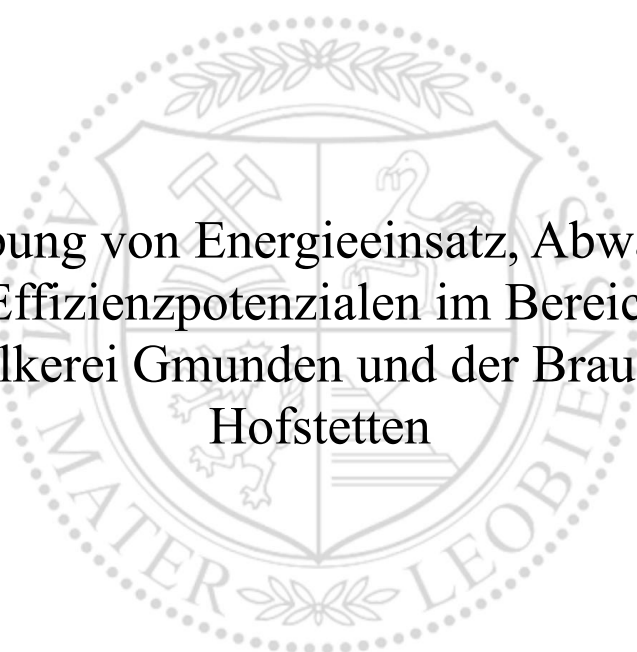




Lehrstuhl für Energieverbundtechnik

Masterarbeit



Erhebung von Energieeinsatz, Abwärme-
und Effizienzpotenzialen im Bereich der
Molkerei Gmunden und der Brauerei
Hofstetten

Laurin Hornsteiner, BSc

Oktober 2023



MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN
www.unileoben.ac.at

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 23.10.2023

Unterschrift Verfasser/in
Laurin Hornsteiner

KURZFASSUNG

Die mit dem Jahr 2040 angestrebte Klimaneutralität Österreichs stellt die Industrie vor große Herausforderungen. Energieversorgungssicherheit, Investitionen in Erneuerbare Energien und Möglichkeiten für Effizienzsteigerungen in Produktionsprozessen sind nur einige wenige Themen, die aktuell allgegenwärtig scheinen.

Im Zuge dieser wissenschaftlichen Arbeit wird diesem Umstand Rechnung getragen, indem sich mit drei in diesem Kontext relevanter Themenfelder befasst wird.

Das erste Themenfeld betrifft die Rauchgaskondensation. Sie stellt eine Möglichkeit zur Effizienzsteigerung dar, in dem das oft ungenutzte Potenzial der im Rauchgas enthaltenen Kondensationsenthalpie des mitgeführten Wasserdampfs ausgeschöpft wird. Dazu wurde ein EXCEL-Programm entwickelt, welches unter Abhängigkeit des verwendeten Verbrennungsluftverhältnisses, der Abgastemperatur, der vorherrschenden Luftfeuchte und des Luftdrucks den Grad der Kondensation des Wasserdampfs berechnet.

Das zweite Themenfeld umfasst die angedachte Errichtung einer Photovoltaik-Anlage auf den Dachflächen der oberösterreichischen Brauerei Hofstetten. Dazu wurden zunächst die verfügbaren nach Süden, Osten und Westen ausgerichteten Dachflächen über die in Google Maps verfügbare Satellitenansicht ermittelt. Daraus konnte die potenziell installierbare Anlagenleistung abgeleitet werden. Unter Verwendung des frei zugänglichen Photovoltaik-Berechnungstools PV-GIS (Photovoltaic Geographical Information System) wurde schließlich der zu erwartende Photovoltaik-Jahresertrag berechnet. Außerdem konnten die in stündlicher Auflösung generierten Daten für weiterführende Untersuchungen der tageszeitlich und saisonal variierenden Photovoltaik-Leistung verwendet werden.

Im dritten und letzten Themenfeld erfolgte die Bestimmung des Abwärmepotenzials der energieintensivsten Gmundner Unternehmen. Dazu wurden vorab mittels Literaturrecherche gängige Methoden zur Berechnung erhoben und angewandt. Als vielversprechendster Ansatz hat sich schlussendlich ein Top-Down-Ansatz hervorgetan. Dieser ermittelt unter Verwendung branchenspezifischer Kennzahlen/Benchmarks zunächst den Gesamtenergiebedarf der mittels ÖNACE-CODE exakt zugeordneten Unternehmen. Unter Anwendung geeigneter Abwärmefaktoren konnte daraus ein theoretisches Abwärmepotenzial abgeleitet werden.

ABSTARCT

The goal of Austria is to become climate-neutral by 2040, which poses significant challenges for the industry. Ensuring energy supply security, investing in renewable energy, and finding ways to increase efficiency in production processes are just a few of the many issues that are currently prevalent.

This scientific work addresses this situation and focuses on three related topics.

The first topic concerns flue gas condensation, which represents an opportunity to increase efficiency by utilizing the often unused potential of the condensation enthalpy of the carried water vapor in the flue gas. An EXCEL program was developed to calculate the degree of condensation of water vapor based on the combustion air ratio used, exhaust gas temperature, prevailing humidity, and air pressure.

The second topic involves the proposed installation of a photovoltaic system on the roof surfaces of the Hofstetten brewery in Upper Austria. The available roof surfaces facing south, east, and west were first determined using the satellite view available in Google Maps. This made it possible to derive the potentially installable system capacity. Using the freely accessible photovoltaic calculation tool PV-GIS (Photovoltaic Geographical Information System), the expected annual photovoltaic yield could be calculated. In addition, the data generated in hourly resolution could be used for further investigations of the time-of-day and seasonal variation of photovoltaic output.

The third and final topic determined the waste heat potential of the most energy-intensive companies in Gmunden. Common methods for calculating this were first collected and applied through literature research. Ultimately, a top-down approach emerged as the most promising approach. This first determines the total energy demand of the companies assigned exactly by ÖNACE-CODE using industry-specific key figures/benchmarks. Using suitable waste heat factors, a theoretical waste heat potential could be derived from this.

VORWORT

An dieser Stelle möchte ich all jenen, die zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben, meinen herzlichen Dank aussprechen.

Vielen Dank an den Lehrstuhl für Energieverbundtechnik der Montanuniversität Leoben, welcher mir die Möglichkeit gab, diese Arbeit zu verfassen. In besonderer Weise möchte ich mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr. mont. Andreas Hammer für die fachliche Expertise, die stets raschen Rückmeldungen, die hilfsbereite Art – die hervorragende Betreuung bedanken.

Ein großer Dank gebührt meiner Familie, die mich immer in allen Belangen unterstützt, motiviert und diese Ausbildung ermöglicht hat. Ohne sie stünde ich heute nicht an dieser Stelle.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhalt

1	EINLEITUNG	1
2	AUFGABENSTELLUNG	2
2.1	Vorgehensweise	2
3	Theoretischer Hintergrund – Stand der Technik.....	4
3.1	Brauereiprozess.....	4
3.1.1	Malzherstellung.....	5
3.1.2	Maischen	6
3.1.3	Läutern	7
3.1.4	Würzekochen	7
3.1.5	Heißtrubabscheidung	8
3.1.6	Würzekühlung	9
3.1.7	Gärung.....	9
3.1.8	Klärung und Haltbarmachung	9
3.2	Molkereiprozess	11
3.2.1	Milchannahme.....	12
3.2.2	Reinigung und Separation	12
3.2.3	Wärmebehandlung.....	13
3.2.3.1	Thermisierung	14
3.2.3.2	Pasteurisieren.....	15
3.2.3.3	Homogenisieren	16
3.2.3.4	Sterilisation.....	17
3.2.3.5	Ultrahochoerhitzen (UHT)	18
3.3	Käseherstellung	19
3.4	Prozessdampf	22
3.4.1	Anwendungen in einer Brauerei und Molkerei.....	23

3.5	Rauchgaskondensation	25
3.6	Abwärmepotenziale	28
3.6.1	Was ist Abwärme?.....	28
3.6.2	Klassifizierung von Abwärme	28
3.6.3	Abwärmequellen	32
3.6.4	Abwärmennutzung.....	35
4	Modellbeschreibung/Methodik	37
4.1	Excel Rauchgaskondensation	37
4.1.1	Verbrennungsgleichungen	38
4.1.2	Mindestluftmenge, Luftverhältnis	40
4.1.3	Verbrennungsgas.....	41
4.1.4	Berechnungen für Brennstoffe mit bekannter chemischer Verbindung	42
4.1.5	Berechnungen für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse.....	44
4.1.6	Anwendung des Excel-Programms.....	48
4.2	PV-GIS.....	53
4.2.1	Standortauswahl	53
4.2.2	Horizontinformationen	54
4.2.3	Auswahl der Solarstrahlungsdatenbank	54
4.2.4	Netzgekoppelte PV-Anlagen.....	55
4.2.5	Nachgeführte PV-Anlagen	57
4.2.6	Netzunabhängige PV-Anlagen.....	57
4.2.7	Einstrahlungsdaten pro Monat	58
4.2.8	Durchschnittliche Bestrahlungsstärke pro Tag	58
4.2.9	Bestrahlungsstärkedaten pro Stunde.....	58
4.2.10	Typisches Meteorologisches Jahr.....	58
4.3	Dachflächenbestimmung der Brauerei Hofstetten für PV	60
4.3.1	Nach Süden ausgerichtete Dachflächen	60
4.3.2	Nach Westen ausgerichtete Dachflächen	62

4.3.3	Nach Osten ausgerichtete Dachflächen	63
4.4	Abwärmepotenziale	64
4.4.1	Methoden der Datenerhebung	64
4.4.1.1	Top-Down-Ansatz	64
4.4.1.2	Bottom-Up-Ansatz.....	65
4.4.1.3	Kombinierter Top-Down-Bottom-Up-Ansatz	66
4.4.2	Ermittlung Energiebedarf	67
4.4.2.1	Top-Down: STATcube	68
4.4.2.2	Top-Down: Energieeffizienz-Benchmark Industrie	70
4.4.2.3	Bottom-Up.....	71
4.4.3	Ermittlung Abwärmepotenzial	71
4.4.3.1	Abschätzung über Prozesswärme	71
4.4.3.2	Abschätzung über Abwärmefaktoren	72
5	Ergebnisse	75
5.1	Rauchgaskondensation	75
5.2	PV-GIS-Berechnungen	77
5.2.1	Zeitliche Einordnung der Ergebnisse.....	81
5.3	Energiebedarf/Abwärmepotenziale.....	87
6	Zusammenfassung und Ausblick	97
7	Anhang.....	105

NOMENKLATUR

Abkürzungen

A	Dachfläche
A_{ges}	gesamte Dachfläche
CIP	Cleaning in Place
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
HTST	High-Temperature-Short-Time
ISO	International Organization for Standardization
LTLT	Low-Temperature-Long-Time
OÖ	Oberösterreich
PV	Photovoltaik
PV-GIS	Photovoltaic Geographical Information System
TNV	thermische Nachverbrennung
UHT	Ultra High Temperature
STC	Standard Test Conditions
ETS	Emission Trading System
BW	Baden-Württemberg
NRW	Nordrhein-Westfalen
BImSchV	BundesImmissionschutzverordnung
WZ	Wirtschaftszweig

Lateinische Formelbuchstaben

a_{C_i}	Anzahl der Kohlenstoffatome der Verbindung i
a_{H_i}	Anzahl der Wasserstoffatome der Verbindung i
a_{N_i}	Anzahl der Stickstoffatome der Verbindung i
a_{S_i}	Anzahl der Schwefelatome der Verbindung i

Nomenklatur

a_{O_i}	Anzahl der Sauerstoffatome der Verbindung i
c_p	spezifische Wärmekapazität
$G(i)$	Globale Bestrahlungsstärke auf der schiefen Ebene
H_{sun}	Höhe der Sonne
K	Komponente
L_{min}	Molare Mindestluftmenge
l_{min}	spezifische Mindestluftmasse
M_i	Molmasse der Verbindung i
m	Masse
m_B	Masse des Brennstoffs
m_{Luft}	Luftmasse
m_L	Masse trockene Luft
$m_{\text{Luft,stö}}$	stöchiometrische Luftmasse
m_L^f	Masse feuchte Verbrennungsluft
m_L^{min}	stöchiometrische Mindestluftmenge
m_V^+	Masse stöchiometrisches Verbrennungsgas
m_V	Masse Verbrennungsgas
m_w	Masse Wasserdampf
n_i	Stoffmenge der Verbindung i
$O_{\text{min},i}$	Molarer Sauerstoffbedarf der Verbindung i
O_{min}	Molarer Sauerstoffbedarf des Brennstoffs
o_{min}	spezifischer Sauerstoffbedarf
p	Luftdruck
p_W^s	Sättigungspartialdruck
p_{tr}	Tripelpunktsdruck
P	stündliche, durchschnittliche Leistung
R_V^{tr}	Gaskonstante des trockenen Verbrennungsgases
R_w	Gaskonstante Wasserdampf

Nomenklatur

time	nach Stunden aufgelöste Zeit über das gesamte Wetterjahr
T_{\min}	Minimale Referenztemperatur
t_0	Umgebungstemperatur
T2m	Lufttemperatur in 2 Meter Höhe
WS10m	Windgeschwindigkeit in 10 Meter Höhe
X	Wasserbeladung
\tilde{X}	molare Wasserbeladung
x_i^B	Stoffmengenanteil der Komponente i des Brennstoffs
x_K	Stoffmengenanteil der Komponenten K

Griechische Formelbuchstaben

γ	auf die Brennstoffmasse bezogene Masse
γ_C	spezifische Masse Kohlenstoff des Brennstoffs
γ_{H_2}	spezifische Masse Wasserstoff des Brennstoffs
γ_S	spezifische Masse Schwefel des Brennstoffs
γ_{N_2}	spezifische Masse Stickstoff des Brennstoffs
γ_{O_2}	spezifische Masse Sauerstoff des Brennstoffs
γ_W	spezifische Masse Wasser des Brennstoffs
γ_A	spezifische Masse Asche des Brennstoffs
$\mu_{Lü}$	spezifischer Luftüberschuss
μ_{LF}	spezifische Luftfeuchte
μ_L	Spezifische Masse der feuchten Verbrennungsluft
μ_V^+	Spezifische Masse des stöchiometrischen Verbrennungsgases
μ_V	Spezifische Verbrennungsgasmasse
μ_W^{kond}	spezifische Masse der kondensierten Wassermenge
μ_W^S	spezifische Masse Wasserdampf des gesättigten Verbrennungsgases
μ_V^{tr}	spezifische Masse des trockenen Verbrennungsgases
ν_i	auf die Stoffmenge des Brennstoffs bezogene Stoffmenge der Verbindung i

