund von kälteren Ansaugtemperaturen eine Verbesserung der Kühlmenge um ca. 10% bewirken, unter der Voraussetzung gleichbleibender Temperatur der Luft nach dem Kühlvorgang.

5.2 Elektrodenkühlung

Wie in Kapitel 3.3.3 erhoben, wird das Kühlwasser von rund 19,5 auf 43°C erwärmt. Die dem Wasser zugeführte Energie von rund 140 MWh/M wird nicht weiterverwendet. Allerdings könnte diese über einen Wasser-Wasser-Wärmeübertrager zur Nutzwasservorwärmung genutzt werden. Ein positiver Synergieeffekt dabei wäre die Reduktion der Mischtemperatur im Sammelbehälter.

5.3 Regeneratoren

Zwischen den beiden Kammern des Regenerators wird mit einem vorgeschriebenen Zyklus von 18 bis 19 min gewechselt. Wie in Kapitel 3.2.1.1 hergeleitet gibt es ausschließlich Aufzeichnungen über die Temperaturen des Wärmespeichermaterials im Regenerator. Allerdings ist die Temperatur des Rauchgases bzw. der Verbrennungsluft ausschlaggebend für den Prozess. Die Installation von Thermoelementen im Regenerator, welche die Temperatur des Gases messen, würde wertvolle Informationen über die optimale Betriebsweise des Regenerators liefern.

5.4 IS-Maschinen

Wie in Kapitel 3.4.3.3 beschrieben gibt es für die 4 bar Druckluftversorgung nur für die Weißglaslinien Verbrauchszähler. Es konnten 6% des 4 bar Druckluftverbrauchs nicht den IS-Maschinen zugeschrieben werden. Dabei handelt es sich um eine Größenordnung von rund 100 MWh/M. Bei diesem Restbetrag könnte es sich um Messabweichungen oder Leckagen handeln. Um diese Angaben zu referenzieren sollten auch an den Braunglaslinien geeignete Verbrauchsmessungen installiert werden.

5.5 Transportband

In Kapitel 3.4.3.4 wird die Energiebilanz des Transportbandes beschrieben. Die Analyse dieser zeigt, dass auf dem rund 10 m langen Transportweg die Glasbehälter rund 25 MWh/M an Wärme abgeben. Würde man den Kühlöfen 1 m näher an der IS-Maschine positionieren, würden die Glasbehälter etwa 2,5 MWh/M weniger Energie an die Umgebung abgeben und diese Energie in den Kühlöfen miteinbringen. Demnach würde jeder eingesparte Meter an Förderstrecke 2,5 MWh/M einsparen. Da die gleiche Wegstrecke, welche vor dem Kühlöfen gekürzt wurde hinter dem Kühlöfen addiert wird, ergibt dies keine Änderung des elektrischen Energiebedarfs der Förderbänder.

Allerdings ist bei einer Verkürzung der Wegstrecke zu beachten, dass Glasflaschen mit hohen Temperaturen bei gegenseitiger Berührung zum Zusammenkleben neigen. Dies kann vermieden werden indem die Aggregatanordnung so gestaltet wird, dass es zu keiner Richtungsänderung des Transportbandes kommt oder unvermeidbare Richtungsänderungen in Kurven stattfinden.

5.6 Kühlöfen

Wie in **Tabelle 3-XXXIV** gelistet, schwankt der Gasverbrauch der Kühlöfen zwischen 8.300 Nm³/M (Linie 43) und 15.400 Nm³/M (Linie 40 und 24). Dieser Unterschied ist nicht ausschließlich auf den unterschiedlichen Massenstrom zurückzuführen, da die Massenströme von L43 und L40 annähernd dem Durchschnitt entsprechen. Linie 24 hingegen hat den geringsten Massendurchsatz aller Produktionslinien, wodurch dementsprechend weniger Energie von den Beh ltergl sern im Ofen gebunden wird.

Eine Reduktion des Verbrauchs der beiden Kühlöfen um 19% auf den Mittelwert von 12.500 Nm³/M würde eine monatliche Reduktion des Erdgasverbrauchs aller Kühlöfen um 4,2% bringen. Aus diesem Grund ist hier eine genauere Betrachtung der beiden Öfen auf deren Betriebsweise zu empfehlen.

Des Weiteren ist in Kapitel 3.4.2.3 aufgezeigt worden, dass Kühlöfen 23 und 41 einen signifikanten Mehrverbrauch gegenüber dem Jahr 2018 aufweisen. Könnte dieser Mehrverbrauch wieder komplett gesenkt werden, würde dies eine weitere Reduktion des Gesamtverbrauchs um 3,2% bedeuten.

6 Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde der energetische Status quo des heißen Endes des Produktionsprozesses der Glashütte von Stölzle Oberglas GmbH in Köflach bestimmt. Die Herangehensweise wurde an die europäische Norm EN 16247 für qualitative Energieaudits angelehnt. In der von Dipl.-Ing. Gregor Berger erstellten Masterarbeit mit den Daten aus dem Jahr 2018 wurde bereits die Ausgangslage ausführlich erfasst, analysiert und erläutert. Der Betrachtungszeitraum der hier vorliegenden Energiebilanz erstreckt sich über sechs Monate vom 1.4.2019 bis zum 30.9.2019. Eine weitere elementare Bezugsgröße stellt die Umgebungstemperatur dar. Diese wurde in dieser Arbeit mit 15°C und trockener Luft festgelegt. Der Massenstrom von Glas während der gewählten Zeitspanne beträgt im Schnitt 175 t_{Weißglas}/Tag und 125 t_{Braunglas}/Tag.

Zunächst musste die Datenlage des Standortes validiert werden und fehlende Daten für eine energetische Bilanzierung ermittelt werden. Entsprechend der Datenlage des Unternehmens wurde eine Liste relevanter Daten und deren Verfügbarkeit bzw. Erfassungsmöglichkeit angelegt. Basierend auf die ermittelten Ergebnisse wurden mehrere Messkampagnen vorbereitet, geplant und durchgeführt.

Auf Basis dieser Daten wurde anschließend eine Energiebilanz bezogen auf einen durchschnittlichen Monat für den Bilanzraum bestimmt. Das heiße Ende benötigt rund 20,4 GWh/M an Energie, wobei rund 24% davon in elektrischer Form und 76% als Erdgas bezogen werden. Mit 1,41 Mio. Nm³ Erdgas pro Monat und 90,9% ist der Verbrauch für das Aufschmelzen und Verteilen der Glasschmelze bis zur IS-Maschine überwiegend. Der elektrische Verbrauch der drei Hauptverbraucher (Druckluftbereitstellung mit 40,0%, Glasschmelzwannen mit 35,0% und IS-Maschine mit 19,4%) beträgt 94,4% des elektrischen Gesamtverbrauchs. Die einzelnen Produktionsaggregate der Weiß- und

Braunglasbehälterherstellung wurden der Reihe nach behandelt. Dabei wurden Eingangsströme, Ausgangsströme, Verluste sowie nicht erfassbare Verluste bilanziert. Das Ergebnis der detaillierten Betrachtung wurde in einem Sankey-Diagramm graphisch dargestellt.

Da sich die Bilanzgrenze seit dem Jahr 2018 aufgrund des Zuwachses einer Weißglasproduktionslinie (Linie 20) geändert haben, wurden deren Auswirkungen genauer begutachtet. Es zeigte sich ein monatlicher Mehrverbrauch von 21% an elektrischer Energie und ein Zuwachs von 0,6% an Erdgasverbrauch bei einer Steigerung von 5% an geschmolzenen Rohstoffen.

Aus der Energiebilanz geht hervor, dass erhebliche Abwärme am heißen Ende der Produktion vorliegt. Rund 17,6 GWh/M werden in die Produktionshalle abgegeben. Allerdings ist nur ein geringer Teil dessen für die Abwärmenutzung technisch erfassbar. Grundsätzlich gibt es nur drei Aggregate, an denen Abgas und damit ein einfach nutzbares Abwärmepotential auftritt: Arbeitswanne, Feeder und Kühlöfen. Dabei fallen bei den Arbeitswannen und Feeder ein erfassbares Abwärmepotential von 1,6 GWh/M an. Bei den Kühlöfen tritt ein geringeres Abwärmepotential von 0,53 GWh/M auf.