Nomenklatur

$v_{L\ddot{u}}$	Molarer Luftüberschuss
v_{LF}	Molare Luftfeuchte
v_L	Molare Verbrennungsluftmenge
λ	Verbrennungsluftverhältnis
ξ	Massenanteil
ξ_K^+	stöchiometrische Massenanteile der Komponenten
ξ_K	Massenanteile der Komponenten
φ	relative Feuchte
ΔT	Temperaturdifferenz

Chemische Symbole

H ₂	Wasserstoff
A	Asche
C	Kohlenstoff
N ₂	Stickstoff
O ₂	Sauerstoff
I	Indium
G	Gallium
Cd	Cadmium
Te	Tellurid
S	Schwefel
Ar	Argon
Ne	Neon
N ₂ [*]	Vereinfachung Luftstickstoff
SO ₃	Schwefeltrioxid
C ₃ H ₈	Propan
CH ₃ OH	Methanol
CH ₄	Methan

CO₂ Kohlendioxid

Einheiten

kg Kilogramm

kJ/kg Kilojoule pro Kilogramm

kJ Kilojoule

GJ Gigajoule

min. Minuten

Std Stunden

µm Mikrometer

m² Quadratmeter

kWp Kilowattpeak

kWh Kilowattstunden

GWh Gigawattstunden

K Kelvin

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Typische Temperaturbereiche beim Maischprozess [11]	6
Tabelle 2: Erhitzungsverfahren der Milchherstellung in Anlehnung an [15]	14
Tabelle 3: Theoretisches Potenzial: Erfasste Wärmeträger nach [46]	29
Tabelle 4: Kategorisierung der zu untersuchenden Unternehmen	67
Tabelle 5: Exemplarischer Auszug des sektoralen Endverbrauchs an Gesamtenergie in Oberösterreich [57]	68
Tabelle 6: Anzahl der Beschäftigten je Sektor [57]	69
Tabelle 7: Sektorale Energiebilanzen	69
Tabelle 8: Gebildete Kennzahlen je Sektor	69
Tabelle 9: Sektorale Kennzahlen - Benchmark deutsche Industrie.....	70
Tabelle 10: Sektorale Abwärmefaktoren der vier Studien.....	74
Tabelle 11: Auszug eines vollen Tages der durch PV-GIS ermittelten und in Excel aufbereiteten Werte [53]	78
Tabelle 12: PV-Jahreserträge der nach Süden ausgerichteten 100 kWp PV-Anlage	79
Tabelle 13: Maximalwert, Minimalwert und Durchschnittswert der 100 kWp PV-Anlage	79
Tabelle 14: PV-Jahreserträge der nach Westen ausgerichteten 28 kWp PV-Anlage.....	80
Tabelle 15: Maximalwert, Minimalwert und Durchschnittswert der 28 kWp PV-Anlage	80
Tabelle 16: PV-Jahreserträge der nach Osten ausgerichteten 20 kWp PV-Anlage.....	81
Tabelle 17: Maximalwert, Minimalwert und Durchschnittswert der 20 kWp PV-Anlage	81
Tabelle 18: Energiebedarfe nach Top-Down-Ansatz mittels STATcube.....	87
Tabelle 19: Energiebedarfe nach Top-Down-Ansatz deutscher Benchmarks.....	88
Tabelle 20: Energiebedarfe nach exakter Zuordnung über deutsche Benchmark-Kennzahlen	90
Tabelle 21: Geschätzter Gesamtenergiebedarf anhand der verschiedenen Ansätze	91
Tabelle 22: Geschätzter Gesamtenergiebedarf anhand der verschiedenen Ansätze	91
Tabelle 23: Abwärmepotenzialerhebung über Prozesswärme	92
Tabelle 24: Zuordnung der Abwärmefaktoren.....	93

Tabelle 25: Abwärmepotenzialberechnung nach STATcube	94
Tabelle 26: Abwärmepotenzialberechnung nach übergeordneten Wirtschaftszweigen	94
Tabelle 27: Abwärmepotenzialberechnung nach exakter Zuordnung.....	94
Tabelle 28: Vergleich der Ergebnisse über die verschiedenen Ansätze für das Zementwerk Hatschek.....	95
Tabelle 29: STATcube: Sektoraler Erdgasverbrauch in Oberösterreich [57].....	111
Tabelle 30: STATcube: sektoraler elektrischer Energieverbrauch in Oberösterreich [57]	112

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Produktionsabschnitte in Brauereien in Anlehnung an [4]	4
Abbildung 2: Brauprozess [9]	5
Abbildung 3: Prozess der Milchherstellung in Anlehnung an [14]	11
Abbildung 4: Prinzip der Fettstandardisierung [15]	13
Abbildung 5: Temperatur-Zeit-Kombination zur Abtötung von Bakterien [15].....	13
Abbildung 6: Prinzip der Käseherstellung in Anlehnung an [14].....	19
Abbildung 7: Vergleich der spezifischen Enthalpien von Dampf und Wasser [29]	22
Abbildung 8: Grad der Kondensation in Abhängigkeit der Abgastemperatur und des Verbrennungsluftverhältnisses [41]	26
Abbildung 9: Theoretisches/Technisches/Wirtschaftliches Potenzial [47].....	30
Abbildung 10: Klassifizierung von Abwärmequellen in Anlehnung an [48]	30
Abbildung 11: Spezifische Massen aus Elementaranalyse eintragen (Screenshot).....	49
Abbildung 12: Luftdruck und Abgastemperatur eintragen (Screenshot)	49
Abbildung 13: Verbrennungsluftverhältnis und relative Feuchte frei wählbar (Screenshot)..	49
Abbildung 14: Zentrale Ergebnisfelder der Rauchgaskondensation (Screenshot)	50
Abbildung 15: Eingabe der Brennstoffzusammensetzung (Screenshot)	51
Abbildung 16: Eingabemöglichkeiten für Luftdruck und Abgastemperatur (Screenshot).....	51
Abbildung 17: Freie Wahl des Verbrennungsluftverhältnisses und der relativen Feuchte (Screenshot)	51
Abbildung 18: Zentrale Ergebnisfelder der Rauchgaskondensation (Screenshot)	52
Abbildung 19: Ergebnisfelder in Grün (Screenshot).....	52
Abbildung 20: Erstansicht von PV-GIS bevor etwas eingegeben wurde [53]	53
Abbildung 21: Auswahlmöglichkeiten der Solarstahlungsdatenbank [54]	54
Abbildung 22: Ergebnisüberblick in PV-GIS [53]	56
Abbildung 23: Satellitenaufnahme der Brauerei Hofstetten in Google Maps [55]	60
Abbildung 24: Abmessung Südliche Dachfläche A1 [55].....	61
Abbildung 25: Abmessung Südliche Dachfläche A2 [55].....	61

Abbildung 26: Abmessung Südliche Dachfläche A3 [55].....	62
Abbildung 27: Errechneter Taupunkt (Screenshot Excel Berechnung).....	76
Abbildung 28: Eingegebene Parameter zur Berechnung der südlichen PV-Anlage für das Jahr 2020 [53]	77
Abbildung 29: Stündliche PV-Erträge der nach Süden, Westen und Osten ausgerichteten Anlagen.....	82
Abbildung 30: Stündlicher Verlauf der auf 1 kWp normierten Anlagenleistung	83
Abbildung 31: Stündliche PV-Erträge der drei ausgewerteten Anlagen im Frühling.....	84
Abbildung 32: Stündlicher Verlauf der auf 1 kWp normierten Anlagenleistung im Frühling..	84
Abbildung 33: Stündliche PV-Erträge der drei ausgewerteten Anlagen im Sommer	85
Abbildung 34: Stündlicher Verlauf der auf 1 kWp normierten Anlagenleistung im Sommer .	85
Abbildung 35: Stündliche PV-Erträge der drei ausgewerteten Anlagen im Herbst	86
Abbildung 36: Stündlicher Verlauf der auf 1 kWp normierten Anlagenleistung im Herbst	86
Abbildung 37: Berechnungsoberfläche für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse (Screenshot)	105
Abbildung 38: Grün hinterlegte Ergebnisfelder für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse (Screenshot)	106
Abbildung 39: Berechnungsoberfläche für Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung (Screenshot).....	107
Abbildung 40: Grün hinterlegte Ergebnisfelder für Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung (Screenshot).....	108
Abbildung 41: Westliche Dachfläche A4 [55].....	109
Abbildung 42: Westliche Dachfläche A5 [55].....	109
Abbildung 43: Östliche Dachfläche A6 [55].....	110
Abbildung 44: Östliche Dachfläche A7 [55].....	110

1 EINLEITUNG

Im Jahr 2015 wurde das Pariser Klimaübereinkommen von 195 Staaten geschlossen und steht seit jeher für das Ziel die globale Erderwärmung auf unter 2 Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Im Sinne dieses Abkommens wurden nationale Klimaziele, wie die bis 2040 angestrebte Klimaneutralität Österreichs gesteckt und Strategien zur Erreichung dieser entwickelt. [1]

Dabei nimmt das Bundesland Oberösterreich eine zentrale Rolle ein, welches für 29,4 % aller österreichweit verursachten Treibhausgas-Emissionen verantwortlich ist. [2] Der daraus geschuldeten Handlungspflicht wird mit der Energiestrategie des Landes Oberösterreichs („Energie-Leitregion OÖ 2050“) begegnet. In den dort verankerten strategischen Zielen wird den Bereichen Energieeffizienz, Erneuerbare Energien und Versorgungssicherheit große Bedeutung beigemessen. [3]

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit greift diese Bereiche der oberösterreichischen Energiestrategie in drei unterschiedlichen Themenfeldern auf, welche als Maßnahmen im Sinne des Energiemanagementsystems nach DIN EN ISO 50001 gesehen werden können.

Das erste Themenfeld beschäftigt sich mit der Rauchgaskondensation und ist damit im Kontext des Bereichs Energieeffizienz zu sehen. Hier wird darauf abgezielt, die vielfach erhebliche, ungenutzte Wärmemenge industrieller Rauchgase in Form von Kondensationsenthalpie des mitgeführten Wasserdampfs zu nutzen. Diese Thematik ist beispielsweise für alle Betriebe mit Prozessdampfbedarf relevant. Darunter fallen in der Lebensmittelindustrie im Speziellen Molkereien und Brauereien.

Das zweite Themenfeld orientiert sich an den Bereichen Erneuerbare Energien und Versorgungssicherheit und betrifft die mögliche Errichtung einer Photovoltaikanlage auf den Dächern der oberösterreichischen Brauerei Hofstetten. Dabei wird dem Umstand Rechnung getragen, dass in Industriebetrieben vielfach große Mengen elektrischer Energie benötigt werden, die damit zumindest teilweise und auf erneuerbarer Basis selbst bereitgestellt werden können.

Das dritte Themenfeld beschäftigt sich mit der Abwärmepotenzialbestimmung mehrerer Unternehmen der oberösterreichischen Stadt Gmunden. Damit werden im Sinne der Energiestrategie Potenziale zur Erhöhung der Energieeffizienz aufgezeigt, die zukünftig durch die innerbetriebliche und außerbetriebliche Nutzung von Abwärme ausgeschöpft werden können.

2 AUFGABENSTELLUNG

Die Aufgabenstellung der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit lässt sich grob in zwei Teile gliedern. Im ersten Teil sollen die theoretischen Grundlagen – der Stand der Technik – für den zweiten praktischen Teil der Masterarbeit aufbereitet werden.

Der erste Abschnitt umfasst dabei sowohl den Brauereiprozess als auch die Milch- und Käseherstellung im Molkereiprozess. In den dabei zu beschreibenden Prozessabläufen wird an verschiedener Stelle der Einsatz von Prozessdampf benötigt. Dementsprechend sollen sowohl dessen Eigenschaften als Wärmeträgermedium als auch seine Verwendungszwecke vorgestellt werden.

Zusätzlich soll im Sinne der Energieeffizienzsteigerung auf die Rauchgaskondensation eingegangen werden, welche bei der Herstellung von Prozessdampf eingesetzt werden kann.

Der zweite Abschnitt der Arbeit umfasst den praktischen Teil der Arbeit. Dieser beinhaltet die Erstellung eines EXCEL-Programms, mithilfe dessen der Grad der Kondensation von Rauchgasen berechnet werden kann.

Außerdem sollen für die Brauerei Hofstetten Berechnungen für eine zukünftig angedachte Photovoltaik-Dachanlage anhand der öffentlich zugänglichen Webanwendung PV-GIS (Photovoltaic Geographical Information System) durchgeführt werden.

Zuletzt umfasst der praktische Teil die Ermittlung des Energiebedarfs sowie des Abwärmepotenzials der energieintensivsten Unternehmen der oberösterreichischen Stadt Gmunden.

2.1 Vorgehensweise

Die im ersten Abschnitt der Masterarbeit aufbereiteten theoretischen Grundlagen zum Stand der Technik wurden mittels klassischer Literaturrecherche erhalten.

Diese wurden im Speziellen bei der Erstellung des EXCEL-Berechnungstools der Rauchgaskondensation benötigt. Die dabei gefundenen formelmäßigen Zusammenhänge dienten als Grundlage der später umgesetzten Funktionen. Auch zur Validierung der mittels des EXCEL-Programms erhaltenen Ergebnisse wurden Literaturwerte verwendet.

Zur Berechnung der PV-Anlage für die Brauerei Hofstetten musste als erstes eine Abschätzung der zur Verfügung stehenden Dachflächen getroffen werden. Mittels der bekannten Anschrift der Brauerei konnten diese, über die in Google Maps verfügbare Satellitenansicht, eingesehen werden. Über die Funktion „Entfernung messen“ ließen sich dann die in Frage kommenden nach Süden, Westen und Osten ausgerichteten Dachflächen flächenmäßig ermitteln.

Anschließend wurden mittels PV-GIS, einer frei zugänglichen Photovoltaik-Berechnungs-Webanwendung, verschiedene Auswertungen der angedachten PV-Anlage durchgeführt.

Zuletzt galt es das Abwärmepotenzial der energieintensivsten Gmundner Unternehmen zu ermitteln. Dazu wurden zuerst alle relevanten Firmen unter Verwendung der Herold-Datenbank bestimmt. Anschließend erfolgte die Berechnung der Energiebedarfe dieser Unternehmen durch Top-Down- und Bottom-Up-Ansätze. Nachfolgend konnten mittels Literaturrecherche zwei Möglichkeiten gefunden werden, anhand derer über die ermittelten Energiebedarfe auf das Abwärmepotenzial geschlossen werden konnte.