Es wurden in dieser Arbeit Möglichkeiten zur Erschließung der Potentiale beschrieben. Schlussendlich wurden insgesamt sechs Einspar- und Optimierungspotentiale aufgezeigt, die während der Erarbeitung dieser Arbeit ermittelt wurden.

Literaturverzeichnis

- [1] Schaeffer, H. A. und R. Langfeld, Werkstoff Glas, Springer Vieweg, Berlin [2014].
- [2] Stoelzle Glass Group, European manufacturer of high-end primary packaging glass, Online verfügbar unter <https://www.stoelzle.com/>, abgerufen am 26. März 2020.
- [3] Gregor Berger, Energetische Betrachtung einer Glashütte zur Behälterglasherstellung, Montanuniversität, Leoben.
- [4] Spreng, D. T. und G. Doka, Graue Energie, vdf, Zürich [1995].
- [5] Horst Scholze, Glas - Natur, Struktur und Eigenschaften, Springer Berlin Heidelberg, Berlin [1988].
- [6] D.E. Sharp und B. Ginther, Effect of Composition and Temperature on the Specific Heat of Glass [1951].
- [7] Allibert, M. (Ed.) 2008, Slag atlas. 2. ed., Repr. without change, Düsseldorf, Verl. Stahleisen.
- [8] Gabriele Brandl, Konstantin Kulterer, Petra Lackner, Energieaudit nach EN 162471 [2014], 2.
- [9] Atkins, P. W., C. A. Trapp, J. de Paula, M. P. Cady, C. Giunta und A. Höpfner, Physikalische Chemie, VCH, Weinheim [1987].
- [10] Harald Raupenstrauch (Ed.) 2013, Vorlesungsunterlagen Wärmeübertragung. 3rd ed., Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Montanuniversität, Leoben.
- [11] Springer-Verlag GmbH, VDI-Wärmeatlas, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg [2013].

- [12] optris infrared thermometers GmbH, Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung [2011].
- [13] Hering, E. und G. Schönfelder, Sensoren in Wissenschaft und Technik, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden [2012].
- [14] Jürgen Karl, Dezentrale Energiesysteme, Oldenbourg, München [2012].
- [15] Harald Raupenstrauch 2017, Vorlesungsunterlagen Brennstoff- und Verbrennungstechnik, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Montanuniversität, Leoben.
- [16] Alexandra Holzer, Samuel Kainz, Harald Raupenstrauch und Christoph Spijker 2018, Vorlesungsskriptum Technische Thermodynamik. 1st ed., Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Montanuniversität, Leoben.
- [17] J. A. Szymczyk (Ed.) 2008, Vorlesungsskript Strömungstechnik. With assistance of Paul. Chr. Zielke, FH Stralsund, Stralsund.
- [18] AhlbornAhlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Bedienungsanleitung: Datenlogger Almemo 2690 [2009], V3.0.
- [19] InfraTec GmbH, VarioCAM hr head inkl. Softwarebeschreibung IRBIS remote November 2015.
- [20] Testo 416, kompaktes Flügelrad-Anemometer (Messgeräte) - Online-Shop für Mess- und Prüfgeräte, Online verfügbar unter <https://www.kometec.de/messgeraete/testo-416-kompaktes-fluegelrad-anemometer.html>, abgerufen am 20. Dezember 2019.
- [21] Hartmut Spliethoff, Lehrstuhl für Energiesysteme: Absaugpyrometer, Online verfügbar unter <http://www.es.mw.tum.de/index.php?id=239>, abgerufen am 26. März 2020.
- [22] Torsten Grodten, Kühlbares Absaugpyrometer, Online verfügbar unter https://www.paulgothe.com/epages/62307369.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/62307369/Products/50.1, abgerufen am 27. März 2020.
- [23] Daniel Gebert, S. H., Wie sich der Wirkungsgrad von Ventilatoren erhöhen lässt, Online verfügbar unter <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/wie-sich-der-wirkungsgrad-von-ventilatoren-erhoehen-laesst-a-866913/>, abgerufen am 19. März 2020.
- [24] Amir Ibrahimagic, Wärmerückgewinnung 2017.
- [25] Paschotta, R., Regenerativer Brenner, Online verfügbar unter https://www.energielexikon.info/regenerativer_brenner.html, abgerufen am 29. März 2020.

Anhang

Anhang A: Datenerhebungsbogen

Datenerhebungsbogen

Im Folgenden werden die Energieströme der entsprechenden Aggregate des heißen Endes, mit Ausnahme des Abgaswegs der Glaswannen, aufgeschlüsselt. Deren vorhandene Quantifizierung wird mittels ✓/✗ beschrieben. Eine Beschriftung durch ein ✓ gibt keine Auskunft auf die Qualität der bestehenden Daten.

Wanne 2 + Regenerator

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓/✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-------------------------------------|------|--------|---------------------------|--------------------|-----|------------------------------------|--|
| Rohstoffe | P21 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| Scherben | P21 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| Strom der EZH | E21 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Erdgas | G21 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| Kühlung Elektroden (Bezeichnungser) | W21 | In | Massenstrom | kg/h | ✗ | | Auslitern |
| | | | Temperatur Vorlauf | °C | ✓ | Messung vorhanden | |
| | | | Temperatur Rücklauf | °C | ✓ | Messung vorhanden | |
| | | | Energieverbr. der Pumpe | kWh | ✗ | | Nennwerten |
| Wannenkühlung (Luft) | K21 | In | Leistung | kW / % | ✗ | | Nennwerten |
| | | | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Anemometer |
| | EW2H | In | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Thermoclement |
| | | | Energieverbr. der Ventile | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| Verbrennungsluft | VL2 | In | Temperatur | °C | ✗ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| | | | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | L21 | In | Temperatur | °C | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| | | | Energieverbr. der Ventile | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | EVL2 | In | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | | | | | |
| Glasschmelze | P22 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| Abgas | A2H | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| | A2K | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |

Wanne 4 + Regenerator

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-------------------------------------|------|--------|--------------------------|--------------------|------------------------|------------------------------------|--|
| Rohstoffe | P41 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| Scherben | P41 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| Strom der EZH | E41 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Erdgas | G41 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| Kühlung Elektroden (Bezeichnungser) | W41 | In | Massenstrom | kg/h | ✗ | | Auslitern |
| | | | Temperatur Vorlauf | °C | ✓ | Messung vorhanden | |
| | | | Temperatur Rücklauf | °C | ✓ | Messung vorhanden | |
| | | | Energieverbr. der Pumpe | kWh | ✓ | | Neendaten |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | | Neendaten |
| Wannenkühlung (Luft) | K41 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | EW41 | In | Energieverbr. der Ventil | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Leistung | | | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | | |
| Verbrennungsluft | VL4 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| | L41 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| | EVL4 | In | Energieverbr. der Ventil | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Leistung | | | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | | |
| Glasschmelze | P42 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| Abgas | A4H | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |
| | A4K | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) | |

Arbeitswanne 2

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|---------------------|------|--------|--------------|--------------------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P22 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G22 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| | | | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| Luft | L22 | In | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| | | | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| Abgas | A22 | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze zu L20 | P201 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Glasschmelze zu L21 | P211 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Glasschmelze zu L22 | P221 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Glasschmelze zu L23 | P231 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Glasschmelze zu L24 | P241 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Glasschmelze zu L25 | P251 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

Arbeitswanne 4

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|---------------------|------|--------|--------------|--------------------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P42 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G42 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| | | | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| Luft | L42 | In | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| | | | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| Abgas | A42 | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze zu L40 | P401 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Glasschmelze zu L41 | P411 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Glasschmelze zu L42 | P421 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Glasschmelze zu L43 | P431 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Glasschmelze zu L44 | P441 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

Feeder 20

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------------|------|--------|--------------|---------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P201 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G201 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| Luft | L201 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A201 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze | P202 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

Feeder 21

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------------|------|--------|--------------|---------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P211 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G211 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| Luft | L211 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A211 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze | P212 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

Feeder 22

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------------|------|--------|--------------|---------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P221 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G221 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| Luft | L221 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A221 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze | P222 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

Feeder 23

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------------|------|--------|--------------|---------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P231 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G231 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| Luft | L231 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A231 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze | P232 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

Feeder 24

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------------|------|--------|--------------|---------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P241 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G241 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| Luft | L241 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A241 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze | P242 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

Feeder 25

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------------|------|--------|--------------|---------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P251 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G251 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gazverbrauch_Monat_2013 (Volker) | |
| | | | | | | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| Luft | L251 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A251 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze | P252 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