Die erste Variante stellte dabei einen raschen, überschlagsmäßigen Ansatz dar. Dieser geht davon aus, dass im verarbeitenden Gewerbe ein branchenübergreifend gemittelter Anteil an Endenergie zur Bereitstellung von Prozesswärme aufgewandt wird. Infolge des Produktionsprozesses soll ein gewisser Prozentsatz dieser Prozesswärme als Abwärme anfallen und damit Rückschlüsse auf das Abwärmepotenzial zulassen.

Die zweite angewandte Variante zur Bestimmung des Abwärmepotenzials ist in der Fachliteratur weit verbreitet. Dabei werden branchenspezifische Abwärmefaktoren genutzt, welche für die jeweiligen Wirtschaftszweige unterschiedliche prozentuale Anteile des Gesamtenergiebedarfs angeben, die als Abwärme anfallen.

3 THEORETISCHER HINTERGRUND – STAND DER TECHNIK

3.1 Brauereiprozess

Unabhängig der Größe und des Sortiments einer Brauerei, lässt sich die Bierherstellung in drei Abschnitte einteilen. Im ersten Abschnitt, dem sogenannten Sudhaus, wird aus Wasser, Malz, und Hopfen die Würze (eine verzuckerte Flüssigkeit) hergestellt. Im zweiten Abschnitt, dem Gär- und Lagerkeller entsteht aus der Würze das Bier, welches im dritten und letzten Abschnitt, der Abfüllhalle haltbar gemacht und schließlich abgefüllt wird.

Des Weiteren werden wie in Abbildung 1 dargestellt Nebeneinrichtungen benötigt, welche den Produktionsprozess mit Wärme, Kälte und Druckluft sowie Hilfsstoffen wie Kohlendioxid oder Lauge für Reinigungsleistungen versorgen. [4]

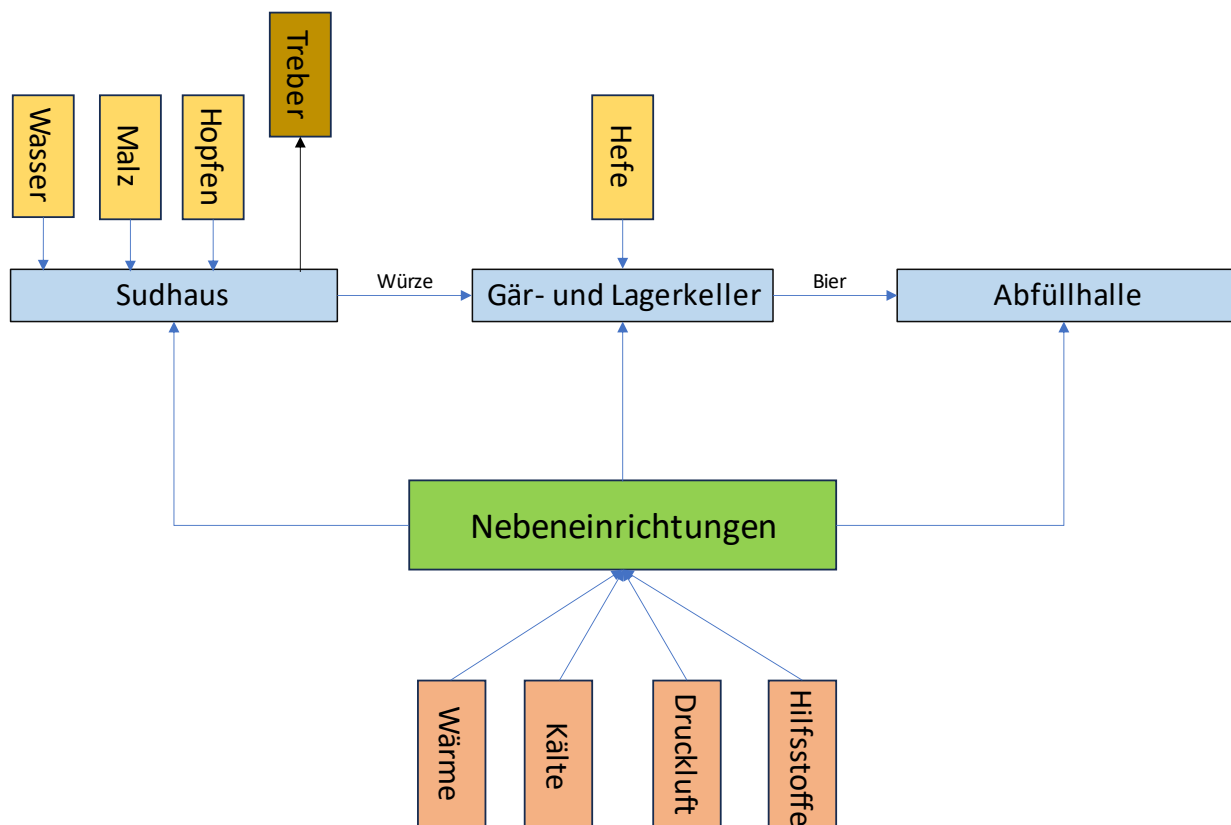


Abbildung 1: Produktionsabschnitte in Brauereien in Anlehnung an [4]

3.1.1 Malzherstellung

Noch bevor der eigentliche Brauprozess im Sudhaus beginnt, findet in der Regel außerhalb der Brauerei die Malzherstellung statt. [5] Dabei wird als erstes die Braugerste gesäubert und gewaschen. Sobald ein Wassergehalt von 40 - 45 % erreicht wird, beginnt der Keimvorgang, wodurch im Korn Enzyme gebildet werden, die im späteren Brauprozess wichtig für den Stärke- und Eiweißabbau sind. Im Zuge des Keimvorgangs findet zudem bereits eine partielle Umwandlung der Stärke in kleinere Moleküle wie Maltose statt. [6]

Nachfolgend wird das gekeimte Korn getrocknet, im Fachjargon gedarrt, wobei je länger die Dauer und je höher die Temperatur des Darrvorgangs ist, desto dunkler und geschmacklich intensiver wird das Malz. Im Anschluss wird das Malz zur Brauerei gebracht, wo es nach erneuter Säuberung sortenrein in die entsprechenden Malzsilos überführt wird. Von dort aus gelangt das Braumalz in die Schrotmühle. In dem dort entweder trocken oder nass durchgeführten Mahlvorgang wird das Braumalz zerkleinert, damit die wertvollen Inhaltsstoffe im tatsächlichen Brauprozess möglichst gut herausgelöst werden können. [6]

Es hat sich als Stand der Technik erwiesen, dass eine möglichst feine Schrotung die Sudhausausbeute erhöht. Dies ist jedoch nur unter der Verwendung von modernen Maischefiltern möglich. Bei den heute noch weit verbreiteten Läuterbottichen dienen die Spelzen (das feste, trockene Hüllblatt des Malzkorns) als Filter beim Abläutern und werden aufgrund dieser Aufgabe nicht so fein gemahlen. [7] [8]

In Abbildung 2 wird der nun folgende Brauprozess schematisch dargestellt und soll in weiterer Folge näher beschrieben werden.

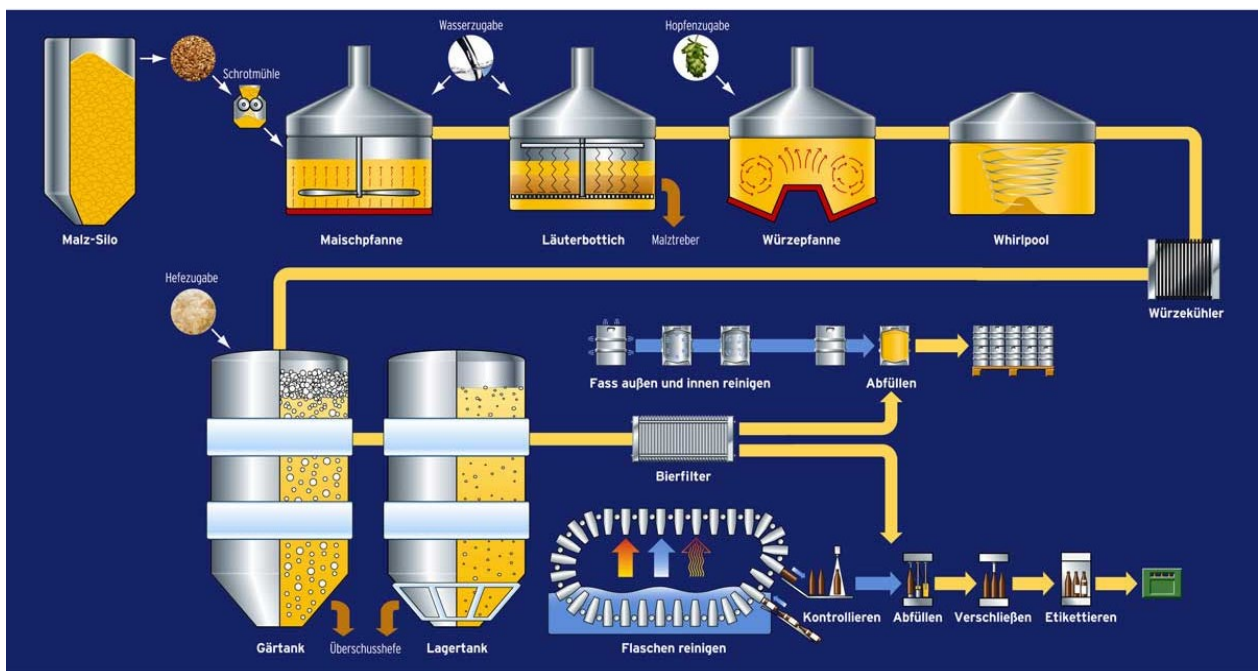


Abbildung 2: Brauprozess [9]

3.1.2 Maischen

Der Maischprozess nimmt beim Bierbrauen eine zentrale Rolle für die Herstellung der Würze ein. Dabei wird das vorab geschrotete Malz zusammen mit temperierten Brauwasser in den sogenannten Maischbottich gegeben und unter ständigem Umrühren auf verschiedene Temperaturniveaus gebracht. Zweck dieses Prozesses ist es, den schon im Mälzvorgang gestarteten Lösevorgang des Malzkorns fortzuführen. Dem Malzschrot werden in einem eineinhalb bis dreistündigen Vorgang, welcher durch abwechselnde Temperaturerhöhungen und Rastzeiten gekennzeichnet ist, probiert, seine löslichen Bestandteile in die Flüssigkeit überzuführen. [4]

Dabei werden je nach Ausführung der Temperaturerhöhungen zwei Verfahren unterschieden: Das Infusionsverfahren und das Dekotionsverfahren.

Ersteres erhitzt das gesamte im Maischbottich befindliche Volumen unter Berücksichtigung der Rastzeiten bei Optimaltemperaturen bis zur Abmischetemperatur von 78 °C, währenddessen weiteres Teile der Maische entnimmt, kocht und durch die anschließende Rückführung dieser Anteile in den Maischbottich die Gesamttemperatur des Gesamtvolumens erhöht.

Die beim Maischen genutzten Optimaltemperaturen leiten jeweils unterschiedliche biochemische Vorgänge ein, welche von der Aktivität der spezifischen Malzenzyme abhängen.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die typischen Vorgänge sowie zugehörigen Temperaturbereiche beim Maischprozess. Die dafür notwendige Wärmeversorgung erfolgt in der Regel durch Prozessdampf. [10]

Tabelle 1: Typische Temperaturbereiche beim Maischprozess [11]

Vorgang	Temperaturbereich [°C]	Dauer
Vorlösen	18 - 30	20 min – 12 Std.
Glukanaserast ("Gummirast")	35 – 40	15 – 30 min
Weizenrasten ("Ferularasten")	45 und 48	je ca. 15 min.
Proteaserast (Eiweißrast)	50 – 58	10 – 20 min.
Maltoserast	60 – 68	30 – 90 min.

Verzuckerung	68 – 76	15 – 30 min. (oder bis zur Jodnormalität)
Abmaischen	77 – 80	mindestens 20 min.

Bei der letzten Rast vor dem Abmaischen, der Verzuckerung, findet die Jodprobe statt. Diese überprüft, ob die im Malz enthaltene Stärke in Zucker umgewandelt wurde. Fällt der Stärkenachweis negativ aus, wird die Verzuckerung beendet und abgemaischt.

3.1.3 Läutern

Nach Beendigung des Maischprozesses werden beim Läutern die festen und flüssigen Bestandteile der Maische voneinander getrennt. Das flüssige Extrakt, welches aus dem Malz herausgelöst wurde, nennt man Würze. Die ungelösten festen Rückstände des Malzschrotes heißen Treber. [8]

Für den weiteren Bierbrauprozess ist lediglich die Würze von Bedeutung und soll daher möglichst gut vom Treber abgetrennt werden, welcher als hochwertiges Viehfutter sehr geschätzt ist.

Die Trennung von Würze und Treber findet in der Regel in zwei Schritten statt. Im ersten Schritt wird durch einen Filtrationsprozess die Vorderwürze gewonnen. Da sich jedoch nach diesem Schritt, dem Hauptguss, weiterhin noch Würze im Treber befindet, wird diese im Folgeschritt, dem Nachguss, durch Zugabe heißen Wassers ausgewaschen. Dieser Vorgang wird auch als Anschwänzen bezeichnet.

Für den Läuterprozess stehen drei unterschiedliche Aggregate zur Verfügung. Der Maischfilter, der Strainmaster und der am weitesten verbreitete Läuterbottich.