Feeder 40

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------------|------|--------|--------------|---------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P401 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G401 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gazverbrauch_Monat_2013 (Volker) | |
| | | | | | | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| Luft | L401 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A401 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze | P402 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

Feeder 41

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------------|------|--------|--------------|---------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P411 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G411 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gazverbrauch_Monat_2013 (Volker) | |
| | | | | | | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| Luft | L411 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A411 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze | P412 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

Feeder 42

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------------|------|--------|--------------|---------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P421 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G421 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gazverbrauch_Monat_2013 (Volker) | |
| | | | | | | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| Luft | L421 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A421 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze | P422 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

Feeder 43

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------------|------|--------|--------------|---------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P431 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G431 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gazverbrauch_Monat_2013 (Volker) | |
| | | | | | | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| Luft | L431 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A431 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze | P432 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

Feeder 44

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------------|------|--------|--------------|---------|-------|------------------------------------|--|
| Glasschmelze | P441 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Erdgas | G441 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2013 (Volker) | |
| Luft | L441 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A441 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen auf Basis des Erdgasverbrauchs |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer |
| Glasschmelze | P442 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |

IS20

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|----------------------|------|--------|----------------------|---------|-------|------------------------------------|-------------------------------|
| Glasschmelze | P202 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Formenkühlung (Luft) | K201 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Steuerung | E201 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft 4 bar | D201 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messung Stözle (Mayrold) |
| Druckluft 8 bar | D202 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözle (Skrbinjek) |
| Druckluft Vakuum | D203 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözle (Skrbinjek) |
| Vertiflow (Luft) | K202 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Glas | P203 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Thermoelement und IR-Kamera |

IS21

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|----------------------|------|--------|----------------------|---------|-------|------------------------------------|-------------------------------|
| Glasschmelze | P212 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Formenkühlung (Luft) | K211 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Steuerung | E211 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft 4 bar | D211 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messung Stözle (Mayrold) |
| Druckluft 8 bar | D212 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözle (Skrbinjek) |
| Druckluft Vakuum | D213 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözle (Skrbinjek) |
| Vertiflow (Luft) | K212 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Glas | P213 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Thermoelement und IR-Kamera |

IS22

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|----------------------|------|--------|------------------------|---------|-------|------------------------------------|--------------------------------|
| Glasschmelze | P222 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Formenkühlung (Luft) | K221 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr. des Vent | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Steuerung | E221 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft 4 bar | D221 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messung Stözele (Mayrold) |
| Druckluft 8 bar | D222 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözele (Skrbinjek) |
| Druckluft Vakuum | D223 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözele (Skrbinjek) |
| Vertiflow (Luft) | K222 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr. des Vent | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Glas | P223 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Thermoelement und IR-Kamera |

IS23

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|----------------------|------|--------|------------------------|---------|-------|------------------------------------|--------------------------------|
| Glasschmelze | P232 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Formenkühlung (Luft) | K231 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr. des Vent | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Steuerung | E231 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft 4 bar | D231 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messung Stözele (Mayrold) |
| Druckluft 8 bar | D232 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözele (Skrbinjek) |
| Druckluft Vakuum | D233 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözele (Skrbinjek) |
| Glas | P233 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Thermoelement und IR-Kamera |

IS24

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|----------------------|------|--------|------------------------|---------|-------|------------------------------------|--------------------------------|
| Glasschmelze | P242 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Formenkühlung (Luft) | K241 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr. des Vent | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Steuerung | E241 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft 4 bar | D241 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messung Stözele (Mayrold) |
| Druckluft 8 bar | D242 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözele (Skrbinjek) |
| Druckluft Vakuum | D243 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözele (Skrbinjek) |
| Glas | P243 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Thermoelement und IR-Kamera |

IS25

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|----------------------|------|--------|------------------------|---------|-------|------------------------------------|--------------------------------|
| Glasschmelze | P252 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Formenkühlung (Luft) | K251 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr. des Vent | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Steuerung | E251 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft 4 bar | D251 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messung Stözlze (Mayrold) |
| Druckluft 8 bar | D252 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözlze (Skrbinjek) |
| Druckluft Vskuum | D253 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözlze (Skrbinjek) |
| Glas | P253 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Thermoelement und IR-Kamera |

IS40

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|----------------------|------|--------|------------------------|---------|-------|------------------------------------|--------------------------------|
| Glasschmelze | P402 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Formenkühlung (Luft) | K401 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr. des Vent | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Steuerung | E401 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft 4 bar | D401 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messung Stözlze (Mayrold) |
| Druckluft 8 bar | D402 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözlze (Skrbinjek) |
| Druckluft Vskuum | D403 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözlze (Skrbinjek) |
| Glas | P403 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Thermoelement und IR-Kamera |

IS41

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|----------------------|------|--------|------------------------|---------|-------|------------------------------------|--------------------------------|
| Glasschmelze | P412 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Formenkühlung (Luft) | K411 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr. des Vent | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Steuerung | E411 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft 4 bar | D411 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messung Stözlze (Mayrold) |
| Druckluft 8 bar | D412 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözlze (Skrbinjek) |
| Druckluft Vskuum | D413 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözlze (Skrbinjek) |
| Vertiflow (Luft) | K412 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr. des Vent | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Glas | P413 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Thermoelement und IR-Kamera |

IS42

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|----------------------|------|--------|------------------------|---------|-------|------------------------------------|--------------------------------|
| Glasschmelze | P422 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Formenkühlung (Luft) | K421 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr. des Vent | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Steuerung | E421 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Druckluft 4 bar | D421 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messung Stözlze (Mayroid) |
| Druckluft 8 bar | D422 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözlze (Skrbinjek) |
| Druckluft Vakuum | D423 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözlze (Skrbinjek) |
| Glas | P423 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Thermoelement und IR-Kamera |

IS43

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|----------------------|------|--------|------------------------|---------|-------|------------------------------------|--------------------------------|
| Glasschmelze | P432 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Formenkühlung (Luft) | K431 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr. des Vent | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Steuerung | E431 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Druckluft 4 bar | D431 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messung Stözlze (Mayroid) |
| Druckluft 8 bar | D432 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözlze (Skrbinjek) |
| Druckluft Vakuum | D433 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözlze (Skrbinjek) |
| Glas | P433 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Thermoelement und IR-Kamera |

IS44

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|----------------------|------|--------|------------------------|---------|-------|------------------------------------|--------------------------------|
| Glasschmelze | P442 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Umbautemp (Volker) | |
| Formenkühlung (Luft) | K441 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr. des Vent | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Steuerung | E441 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Druckluft 4 bar | D441 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messung Stözlze (Mayroid) |
| Druckluft 8 bar | D442 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözlze (Skrbinjek) |
| Druckluft Vakuum | D443 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Abschätzen Stözlze (Skrbinjek) |
| Vertiflow (Luft) | K442 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Anemometer |
| | | | Temperatur Ein | °C | ✗ | | Thermoelement |
| | | | Temperatur Aus | °C | ✗ | | Berechnen |
| | | | Energieverbr. des Vent | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Glas | P443 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Thermoelement und IR-Kamera |

Transport 20

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-----------|------|--------|----------------------|---------|-------|------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P203 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E202 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | | |
| Druckluft | D204 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messen Stözlze (Mayrold) |
| Ausschuss | AS20 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P204 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Transport 21

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-----------|------|--------|----------------------|---------|-------|------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P213 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E212 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | | |
| Druckluft | D214 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messen Stözlze (Mayrold) |
| Ausschuss | AS21 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P214 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Transport 22

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-----------|------|--------|----------------------|---------|-------|------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P223 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E222 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | | |
| Druckluft | D224 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messen Stözlze (Mayrold) |
| Ausschuss | AS22 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P224 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Transport 23

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-----------|------|--------|----------------------|---------|-------|------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P233 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E232 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | | |
| Druckluft | D234 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messen Stözlze (Mayrold) |
| Ausschuss | AS23 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P234 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Transport 24

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-----------|------|--------|----------------------|---------|-------|------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P243 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E242 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | | |
| Druckluft | D244 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messen Stözlze (Mayrold) |
| Ausschuss | AS24 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P244 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Transport 25

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-----------|------|--------|----------------------|---------|-------|------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P253 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E252 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft | D254 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messen Stölzle (Mayroid) |
| Ausschuss | AS25 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P254 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Transport 40