Der Läuterbottich ist durch einen perforierten Senkboden gekennzeichnet, welcher sich knapp oberhalb des eigentlichen Bodens des Läuterbottichs befindet. An diesem setzen sich die unlöslichen Treber ab und bilden einen Filterkuchen. Durch die Öffnungen des Senkbodens gelangt die abfließende Würze über das Läutersystem in die Sudpfanne zur nachfolgenden Würzekochung. [4, 6, 8]

3.1.4 Würzekochen

Der Folgeprozess des Läuterns ist das 1-2-stündige Kochen der Würze unter Zugabe von Hopfen. Sobald die Würze in einer Sud- oder Würzpfanne zum Kochen gebracht wurde, erfolgt

die erste Hopfengabe. Hierbei wird aufgrund der Flüchtigkeit der Hopfeninhaltsstoffe zuerst eine preiswerte Hopfensorte gewählt, welche möglichst viele Bitterstoffe abgeben soll. Erst kurz vor Ende des Kochvorgangs wird der teurere Aromahopfen hinzugegeben, damit dessen geschmacksbestimmende Inhaltsstoffe unbeschadet bleiben und dem Bier seinen typischen, aromatischen Hopfengeschmack verleiht. Im Zuge des Würzekochens werden noch einige weitere Ziele verfolgt:

- Einstellung des Stammwürzegehalts (Konzentration der Würze) durch Verdampfung von Wasser
- Deaktivierung der Malzenzyme zum Erhalt der Würzezusammensetzung
- Sterilisation
- Ausdampfung nicht gewünschter Aromastoffe
- Eiweißkoagulation
- Bitterstoffisomerisierung

Zur Erreichung des gewünschten Stammwürzegehalts werden verschiedene Kochverfahren verwendet. Dazu zählen Würzpfannen, Pfannen mit Innen- oder Außenkochern, Pfannen mit möglicher Druckerhöhung sowie kontinuierliche Durchlaufkochsysteme. Die Gesamtverdampfung der unterschiedlichen Varianten liegt zwischen 4 und 10 % des Würzevolumens. [4, 6, 8, 10, 12]

3.1.5 Heißtrubabscheidung

Nach dem Kochen der Würze gilt es den sogenannten Heißtrub, eine Mischung aus koagulierten Eiweißstoffen, Gerbstoffen und nicht gelösten Hopfenbestandteilen abzutrennen. Dieser Arbeitsschritt ist wichtig, da ansonsten im nachfolgenden Gärprozess der Hefestoffwechsel beeinträchtigt werden würde.

In modernen Brauereien wird dafür ein sogenannter Whirlpool eingesetzt. Dieser macht sich den Dichteunterschied zwischen der Würze und den nicht löslichen Partikeln des Heißtrubes zu Nutze. So wird die noch heiße Würze tangential und mit hoher Geschwindigkeit an der zylindrischen Behälterwand des Whirlpools eingepumpt. Die auftretenden Zentrifugalkräfte führen dazu, dass sich die schwereren Trubpartikel in der Mitte des Gefäßes kegelförmig abscheiden und von dort aus abgetrennt werden können. [7, 12] [13]

3.1.6 Würzekühlung

Nach der Heißtrubabscheidung wird die heiße Würze mittels Plattenwärmetauscher bis auf die Anstelltemperatur abgekühlt, an der die Gärung stattfindet. Die dabei abgegebene Wärme wird nach Stand der Technik auf kaltes Brauwasser übertragen, welches sich dabei auf bis zu 80 °C aufheizt und in weiterer Folge als heiße Brauwasserreserve im Nächsten Sud zum Einmaischen oder Läutern verwendet wird. In Abhängigkeit davon, ob untergärige oder obergärige Hefe verwendet wird, liegt die Anstelltemperatur im ersten Fall bei 5 °C, im zweiten Fall bei 20 °C. Im Zuge der Abkühlung bis hin zur Anstelltemperatur bilden sich bei Temperaturen zwischen 70 und 55 °C durch das Ausfällen von Eiweißbestandteilen der sogenannte Kühltrub. [4, 8, 12, 13]

3.1.7 Gärung

Nach erfolgter, rascher Abkühlung auf die Anstelltemperatur verlässt die Würze das Sudhaus in Richtung des Gär- und Lagerkellers, dem Kaltbereich der Brauerei. Hier erfolgt durch Gärung und anschließender Reifung die Umwandlung der Würze zu Bier.

Um optimale Startbedingungen für die Gärung zu gewährleisten, wird der Würze neben der notwendigen Reinzuchtheefe eine bestimmte Menge an Sauerstoff durch Sterilluft zugeführt, bevor sie in Gärbottiche oder Gärtanks gepumpt wird. Dort findet unter Wärmeentwicklung die alkoholische Gärung statt, bei der Malzzucker in Alkohol und Kohlensäure umgewandelt wird. Damit die Temperatur in den Gärbehältern konstant bleibt, sind diese in der Regel mit einem Mantel versehen, der mit Kühlmittel durchflossen ist. Dieser soll die Temperatur in einem Bereich zwischen 5 und 15 °C halten. Die Dauer der sogenannten Hauptgärung beträgt zwischen sechs und zehn Tagen, gefolgt von einer 2 – 16 - wöchigen Nachgärung bei 0 °C. [4, 13]

3.1.8 Klärung und Haltbarmachung

Die letzten beiden Schritte, bevor das Bier zur Abfüllung gelangt, sind das Klären und das Haltbarmachen. Unter dem Vorgang der Klärung versteht man die Abscheidung der bis zuletzt verbliebenen Trübstoffe wie Eiweißgerbstoffe, Hopfenrückstände, Hefezellen und bierverderbende Bakterien. Somit dient dieser Schritt nicht nur dem Wunsch des Verbrauchers nach einem glanzfeinen Bier, sondern auch der Verbesserung der Haltbarkeit. Dies wird durch Zentrifugieren oder Filtrieren des Biers erreicht. Bei der Filtration ist penibel darauf zu achten, dass die genutzten Filter steril sind. Dazu werden sie im Vorfeld mit 90 °C

heißem Wasser gespült und um eine im anschließenden Filtrationsprozess erneute Erwärmung des Bieres und der abermaligen Bildung von Trübstoffen zu verhindern, noch einmal mit kaltem Wasser gekühlt.

Von vielen Brauereien wird zuletzt eine Kurzzeiterhitzung des Biers auf bis zu 75 °C, der Pasteurisationstemperatur, durchgeführt. Dieser Schritt dient der verbesserten Haltbarmachung. Das nun fertige Bier kann jetzt in die gewünschten Gebinde wie Fässer, Flaschen und Dosen abgefüllt werden. [4, 6, 12, 13]

3.2 Molkereiprozess

Der in einer Molkerei ablaufende Prozess der Milchverarbeitung beginnend mit der Annahme der Rohmilch in der Molkerei, über die verschiedenen Verfahrensschritte bis hin zur verkaufsfähigen Konsummilch, folgt dem in Abbildung 3 gezeigten Schema.

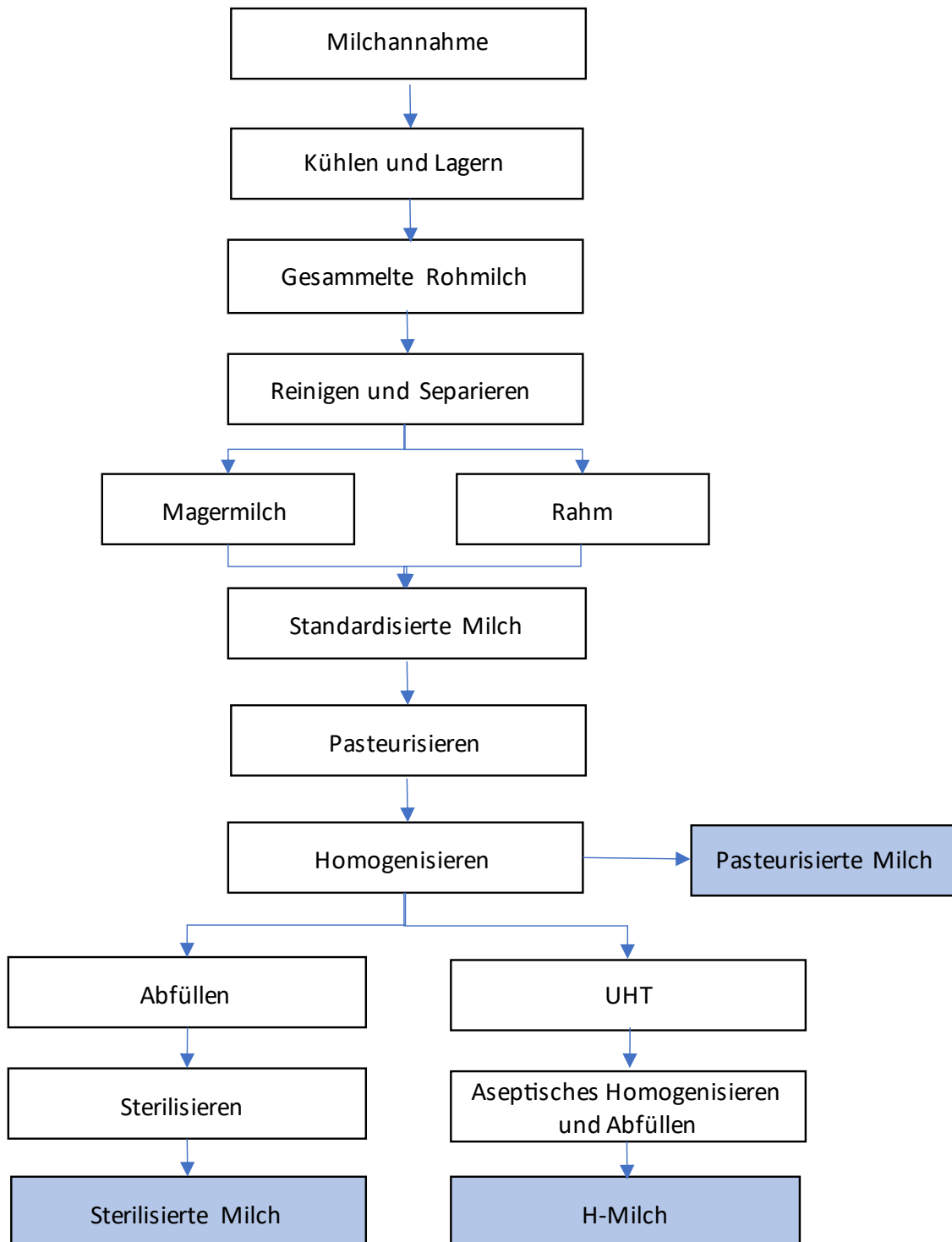


Abbildung 3: Prozess der Milchherstellung in Anlehnung an [14]

3.2.1 Milchannahme

Die Rohmilch wird durch Tanksammelwägen von den Erzeugerhöfen abgeholt und gekühlt mit einer Temperatur von 4 °C zur Molkerei transportiert. Während des Transports darf weder die Kühlkette unterbrochen noch ein Lufteintrag stattfinden, da andernfalls die Milchqualität durch die Vermehrung von Mikroorganismen beziehungsweise durch eine erhöhte Keimzahl negativ beeinflusst würde.

Diesem Umstand geschuldet, wird bei Ankunft in der Molkerei eine Qualitätsprüfung durchgeführt. Die gebräuchlichsten Tests untersuchen dabei das Geruchs- und Geschmacksprofil, die Keimzahl, die Somatische Zellzahl, den Gefrierpunkt, sowie die Zusammensetzung der Annahmemilch.

Sofern diese zur Zufriedenheit ausfallen, wird die gelieferte Milchmenge entweder durch eine Volumenmessung mittels Durchflusszähler oder durch Gewichtsmessung ermittelt. Anschließend erfolgt eine mittels Plattenwärmetauscher standardisierte Abkühlung der transportbedingt leicht erwärmten Annahmemilch auf unter 4 °C. Von dort aus gelangt die unbehandelte Rohmilch in vertikale 100.000 bis 500.000 Liter fassende Silotanks. [15]

3.2.2 Reinigung und Separation

Bevor die Rohmilch schließlich zur Wärmebehandlung gelangt, findet noch ein wichtiger Prozess statt. Dieser beinhaltet die Reinigung sowie Separation der Milch. Da trotz aller hygienischer Vorsichtsmaßnahmen unerwünschte Fremdstoffe, wie somatische Zellen und Schmutzpartikel aus Luft, Melkmaschinen, Milchleitungen usw. in die Rohmilch gelangen, muss zunächst ein mechanischer Reinigungsvorgang der Milch erfolgen. Im selben Prozessschritt findet zudem die Separation der Milch in nahezu fettfreie Magermilch und Rahm statt. Hierbei werden Filter, Zyklone und Separatoren eingesetzt, wobei für optimale Ergebnisse die Milch auf 40 °C vorgewärmt wird. [14, 16] Im Folgeschritt der Standardisation wird durch Rückmischung der Magermilch mit der exakten Menge an Rahm der gewünschte Fettgehalt der Milch eingestellt.

In Abbildung 4 ist der Vorgang der Standardisation dargestellt, wobei aus Vollmilch mit einem Fettgehalt von 4 % Standardisierte Milch mit 3 % Fett sowie Überschussrahm mit 40 % Fett gewonnen wird.

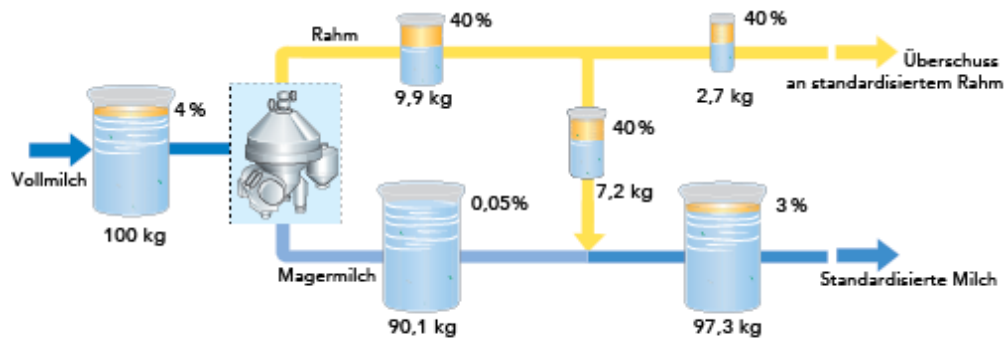


Abbildung 4: Prinzip der Fettstandardisierung [15]

3.2.3 Wärmebehandlung

Bevor Molkereien die standardisierte Milch als sogenannte Konsummilch verkaufen können, werden je nach Milchsorte verschiedene Wärmebehandlungen durchgeführt. Grund dafür ist einerseits der Wunsch einer erhöhten Haltbarkeit der Milch und andererseits der gesundheitliche Aspekt mögliche Krankheitserreger abzutöten.

Alle häufig in Milch vorkommenden Krankheitserreger werden schon bei geringer Erhitzung unschädlich gemacht. Der widerstandsfähigste pathogene Mikroorganismus, der damit als Indexorganismus für die Pasteurisierung gilt, ist der Tuberkelbazillus. Dieser kann durch eine Wärmebehandlung bei 63 °C und zehnmütiger Haltedauer abgetötet werden. Da jedoch weitere Mikroorganismen und Enzymsysteme die Haltbarkeit der Milch verkürzen können, ist es erforderlich, intensivere Wärmebehandlungen mit höheren Temperatur-Zeit Kombinationen anzuwenden. [15] In Abbildung 5 ist ersichtlich, dass unterschiedliche Temperatur-Zeit-Kombinationen zum selben Erfolg führen. So ist es beispielsweise möglich Koliforme Bakterien bei 65°C und einer Haltezeit von 10 Sekunden abzutöten, währenddessen dies bei 70°C nur eine Sekunde dauert. [15]

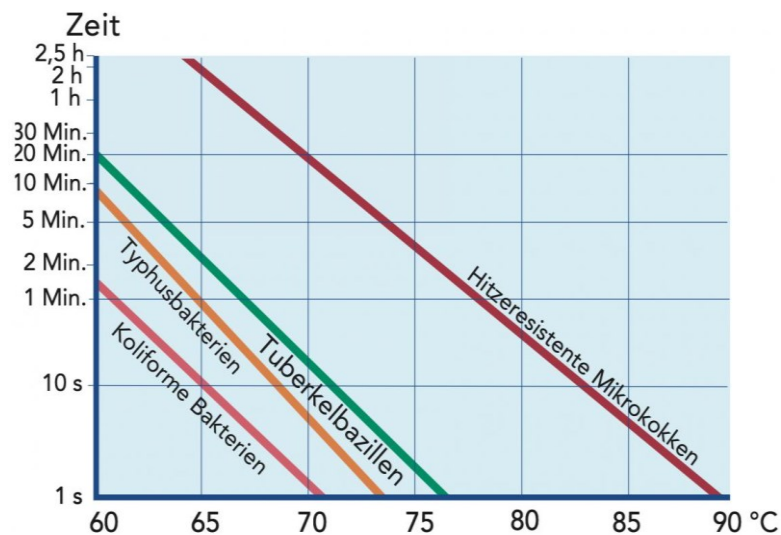


Abbildung 5: Temperatur-Zeit-Kombination zur Abtötung von Bakterien [15]

Aus rein ernährungsphysiologischer Sicht ist eine möglichst geringe Wärmebehandlung der Milch erstrebenswert, während aus mikrobiologischer Sicht eine intensive Erhitzung von Vorteil ist. Eine zu starke Erhitzung führt jedoch zu einer negativen Geschmacksveränderung der Milch sowie zu einer möglichen Denaturierung der Eiweißmoleküle, welche eine beispielsweise später angedachte Käseherstellung beeinträchtigen würde. Sohin entwickelte sich die Optimierung der Wärmebehandlungsverfahren in der Milchindustrie zu einem essentiellen Aufgabengebiet. In der untenstehenden Tabelle 2 sind die wichtigsten Kategorien der Erhitzungsverfahren mit ihren spezifischen Temperatur-Zeit-Kombinationen aufgelistet.

Tabelle 2: Erhitzungsverfahren der Milchherstellung in Anlehnung an [15]

Erhitzungsverfahren	Zeit	Temperatur
Thermisierung	Haltedauer bis 30 Sekunden	62 - 65 °C
Dauererhitzung	30 bis 32 Minuten	62 - 65 °C
Kurzzeiterhitzung	15 bis 30 Sekunden	72 – 75 °C
Hocherhitzung	8 bis 15 Sekunden	85 – 127 °C
Ultrahoherhitzung	2 bis 4 Sekunden	135 – 150 °C
Sterilisation	20 bis 40 Minuten	107 – 115 °C
	8 bis 12 Minuten	120 – 130 °C

3.2.3.1 Thermisierung

Der Trend zu immer größer werdenden Molkereien führt dazu, dass die Annahmemilch nicht immer unmittelbar verarbeitet werden kann. Vielmehr muss sie öfter in großen Silotanks für einige Stunden bis Tage gelagert werden, bis ausreichend Kapazität zur Pasteurisierung sowie Weiterverarbeitung vorliegt. Dabei ist es nicht ausreichend die Milch bei einer Temperatur von 4 °C zu lagern, sondern es wird eine Erhitzung zwischen 62 und 65 °C bei einer Haltedauer von bis zu 30 Sekunden notwendig. Dieser Vorgang wird als Thermisierung bezeichnet und soll das bakterielle Wachstum für eine bestimmte Zeit einschränken. Nach dem Erhitzungsvorgang wird die Milch wiederum auf 4 °C abgekühlt, um das Wachstum aerober Sporenbilder zu verhindern. Jedenfalls soll der Vorgang der Thermisierung nur eingesetzt werden, wenn keine unmittelbare Möglichkeit zur Weiterverarbeitung der Milch vorliegt. Es ist festzuhalten, dass

die Thermisierung nicht die Pasteurisierung ersetzt und die somit entstandene Milch keinesfalls für den Verkauf geeignet ist. [15, 16]

3.2.3.2 Pasteurisieren

Unter dem Begriff der Pasteurisierung versteht man ein Verfahren, dessen Zweck die Abtötung pathogener Keime ist. Dabei sind grundsätzlich drei Varianten zu unterscheiden. Die Dauererhitzung, welche zumeist nur in kleineren Betrieben durchgeführt wird, sowie die für industrielle Maßstäbe genutzte Kurzzeit- und Hoherhitzung. Jede dieser Varianten ist durch eine unterschiedliche Temperatur-Zeit-Kombination gekennzeichnet.

- Dauererhitzung

Die Dauererhitzung, auch LTLT-Pasteurisierung (Low-Temperature-Long-Time) genannt, ist von allen Pasteurisierungsvarianten jene, die bei der geringsten Temperatur durchgeführt wird. Zur Abtötung der pathogenen Keime ist hierbei eine Erhitzung auf 62-65°C sowie eine Heißhaldedauer von 30-32 Minuten notwendig. Aufgrund des verhältnismäßig hohen Zeitaufwands erfährt dieses Verfahren nur in Kleinstbetrieben Anwendung.

- Kurzzeiterhitzung

Die Kurzzeiterhitzung, auch HTST-Pasteurisierung (High-Temperature-Short-Time) genannt, wird vorwiegend in großen Molkereien eingesetzt. Dabei findet eine Erhitzung auf 72 bis 75°C statt mit einer Heißhaldedauer von 15 bis 30 Sekunden. Bei dieser Temperatur-Zeit-Kombination wird das Enzym Phosphatase zerstört. Dieses dient bei einem negativ ausfallenden Phosphatase-Test als Nachweis für eine korrekt erfolgte Milcherhitzung. Die Kurzzeiterhitzung wird in der Regel zur Herstellung von Frischmilch mit einer Haltbarkeit von 7 bis 10 Tagen, sofern gekühlt, verwendet.

- Hoherhitzung

Im Gegensatz zu den ersten beiden Pasteurisierungsverfahren der Dauererhitzung und der Kurzzeiterhitzung erfolgt die Hoherhitzung bei einer deutlich höheren Temperatur von 85 bis 127 °C und einer Einwirkzeit von 8 bis 15 Sekunden. Dies führt dazu, dass neben dem Phosphatase-Test auch der Peroxidase-Test negativ ausfällt. Das bedeutet, dass neben den pathogenen Keimen auch Milchsäurebakterien abgetötet werden und somit eine noch höhere Haltbarkeit der Milch erreicht wird.

Bei der Hoherhitzung wird zwischen direkter und indirekter Erhitzung unterschieden. Während die indirekte Erhitzung mittels Platten- oder Röhrenerhitzer erfolgt, wird bei der direkten Erhitzung Wärme durch direkten Kontakt vom heißen Dampf auf die Milch übertragen.

Dabei existieren zwei unterschiedliche Varianten: Bei der Dampfinkjektion erfolgt die Erhitzung der Milch durch Einspritzung heißen Dampfes in die schon vorerwärmte Milch, während bei der Dampfinfusion die Rollen getauscht werden und vorgewärmte Milch in einen Dampfbehälter zur Erhitzung gespritzt wird. Beide Möglichkeiten haben gemeinsam, dass nach sehr schneller Erhitzung eine abrupte Abkühlung in einem Vakuumbehälter stattfindet, wodurch das durch den Dampf in die Milch eingebrachte Wasser wieder entfernt werden kann.

Die direkten Verfahren der Hoherhitzung sind somit etwas aufwendiger, zugleich aber auch schonender für die Milch. Generell findet die Hoherhitzung Einsatz bei der Herstellung von ESL-Milch (extended shelf life), welche eine Mindesthaltbarkeit von über 3 Wochen besitzt. [14, 15, 17, 18]

3.2.3.3 Homogenisieren

Im Zuge der Milchverarbeitung steht als Folgeschritt der Pasteurisierung die Homogenisierung an. Durch den Prozessschritt des Homogenisierens soll ein unerwünschtes Aufrahmen der Milch, also das Aufsteigen des Milchlippes an die Milchoberfläche verhindert werden.

Dies wird durch einen Hochdruckhomogenisator erreicht, bei dem die zwischen 2 und 5 μm großen Fettkügelchen der Milch bei einem Druck von 100 bis 250 bar und einer Geschwindigkeit von 155 bis 300 Metern pro Sekunde durch kleine Öffnungen gepresst werden. Durch die dadurch hervorgerufenen Turbulenzen und Scherkräfte werden die Fettkügelchen auf einen Durchmesser von $< 1 \mu\text{m}$ zerkleinert, wodurch sich die Anzahl der Fettkügelchen ungefähr vertausendfacht und eine Oberflächenvergrößerung um den Faktor 10 stattfindet. Dies resultiert in einer fast vollständigen Aufhebung der gegensätzlich wirkenden Auftriebskraft und Schwerkraft der nun kleineren Fettkügelchen.

Der Homogenisierungsschritt im Zuge der Milchverarbeitung kann sowohl vor als auch nach der Wärmebehandlung stattfinden. Die dabei optimal vorherrschende Homogenisierungstemperatur soll zwischen 60 und 75 °C liegen, da sich bei dieser Temperatur eine günstige Viskosität einstellt und ein geringerer Druck benötigt wird.

Neben der Verhinderung des Aufrahmens der Milch stellen sich durch die Homogenisierung einige zusätzliche Vorteile ein. Dies wären beispielsweise ein vollmundigerer Geschmack, eine

höhere Weißfärbekraft sowie eine bessere Verdaulichkeit. Nachteilig wirkt sich aufgrund der deutlichen Oberflächenvergrößerung die größere Angriffsfläche für Mikroorganismen sowie die Herabsetzung der thermischen Proteinstabilität aus. [14, 16, 17, 19–21]

Nach dem Schritt der Homogenisierung steht für die pasteurisierte Milch nur mehr der Schritt der Verpackung an. Sollte jedoch H-Milch oder Sterilisierte Milch hergestellt werden ist noch eine Wärmebehandlung ausständig.

3.2.3.4 Sterilisation

Um sterilisierte Milch zu erhalten ist die sogenannte Sterilisation notwendig. Bei der Sterilisation wird das Ziel verfolgt alle Mikroorganismen inklusive Sporenbildner abzutöten und zudem alle sich in der Milch befindlichen Enzyme zu inaktivieren, welche die Haltbarkeit reduzieren könnten.

Im Gegensatz zu den vorherigen Wärmebehandlungen erfolgt die Sterilisation erst nach dem Abfüllen der Milch. Zuvor sind daher schon die Prozessschritte der Fettgehaltseinstellung, der Homogenisierung sowie die Pasteurisierung durchgeführt worden.

Die eigentliche Hitzebehandlung findet sohin in bereits verschlossenen, luftdichten Verpackungen statt. Üblich dabei sind Glas- und Kunststoffflaschen für Milch, aber auch Dosen für Kondensmilch.

Die Temperatur-Zeit-Kombination der Sterilisation liegt bei 107 bis 115°C und einer Heißhaldedauer für 20 bis 40 Minuten oder bei 120 bis 130°C und einer geringeren Haldedauer von 8 bis 12 Minuten. Dies erfolgt entweder chargenweise im Autoklaven oder kontinuierlich im hydrostatischen Turmsterilisator.

Dabei kann unter Umständen die sogenannte Maillard-Reaktion eintreten, eine Braunfärbungsreaktion der Milch. Hierbei tritt neben einer Farbveränderung auch eine Geschmacksveränderung ein, welche durch einen Koch- oder Karamellgeschmack beschrieben wird. Infolge der Sterilisation können zudem hitzeempfindliche Vitamine zerstört sowie die Proteinwertigkeit verringert werden.

Anwendung findet die sterilisierte Milch dennoch in oft ärmeren Gegenden, in denen eine durchgehende Kühlung der Milch nicht möglich ist. Die ungekühlte Haltbarkeit nach der Sterilisation liegt bei ungefähr einem Jahr. [14, 15, 17]

3.2.3.5 *Ultrahoherhitzen (UHT)*

Für die Herstellung von H-Milch wird der Verfahrensschritt der Ultrahoherhitzen angewandt. Die Ultrahoherhitzen auch oft mit UHT (Ultra High Temperature) abgekürzt, ist ein Wärmebehandlungsverfahren, welches auf eine noch höhere Haltbarkeit abzielt als durch die schon beschriebenen Pasteurisierungsverfahren.

In einem kontinuierlichem Erhitzungsprozess auf 135 bis 150 °C und sehr kurzer Heißhaltezeit (2 bis 4 Sekunden), werden sämtliche vermehrungsfähigen Mikroorganismen und Sporenbildner abgetötet. Dadurch kann eine Mindesthaltbarkeit von 3 Monaten erreicht werden, während zeitgleich die Inhaltsstoffe der Milch weitestgehend geschont bleiben.

Der UHT-Prozess findet in einem geschlossenen System statt, indem alle Arbeitsschritte nach der Erhitzung bis hin zur Abfüllung in aseptischer Atmosphäre stattfinden.