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-----------|------|--------|----------------------|---------|-------|------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P403 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E402 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft | D404 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messen Stölzle (Mayroid) |
| Ausschuss | AS40 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P404 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Transport 41

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-----------|------|--------|----------------------|---------|-------|------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P413 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E412 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft | D414 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messen Stölzle (Mayroid) |
| Ausschuss | AS41 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P414 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Transport 42

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-----------|------|--------|----------------------|---------|-------|------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P423 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E422 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft | D424 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messen Stölzle (Mayroid) |
| Ausschuss | AS42 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P424 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Transport 43

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-----------|------|--------|----------------------|---------|-------|------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P433 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E432 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft | D434 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messen Stölzle (Mayroid) |
| Ausschuss | AS43 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P434 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Transport 44

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|-----------|------|--------|----------------------|---------|-------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P443 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E442 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Druckluft | D444 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✗ | | Messen Stöße (Mayroid) |
| Ausschuss | AS44 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P444 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Kühlofen 20

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------|------|--------|----------------------|---------|-------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Glas | P204 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E203 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Erdgas | G203 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2013 (Volker) | |
| Luft | L203 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A203 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer/Thermoelement |
| Glas | P205 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Kühlofen 21

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------|------|--------|----------------------|---------|-------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Glas | P214 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E213 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Erdgas | G213 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2013 (Volker) | |
| Luft | L213 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A213 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer/Thermoelement |
| Glas | P215 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Kühlofen 22

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------|------|--------|----------------------|---------|-------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Glas | P224 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E223 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Erdgas | G223 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2013 (Volker) | |
| Luft | L223 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A223 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer/Thermoelement |
| Glas | P225 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Kühlofen 23

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------|------|--------|----------------------|---------|-------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Glas | P234 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E233 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2013 (Herbert) | |
| Erdgas | G233 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2013 (Volker) | |
| Luft | L233 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A233 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer/Thermoelement |
| Glas | P235 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Kühlofen 24

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------|------|--------|----------------------|---------|-------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P244 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E243 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | | |
| Erdgas | G243 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| Luft | L243 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | | |
| Abgas | A243 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P245 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Kühlofen 25

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------|------|--------|----------------------|---------|-------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P254 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E253 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | | |
| Erdgas | G253 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| Luft | L253 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | | |
| Abgas | A253 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P255 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Kühlofen 40

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------|------|--------|----------------------|---------|-------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P404 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E403 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | | |
| Erdgas | G403 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| Luft | L403 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | | |
| Abgas | A403 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P405 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Kühlofen 41

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------|------|--------|----------------------|---------|-------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Glas | P414 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E413 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | | |
| Erdgas | G413 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| Luft | L413 | In | Volumenstrom | Nm³/h | ✗ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | | |
| Abgas | A413 | Out | Volumenstrom | Nm³/h | ✓ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Glas | P415 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Kühlofen 42

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------|------|--------|----------------------|--------------------|-------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Glas | P424 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E423 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Erdgas | G423 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| Luft | L423 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A423 | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer/Thermoelement |
| Glas | P425 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Kühlofen 43

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------|------|--------|----------------------|--------------------|-------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Glas | P434 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E433 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Erdgas | G433 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| Luft | L433 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A433 | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer/Thermoelement |
| Glas | P435 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |

Kühlofen 44

| Strom | Bez. | In/Out | Bezeichnung | Einheit | ✓ / ✗ | Quelle der Daten | Erfassungsmethode |
|--------|------|--------|----------------------|--------------------|-------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Glas | P444 | In | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |
| Strom | E443 | In | Energieverbr./Stunde | kWh | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| | | | Leistung | kW / % | ✓ | Energie 2019 (Herbert) | |
| Erdgas | G443 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ | Gasverbrauch_Monat_2019 (Volker) | |
| Luft | L443 | In | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✗ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✓ | Bezugsgröße | |
| Abgas | A443 | Out | Volumenstrom | Nm ³ /h | ✓ | | Berechnen |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | Absaugpyrometer/Thermoelement |
| Glas | P445 | Out | Massenstrom | kg/h | ✓ | Daten 'Wanne 2/4 (Volker) und iAfis | Thermoelement und IR-Kamera |
| | | | Temperatur | °C | ✗ | | |