Die Ultrahoherhitzen kann dabei analog der Hoherhitzen mittels indirekter Erhitzung durch Wärmetauscher oder direktem Kontakt mit Wasserdampf erfolgen. [14, 15, 17, 22]

3.3 Käseherstellung

Die Käseherstellung in einer Molkerei kann wie in Abbildung 6 dargestellt in mehrere allgemeine Prozessschritte unterteilt werden, wobei sich die exakte Herstellungsvariante je Käsesorte unterscheidet. [14]

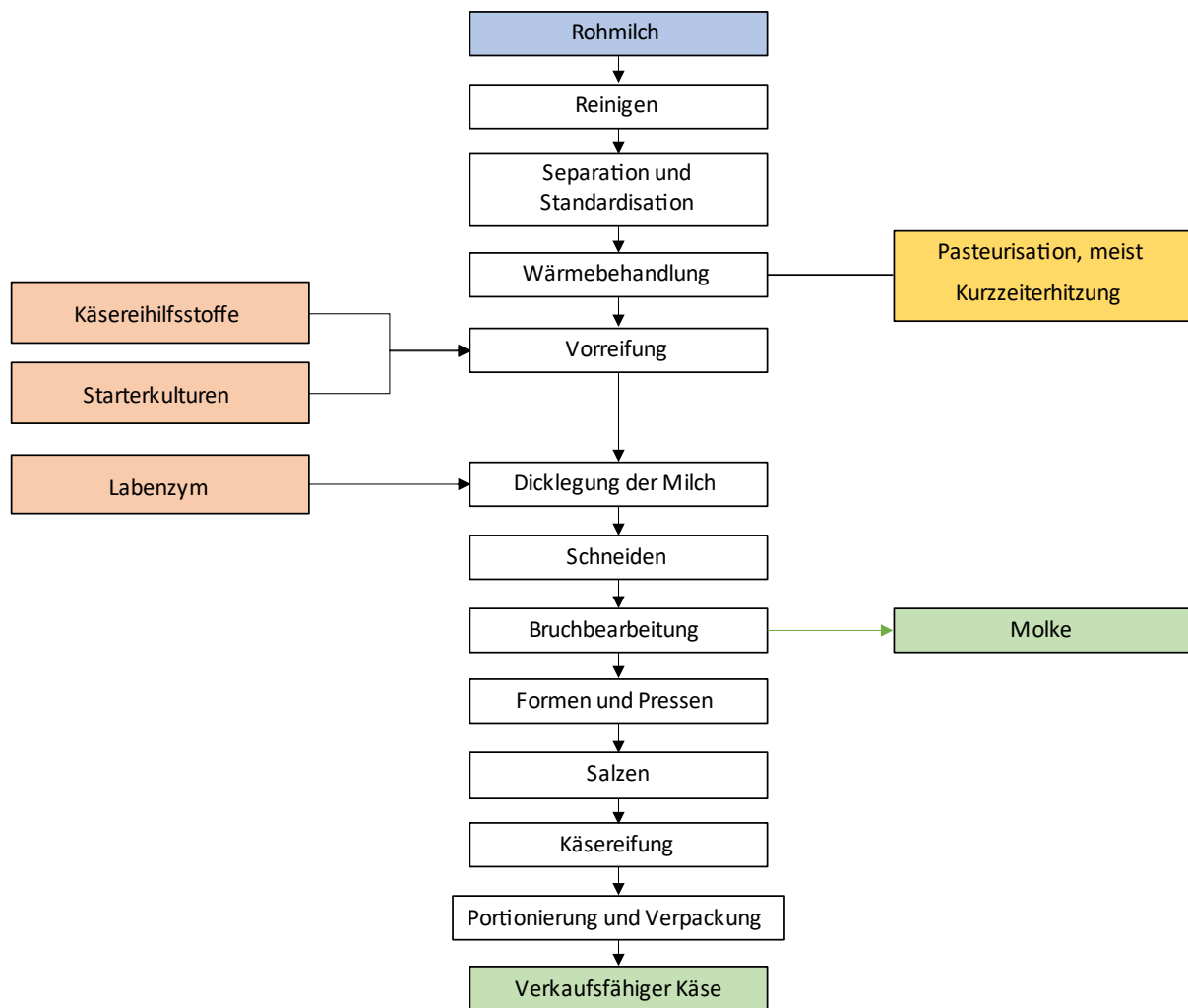


Abbildung 6: Prinzip der Käseherstellung in Anlehnung an [14]

Zu Beginn des Herstellungsprozesses durchläuft die angelieferte Rohmilch dieselben Schritte wie bei der Milchherstellung. Sie wird gereinigt, separiert und im Zuge der Standardisation wird der Fettgehalt eingestellt. In modernen Käsereibetrieben kommen im Zuge der Vorbehandlung der Milch außerdem sogenannte Bactofugen zum Einsatz, welche als Entkeimungszentrifugen der Keimreduktion dienen. [23] [24]

Im Anschluss findet mit Ausnahme der Herstellung von Rohmilchkäse die Wärmebehandlung der Milch statt. Die Pasteurisation kann dabei als Dauererhitzung, Kurzeiterhitzung oder

Hoherhitzung erfolgen. Bevorzugt wird für die Käseemilch jedoch die Kurzzeiterhitzung, da sie besonders schonend für Geschmack und Inhaltsstoffe der Milch ist. Dies ist wichtig, damit für die Käseherstellung entscheidende Eigenschaften der Milch wie Gerinnungs-, Dickungs- und Entmolkungseigenschaften nicht beeinträchtigt werden. [23]

Nach erfolgter Wärmebehandlung der Milch findet in den meisten Fällen unter Zugabe von 0,1 % Starterkulturen eine Vorreifung der Käseemilch bei 12 °C statt. Dabei erfolgt mittels der zugesetzten Mikroorganismen ein Abbau von Laktose zu Milchsäure, die in weitere Folge zu einer pH-Wert-Absenkung führt. Dies hat positiven Einfluss auf die käseereitauglichen Eigenschaften der Milch. [14] Zeitgleich können zudem noch Käseerhilfsstoffe wie Calciumchlorid, Natriumnitrat, Lysozym oder Käsefarbe zugegeben werden.

Calciumchlorid wird zugesetzt, um die Labgerinnung zu gewährleisten, wenn zu wenig Calcium in der Rohmilch vorhanden ist. Natriumnitrat und Lysozym wird verwendet, um eine Fehlgärung (Spätblähung) zu verhindern und die Käsefarbe dient optischen Zwecken. [23] [24]

Als nächster Prozessschritt findet die sogenannte Dicklegung der Milch statt. Dabei wird der Milch bei Einlab-Temperatur von 30 – 34 °C Lab zugesetzt, welches zur Gerinnung (Koagulation) des Milcheiweißes Kasein führen soll. [24] [25] Nachdem das Lab zugeführt wurde, wird die Milch für eine optimale Verteilung für ungefähr 5 Minuten gerührt. Danach muss die Milch innerhalb von 5 bis 8 Minuten zum Stillstand kommen, damit die Koagulation nicht beeinträchtigt wird. [15] Diese beginnt in Abhängigkeit der Labkonzentration und der gewählten Temperatur nach ungefähr 10 bis 20 Minuten nach Zugabe des Labs und benötigt zwischen 10 und 40 Minuten. Das dabei ausfallende Produkt wird Gallerte genannt. [14]

Diese wird im Folgeschritt des Schneidens mittels einer sogenannten Käseharve in Abhängigkeit des gewünschten Käsetyps in Körner mit 3 bis 15 Millimeter Korngröße zerkleinert. Dabei gilt, je kleiner der Durchmesser des entstehenden Bruchkorns, desto geringer der Wassergehalt des entstehenden Käses. Oder anders formuliert, je kleiner das Bruchkorn, desto höher ist der Molkeaustritt. [14] [15] [25] Dieser Prozess wird auch als Synärese bezeichnet. Sobald ein Teil der ausgetretenen Molke entfernt wurde, wird dem verbleibenden Gemisch, bestehend aus Bruchkorn und Molke Wasser zugegeben. Das führt dazu, dass durch das Auswaschen von Salz und Laktose der Käse später milder wird. Das dabei zugeführte Waschwasser wird bei vielen Käsesorten mit 35 – 45 °C temperiert. Bei Hartkäse wird es sogar auf bis zu 55 °C erhitzt, wodurch die Nachwärmung des Bruchkorns hierbei auch als „Brennen“ bezeichnet wird. In Kombination mit einem schonenden, aber beständigem Rühren führt dies zu einem erhöhten Molkeaustritt. [15] [24] [23]

Im Anschluss daran wird das Gemisch aus Molke und Bruchkorn in Formen oder Wannen überführt. Durch deren Perforierung kann weitere Molke abfließen. Das Bruchkorn wird

währenddessen mehrmals gewendet und in dem zwei- bis vierstündigen Vorgang zusätzlich bei einem Druck von zwei bis fünf bar gepresst. Damit wird der Trockenmassenanteil erhöht und sowohl die gewünschte Konsistenz als auch Form des Käselaibs erhalten. Sobald dieser Prozessschritt abgeschlossen ist, kann von Rohkäse gesprochen werden. [14] [24]

Dieser wird im nächsten Arbeitsschritt gesalzen. Dabei wird dem Käse Geschmack verliehen aber auch eine Verzögerung der Kulturenaktivität sowie ein zusätzlicher Molkeaustritt durch Osmose hervorgerufen. Die verschiedenen Arten des Salzens sind dabei das Trockensalzen und Nasssalzen mittels Salzlake. Hierbei kann noch zwischen einem Oberflächensalzbad und Tiefsalzbad unterschieden werden. [15] [23]

Nach dem Salzen wird der Käse in Reifungsräume gebracht, in denen er in Abhängigkeit der Sorte zwischen mehreren Wochen bis hin zu einigen Jahren gelagert wird. Dort herrschen sortentypische Temperaturen meist zwischen 10 und 20 Grad Celsius und eine Luftfeuchtigkeit von 80 bis 90 %. Während des Reifeprozesses findet eine Umwandlung der Inhaltsstoffe, wie Laktose, Protein und Fett statt, sodass sich die jeweils typische Konsistenz und der Geschmack der Käsesorte einstellt. [14] [24]

Der fertiggereifte Käse wird abschließend durch entsprechende Portionierung und Verpackung verkaufsfähig gemacht. [23]

3.4 Prozessdampf

Prozessdampf spielt in der österreichischen Industrie eine immense Rolle. In etwa 40 % des gesamten Brennstoffeinsatzes der Industrie wird durch Dampfsysteme hervorgerufen, welche zu rund der Hälfte mit Erdgas befeuert werden.

Dabei weisen im speziellen die Branchen Papier, Chemie, Textil, Holz, Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren sowie Nahrungsmittel einen besonders hohen Dampfbedarf auf. In diesen Wirtschaftszweigen werden bis zu 70 % der eingesetzten Endenergie zur Bereitstellung von Prozessdampf benötigt. [26, 27] [28]

Daher sollen in weiterer Folge die Gründe erläutert werden, weshalb eine derart häufige, branchenweite Nutzung von Dampf vorliegt.

Aus rein thermodynamischer Sicht besitzt Dampf den Vorteil, dass er als Wärmeträgermedium, speziell im Vergleich zu 100-gradigen Wasser, eine wie in Abbildung 7 dargestellte hohe spezifische Enthalpie aufweist.

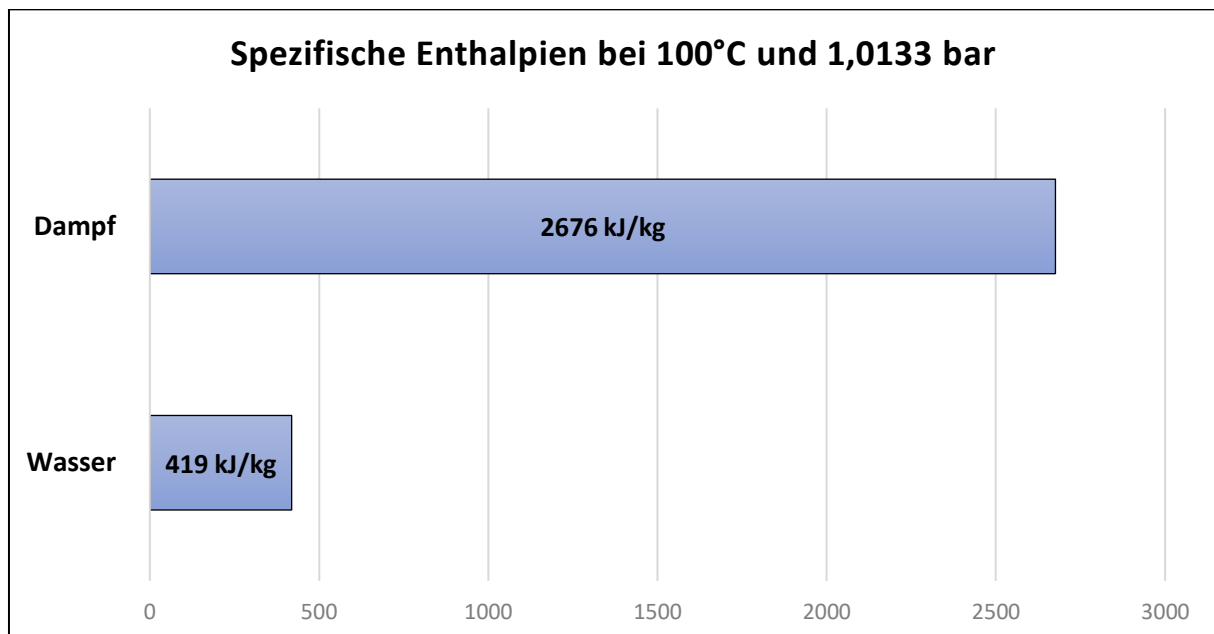


Abbildung 7: Vergleich der spezifischen Enthalpien von Dampf und Wasser [29]

Damit ist für die Übertragung derselben Wärmemenge bei Wasserdampf im Vergleich zu Wasser nur in etwa ein Sechstel der Masse notwendig. [30] Zusätzlich ist es mit Wasserdampf besonders einfach auf Prozessänderungen und damit schwankende Energiebedarfe zu

reagieren. So kann die zugeführte Energie sehr leicht geregelt werden, indem der Druck des Prozessdampfes erhöht oder gemindert wird.

Die Herstellung von Dampf findet in der Regel in einem zentralen, automatisierten Kesselhaus statt. Als Kesselbrennstoff können neben Erdgas, der üblichen fossilen Variante, auch umweltfreundliche Alternativen eingesetzt werden wie zum Beispiel brennbare Abfälle. Damit ist es im Hinblick auf eine erhöhte Versorgungssicherheit sogar möglich Reservebrennstoffe auf Lager zu halten. Zusätzlich gibt es Möglichkeiten der Dampferzeugung über den Einsatz von Biomasse-Kesseln, Solarthermie und Hochtemperaturwärmepumpen. [27, 31]

Vom Kesselhaus ausgehend kann Wasserdampf effizient und kostengünstig an den jeweiligen Einsatzort geliefert werden. Besonders vorteilhaft dabei ist, dass Dampf infolge eines Druckgefälles ohne den Einsatz von Zirkulationspumpen von selbst durch die Leitungen strömt. Aufgrund des hohen Wärmegehalts von Wasserdampf können diese Leitungen zusätzlich mit geringeren Durchmessern als bei anderen Wärmeübertragungsmedien ausgeführt werden. Weiters bietet sich durch die exzellenten Wärmeübertragungseigenschaften von Prozessdampf der Vorteil, dass die benötigten Wärmeübertragungsflächen kleiner gestaltet werden können und somit die gesamte Anlage kompakter wird. [28, 32]

Neben den schon genannten Vorteilen gibt es noch eine Fülle von Gründen, wieso sich viele Firmen für den Einsatz von Dampfsystemen entscheiden. Dazu zählen einerseits die geringen Investitions- und Betriebskosten der Dampferzeugung sowie Dampfverteilung und andererseits die ansprechende Betriebsweise moderner Dampfsysteme. Diese sind nämlich automatisch überwachbar, wodurch auftretende Leckagen und Störungen sofort lokalisiert werden können. Die Wartung sowie gegebenenfalls notwendige Reparaturen sind in der Regel rasch durchgeführt, da die relevanten Bereiche des Dampfsystems leicht abzuschalten und zu entwässern sind. Dies führt neben einer hohen Anlagenlebensdauer zu geringen Stillstandszeiten, wodurch sich die gesamte Prozesseffizienz erhöhen lässt.

In einem immer stärker umkämpften Markt können sich diese Aspekte, welche sich schlussendlich in niedrigeren Produktionskosten niederschlagen, als strategische Vorteile erweisen und somit die angestrebte Position im Wettbewerbsumfeld sichern. [28]

3.4.1 Anwendungen in einer Brauerei und Molkerei

In etwa Dreiviertel der benötigten Gesamtenergie einer Brauerei ist auf den Bedarf von Wärmeenergie zurückzuführen. Davon entfällt der größte Anteil auf das Sudhaus, wo für das Aufheizen der Maische, das Aufheizen der Würze und das Kochen der Würze Prozesswärme

mittels Wärmetauscher zugeführt werden. Als dafür eingesetztes Wärmeträgermedium kann entweder Hochdruck-Heißwasser oder Prozessdampf verwendet werden. [33] Ebenso wird Dampf bei der CIP-Reinigung (Cleaning in Place) im Sudhaus, zur Gebäudeheizung sowie zur Bereitstellung von Warmwasser genutzt. [4] [34]

Ähnlich der Brauerei, wird auch in einer Molkerei viel Wärmeenergie in Form von Prozesswärme benötigt. Speziell beim Pasteurisieren, der Sterilisation, beim UHT-Prozess und bei der Reinigung wird Dampf verwendet. In den meisten der beschriebenen Anwendungsgebiete dient Wasserdampf als Wärmeträgermedium für die indirekte Erhitzung mittels Wärmeübertrager. Beim UHT-Prozess kann Dampf jedoch auch in direkten Kontakt mit dem Produkt durch Dampfinjektion oder Infusion geraten. Hier kommt der Vorteil von Prozessdampf zu tragen, dass dieser steril und unschädlich für den Menschen ist und dementsprechend oft in der Lebensmittelindustrie eingesetzt wird. [15] [28] [35]

3.5 Rauchgaskondensation

Unter Rauchgaskondensation versteht man den Vorgang der Abkühlung des Rauchgases einer Feuerungsanlage bis zur Unterschreitung seines Taupunkts. Sobald dieser unterschritten wird, beginnt Wasserdampf und andere kondensierbare Bestandteile auszukondensieren. Es ist allerdings nicht so, dass der gesamte Wasserdampf auf einmal auskondensiert, sondern immer nur so viel, bis der Sättigungsdampfdruck von Wasser bei der vorherrschenden Temperatur erreicht wird.

Die dabei entstehende Menge an Kondensat hängt von mehreren Faktoren ab. Einerseits vom Wassergehalt des verwendeten Brennstoffs, also der Brennstofffeuchte, der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffs, respektive dem Wasserstoffanteil und andererseits dem angewandten Verbrennungsluftverhältnisses und dem somit hervorgerufenen Wassereintrag durch die Verbrennungsluft.

Das Verbrennungsluftverhältnis λ , auch Luftüberschusszahl genannt, setzt in Gleichung (3-1) die zur Verfügung stehende Luftmasse m_{Luft} mit der stöchiometrischen Luftmasse $m_{\text{Luft,stö}}$, welche für eine vollständige Verbrennung notwendig ist, ins Verhältnis. [36] [37]

$$\lambda = \frac{m_{\text{Luft}}}{m_{\text{Luft,stö}}} \quad (3-1)$$

Für $\lambda = 1$ bedeutet das, dass genau diejenige Menge an Sauerstoff in der zugeführten Luft vorhanden ist, sodass theoretisch alle Brennstoffmoleküle mit Luftsauerstoff reagieren können.

Für $\lambda < 1$ findet eine unvollständige Verbrennung statt, da nicht genügend Sauerstoff zur Reaktion für jedes Brennstoffmolekül zur Verfügung steht.

$\lambda > 1$ bezeichnet es einen Luftüberschuss. Dies liegt in der Regel bei feuerungstechnischen Anlagen vor, da so auch bei nicht optimalen Verhältnissen eine vollständige Verbrennung erreicht werden kann. Je besser die Durchmischung von Brennstoff und Luft erfolgt, desto geringer kann λ gewählt werden.

Optimale Verbrennungsluftverhältnisse in Großfeuerungsanlagen werden für:

- Ölfeuerungen bei $\lambda = 1,05 - 1,10$
- Gasfeuerungen bei $\lambda = 1,02 - 1,10$

erreicht. [37]

Das Verbrennungsluftverhältnis $\lambda = 1,10$ würde hier bedeuten, dass bei der Verbrennungsreaktion insgesamt 10 % mehr Luft zur Verfügung steht, als für eine stöchiometrische Reaktion erforderlich wäre.

In der Praxis sind im Zuge der Rauchgaskondensation einige Aspekte zu beachten. Sobald die Feuerungsanlage mit einem schwefelhaltigen Brennstoff betrieben und das entstehende Rauchgas in weiterer Folge immer weiter abgekühlt wird, wird vor dem Wasserdampftaupunkt der Säuretaupunkt bei 120 - 150 °C unterschritten. Das hat zur Folge, dass das im Abgas befindlichen SO_3 mit dem auskondensierenden Wasser Schwefelsäure bildet, welche stark korrosiv wirkt. Daher sollte die Rauchgaskondensation nur bei Verwendung korrosionsbeständiger Materialien oder schwefelfreier Brennstoffe wie Erdgas durchgeführt werden, um Materialschäden in der Anlage zu verhindern. [36] [37]

Der Zweck einer Rauchgaskondensation liegt darin, dass durch die deutlich stärkere Abkühlung des Rauchgases zum einen zusätzliche sensible (fühlbare) Wärme rückgewonnen und zum anderen die größtmäßig viel bedeutendere latente Wärme der Phasenumwandlung genutzt werden kann. Die latente Wärme, respektive die Kondensationsenthalpie des Wasserdampfs, liegt bei ungefähr 2260 kJ/kg bei Normaldruck. [38] [39]

Die schlussendlich rückgewinnbare Wärme hängt von der minimalen Abkühltemperatur des Rauchgases ab. Für Erdgasanlagen fallen dabei theoretisch pro Kubikmeter Erdgas rund 1,63 kg Kondensat an, welche bei vollständiger Ausnutzung zu einem „Wirkungsgradgewinn“ von 11 % führen würden. [40]

In Abbildung 8 ist dazu der Zusammenhang zwischen dem Grad der Kondensation und der jeweiligen Abgastemperatur in Abhängigkeit des Verbrennungsluftverhältnisses dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass nur bei entsprechend niedriger Abgastemperatur, das heißt deutlicher Unterschreitung des Taupunktes, der Großteil des Wasserdampfs kondensiert.

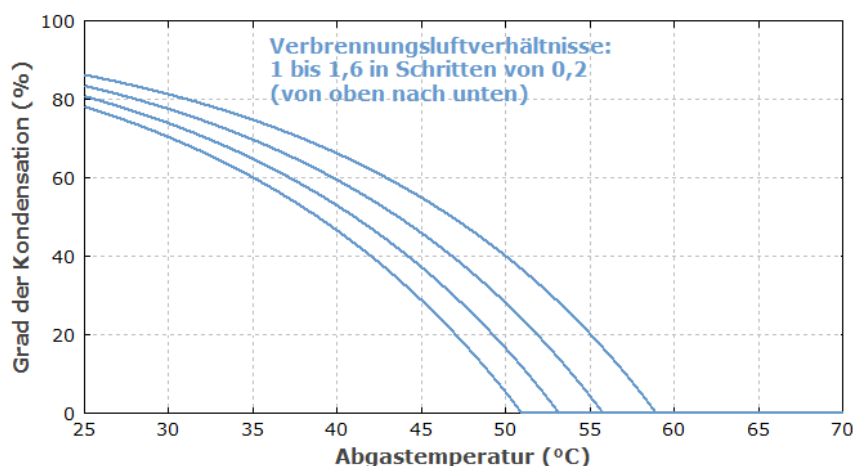


Abbildung 8: Grad der Kondensation in Abhängigkeit der Abgastemperatur und des Verbrennungsluftverhältnisses [41]

Zusammenfassend wird bei der Rauchgaskondensation das zu kondensierende Rauchgas über einen Abgaswärmetauscher geleitet und dabei unter die Taupunkttemperatur abgekühlt. Die infolge freiwerdende Kondensationsenthalpie wird dabei auf das Wärmeübertragermedium übertragen.

Dies führt dazu, dass der Brennstoffausnutzungsgrad wesentlich erhöht wird, da einerseits durch die verstärkte Abkühlung des Rauchgases zusätzliche sensible Wärme frei wird und zum anderen die im Verhältnis bedeutend höhere latente Wärme der Phasenumwandlung zurückgewonnen wird.

Aus Energiemanagementsicht führt die Rauchgaskondensation zu einer Steigerung der Energieeffizienz und einer damit einhergehenden Verringerung des Brennstoffeinsatzes. Der geringere Brennstoffeinsatz verringert zudem den CO₂-Ausstoß und erhöht gleichzeitig die Versorgungssicherheit, da eine geringere Brennstoffabhängigkeit resultiert.

3.6 Abwärmepotenziale

3.6.1 Was ist Abwärme?

So vielfältig Abwärmequellen in der Industrie auftreten so vielfältig sind auch ihre Definitionen in der Literatur. Es gibt schlichtweg keine allgemein gültige Begriffsbestimmung, die für alle nachschlagbar und anwendbar wäre. [42]

In der Erneuerbare-Energien-Richtlinie ¹ wird Abwärme beispielsweise als „unvermeidbare Wärme oder Kälte, die als Nebenprodukt in einer Industrieanlage, in einer Stromerzeugungsanlage oder im tertiären Sektor anfällt und die ungenutzt in Luft oder Wasser abgeleitet werden würde, wo kein Zugang zu einem Fernwärmesystem oder einem Fernkältesystem besteht, in dem ein Kraft-Wärme-Kopplungsprozess genutzt wird, genutzt werden wird oder in dem Kraft-Wärme-Kopplung nicht möglich ist“ definiert.

In [43] hingegen findet sich folgende allgemeinere Definition: „Abwärme umfasst alle ein System verlassenden fühlbaren und latenten Wärmeströme mit Ausnahme der das System verlassenden Zielenergie.“

Ähnlich wird auch in [44] Abwärme als „die eine Anlage verlassende Wärme, ausgenommen die Wärme, deren Erzeugung der Zweckbestimmung der Anlage entspricht“ definiert.

Folgerichtig finden sich in den bisher durchgeführten Abwärmepotenzialstudien aufgrund der uneinheitlichen Begriffsdefinition auch abweichende Berechnungsschemata.

3.6.2 Klassifizierung von Abwärme

Bei den in der Literaturrecherche gefundenen Studien zur Erhebung von Abwärmepotenzialen, wird einerseits der Potenzialbegriff und andererseits die Abwärme selbst auf verschiedene Art und Weise klassifiziert.

- Potentialdefinition: Bei der Abwärmepotenzialbestimmung wird vielfach auf das Konzept zurückgegriffen, dass man zwischen einem theoretischen, einem technischen und einem wirtschaftlichen oder realisierbaren Potenzial unterscheiden kann.

¹ § 5 Abs 1 Z 1 Bundesgesetz über den Ausbau von Energie aus erneuerbaren Quellen (Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz – EAG) BGBl. I Nr. 150/2021 idF 233/2022

Das theoretische Potenzial wird dabei ausschließlich durch physikalische Aspekte begrenzt. So findet hier nur jene Wärme Berücksichtigung, welche an einen festen, flüssigen oder gasförmigen Wärmeträger gebunden ist und dazu eine gewählte Referenztemperatur (oft 0 °C) überschreitet.

Im Gegensatz zur gefassten Wärme ist im theoretischen Potenzial sohin keine diffuse Wärme inbegriffen, welche vorwiegend durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung abgegeben wird. [45]

Im theoretischen Abwärmepotenzial werden somit die in Tabelle 3 dargestellten Wärmeträger erfasst.

Tabelle 3: Theoretisches Potenzial: Erfasste Wärmeträger nach [46]

Gasförmige Wärmeträger	Abgasströme aus Verbrennungsprozessen
	Trocknungsluft
	Kühlluft
	Hallen- und Raumluft
	Warme Luft durch Produktrestwärme
Flüssige Wärmeträger	Abwasserströme
	Kühlwasserströme
	Rückkühlströme für Klimatisierung und Kühlung
Feste Wärmeträger	Warme Produkte

Das technische Potenzial berücksichtigt ausgehend vom theoretischen Potenzial die technologische Machbarkeit der Wärmeextraktion aus den unterschiedlichen Abwärmeströmen. Diese orientiert sich am Stand der Technik und zieht Aspekte wie beispielsweise die Grädigkeit von Wärmetauschern oder die mögliche Verunreinigung von Wärmeträgermedien in Betracht.

Unberücksichtigt bleibt hingegen die Frage der Abwärmenutzung, also ob beispielsweise eine interne beziehungsweise externe betriebliche Nutzung oder eine Einspeiseoption in ein Wärmenetz besteht und falls ja, ob diese Optionen überhaupt wirtschaftlich darstellbar sind. [46] In Abbildung 9 sind die unterschiedlichen Potenzialbegriffe grafisch dargestellt.

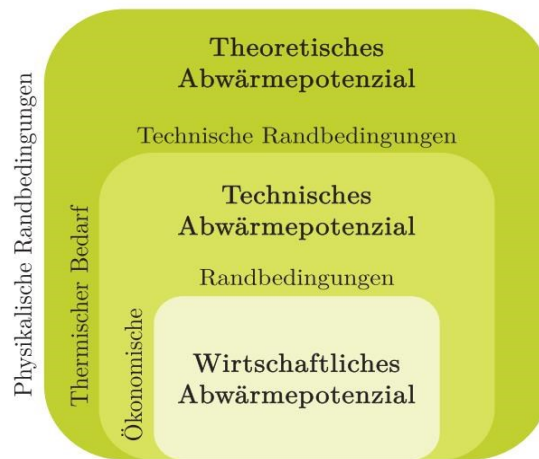


Abbildung 9: Theoretisches/Technisches/Wirtschaftliches Potenzial [47]

Neben der Potenzialdefinition werden in der Literatur verschieden Ansätze zur Klassifizierung von Abwärme vorgenommen. Abbildung 10 soll eine grobe Einteilung der dabei angewandten Ansätze zeigen. So kann Abwärme danach klassifiziert werden, in welcher Branche beziehungsweise Industriesektor sie anfällt, bei welchen Prozessen sie auftritt, nach der zuvor eingesetzten End- oder Nutzenergieart, aus der sie schließlich entstand oder durch ihre Eigenschaften. [48]

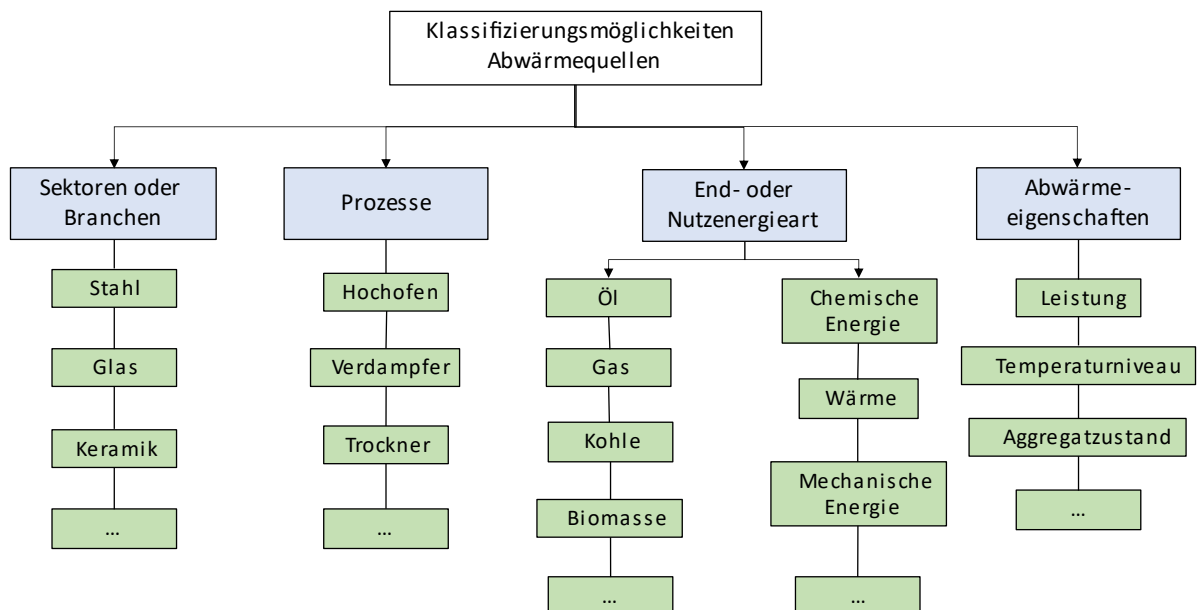


Abbildung 10: Klassifizierung von Abwärmequellen in Anlehnung an [48]

Es ist darauf hinzuweisen, dass speziell die Klassifizierung nach Abwärmeeigenschaften von Bedeutung ist. Vielfach ist es nämlich von hohem Interesse, ob Abwärmequellen in einem gewissen Leistungsbereich, zu einer bestimmten Zeit oder gewissen Temperaturniveau vorliegen.

Klassifizierung nach Abwärmeeigenschaften

- Nach Temperaturniveau: Wie in Abbildung 10 ersichtlich, wird Abwärme in viele unterschiedliche Kategorien unterteilt. Dabei ist die Klassifizierung nach der Temperatur für die Abwärmenutzung von besonderer Bedeutung. Auffallend dabei ist erneut, dass in den durchgeführten Abwärmepotenzialstudien keine einheitliche Unterteilung hinsichtlich der Temperaturniveaus getroffen werden.

So wird beispielsweise in [49] eine Unterteilung in einen Hochtemperaturbereich $> 350\text{ °C}$, in einen mittleren Temperaturbereich zwischen $> 80 - 350\text{ °C}$ und einen Niedertemperaturbereich unter 80 °C vorgeschlagen.

In einer norwegischen Abwärmepotenzialstudie [44] hingegen wird eine komplett andere Einteilung vorgenommen. Hier wird unterschieden zwischen Abwärmern die bei einer Temperatur $> 140\text{ °C}$, zwischen $60 - 140\text{ °C}$, $40 - 60\text{ °C}$ und $25 - 40\text{ °C}$ vorliegen.

In [46] wird ähnlich zur norwegischen Studie eine relativ enge Einteilung im Niedertemperaturbereich vorgenommen. Hintergrund dafür ist, dass von einer immer größer werdenden Relevanz der Niedertemperaturquellen ausgegangen wird. Diese sollen durch Investitionen in Angerienetze in Verbindung mit dem Einsatz von Wärmepumpen zu einer besseren Nutzung herangeführt werden. So wird in [46] die Unterteilung in Abwärmern $< 50\text{ °C}$ für die Nutzung in Niedertemperaturwärmenetzen, zwischen 50 und 100 °C für moderne Fernwärmenetze mit verringerter Vorlauftemperatur und $> 100\text{ °C}$ für die Versorgung klassischer Fernwärmenetze getroffen.

- Nach zeitlicher Verfügbarkeit: Bei der Betrachtung der Abwärmepotenziale hinsichtlich realisierbarer Nutzungsmöglichkeiten, ist die zeitliche Verfügbarkeit ein entscheidender Faktor. Es lässt sich feststellen, dass industriell anfallende Abwärme zumeist ein Nebenprodukt eines vielfach in seiner Betriebsweise schwankenden Prozesses ist. Demnach ist es schwierig ganzjährig kontinuierliche Abwärmeströme auszumachen. Vielmehr sind Abwärmeströme durch betriebsabhängige Schwankungen, welche mitunter saisonal aber auch über den Tag oder gewisse

Wochen verteilt auftreten gekennzeichnet. Dazu kommt, dass industrielle Abwärmequellen, welche aus mitunter sehr individuell gestalteten Produktionsprozessen stammen, sich in der Regel nicht am Bedarf nachgeschalteter Abwärmesenken orientieren. Dementsprechend führt das zeitlich schwer anpassbare Anfallen der Abwärme zu großen technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen. Im Optimalfall würde nämlich das Angebot an Abwärme zeitlich mit einem Wärmebedarf stattfinden. Die damit einhergehende, prozessinterne Nutzung wird dann oftmals als Wärmerückgewinnung deklariert. In anderen Fällen kann zur zeitlichen Überbrückung zwischen Wärmeangebot und -nachfrage ein Wärmespeicher eingesetzt werden. [47]

Jedenfalls lässt es sich kaum vermeiden, aufgrund der schweren Vergleichbarkeit bezüglich der zeitlichen Verfügbarkeit von industriellen Abwärmeströmen, die unternehmensspezifischen Prozesse mittels entsprechender Messvorrichtungen exakt zu durchleuchten, um schließlich die Abwärmepotenziale bestmöglich nutzen zu können. [49]

- Nach der Zusammensetzung: Eine andere nicht zu vernachlässigende Eigenschaft von Abwärmeströmen ist deren Zusammensetzung. Die unterschiedlichen Wärmeträgermedien können mitunter durch Staub- und Rußpartikel oder Öl verunreinigt sein, wodurch sich aufgrund von entstehenden Abscheidungen an den Wärmeübertragerflächen der Wärmeübergang verschlechtert. Noch gravierender kann die Beladung mit korrosiven Bestandteilen, beispielsweise in einem Abgasstrom sein. Wenn an den Wärmeübertragerflächen oder anderen Anlagenteilen der Taupunkt der korrosiven Substanzen unterschritten wird, können ernsthafte Materialschäden auftreten. Dieser Problematik kann nach Möglichkeit beispielsweise bei der Brennstoffwahl in Verbrennungsanlagen entgegengewirkt werden, wenn aufgrund des Schwefelgehalts anstelle von Kohle oder Öl auf Erdgas gesetzt wird. [47]

3.6.3 Abwärmequellen

Die Quellen industrieller Abwärmern sind sehr vielfältig, da diese als Nebenprodukt mit unterschiedlichen Eigenschaften in jedem industriellen Prozess auftreten. [47] Von besonderem Interesse ist dabei die energieintensive Industrie, da hier aufgrund des hohen Energie- und Wärmebedarfs verhältnismäßig größere Abwärmemengen zu erwarten sind.

Aus Energieeffizienz­sicht wird zwar versucht Abwärmern möglichst zu vermeiden, doch ihr Auftreten lässt sich nicht vollständig verhindern. [50]

Die freiwerdende und möglichst einer weiteren Nutzung zuführende Abwärmemenge Q kann durch

$$Q = m \times c_p \times \Delta T \quad (3-2)$$

berechnet werden, wobei m die Masse des Wärmeträgermediums, c_p die spezifische Wärmekapazität des Mediums und ΔT die Temperaturdifferenz zwischen dem Abwärmestrom und der Referenztemperatur ist. [44]

Abwärmeequellen lassen sich verschiedenartig wie in Abbildung 10 aus Abschnitt 3.6.2 kategorisieren. Im Folgenden soll ein Überblick gegeben werden über die häufig in der Literatur angewandte Klassifizierung von Abwärmeequellen nach Prozessanlagen.

Verbrennungsanlagen

Als Abwärmeequelle weisen Verbrennungsanlagen vielfach Abwärmeströme auf hohem Temperaturniveau auf. Die Spannweite liegt dabei üblicherweise zwischen 150 und 1300 °C. Die heißen Abgase stammen dabei von Querschnittstechnologien wie Heißwasserkesseln, Abgasreinigungsanlagen wie die thermische Nachverbrennung (TNV), Schmelz- und Brennöfen oder Dampferzeugern. Die Abwärmeeextraktion erfolgt dabei mittels Wärmetauscher direkt aus dem Abgasrohr und kann somit leicht auf verschiedene Abwärmesenken übertragen werden.

Trocknungsanlagen

Trocknungsprozesse sind in der Industrie weit verbreitet. Sie spielen aufgrund der großen benötigten Energiemengen in der Chemie-, Papier- oder Lebensmittelindustrie beispielsweise zur Trocknung von Milchpulver oder Lösungsmitteln eine große Rolle. Das jeweilige Temperaturniveau der anfallenden Abwärmeströme hängt dabei stark von den durchgeführten Prozessen ab. So liegt die Abwärme einerseits im Trocknungsabgas und andererseits im Brüden- oder Schwadendampf (> 60 °C) vor und kann durch Wärmetauscher ausgekoppelt werden. Dabei besteht auch die Möglichkeit der Rückgewinnung von Kondensationswärme.

Raumlufttechnische Anlagen

Raumlufttechnische Anlagen werden eingesetzt, um durch Heiz- und Kühlvorgänge sowie durch das Befeuchten und Entfeuchten der Luft ein angenehmes Raumklima zu schaffen. Durch diesen Vorgang soll zudem gewährleistet werden, dass die Qualität der Produkte sowie die Funktion der Anlagen über die Raumluft nicht beeinträchtigt werden. Dabei ist es möglich, dass unter Verwendung von Wärmetauschern die 20 bis 40 °C warme Raumluft zur Vorwärmung von Frischluft eingesetzt werden kann und somit zwischen 35 und 90 % der Abluftwärme genutzt werden kann.

Druckluftanlagen

Druckluft findet in der Industrie sektorenübergreifend als Energiequelle für Werkzeuge, Maschinen aber auch beispielsweise für Trocknungs- und Reinigungsprozesse Anwendung. Dabei sollte die Verwendung von Druckluft aus Energieeffizienzsicht, aufgrund des sehr niedrigen primärenergetischen Wirkungsgrades von 4 – 7 % möglichst vermieden werden. Nach der Verdichtung durch einen Druckluftkompressor, stehen bis zu 90 % der eingesetzten Anschlussleistung als Abwärme auf einem Temperaturniveau von 40 – 90 °C zur Verfügung.

Kälteanlagen

Die Abwärme, welche bei Kälteanlagen beispielsweise für die Maschinen- und Werkzeugkühlung benötigt wird, liegt im Niedertemperaturbereich vor. Bei der Verwendung von Kühlwasser befindet sich das Temperaturniveau meist zwischen 40 und 90 °C. Zusätzlich kann die Abluft von luftgekühlten Kälteanlagen für weitere Verwendungen in Betracht gezogen werden. Ihr Temperaturniveau variiert dabei zwischen 25 und 100 °C.

Abwasseranlagen

In vielen Branchen der Industrie fällt Abwärme in Form von Abwasser an. Dieses stammt vorwiegend aus Wasch- und Reinigungsvorgängen, kann aber auch von Kühlwasserströmen stammen. Das Temperaturniveau ist in den meisten Fällen nur sehr gering. Es kann jedoch zur Vorwärmung von Frischwasser eingesetzt werden. [42] [37] [51]

3.6.4 Abwärmenutzung

Bevor an die Nutzung von Abwärme gedacht wird, sollten aus Energiemanagementsicht zuerst alle Möglichkeiten ausgereizt werden, die das Auftreten von Abwärme entweder vermindern bestenfalls sogar verhindern. Dazu wird in einem ersten Schritt probiert den entsprechenden Prozess energetisch zu optimieren. Dies kann beispielsweise durch die Umstellung auf ein energieeffizienteres Produktionsverfahren, durch eine verbesserte Regelung und Steuerung des Prozesses oder ganz simpel durch eine Wärmedämmung erfolgen.

Sobald diese Optionen ausgeschöpft sind und der Prozess optimiert ist, sollte überprüft werden, ob die verwendeten Anlagen energieeffizient sind. Dadurch könnten noch Potenziale von vermeidbarer Abwärme aufgedeckt und eine maximale Energieeffizienz erreicht werden.

Erst jetzt sollte die Planung zur Nutzung der derart nicht vermeidbaren Abwärme erfolgen.

Vorrangig empfiehlt sich dabei, die Abwärme möglichst an ihrem Entstehungsort im Sinne einer Wärmerückgewinnung zu nutzen. Bestenfalls gelingt es die Abwärme über einen Wärmeübertrager sofort auf ein Wärmeträgermedium zu übertragen, welches die Wärme demselben Prozess bereitstellen kann. Eine in diesem Sinne vielfach genutzte Möglichkeit ist die Verbrennungsluftvorwärmung. [50] Sowie diese Möglichkeit erschöpft ist, kann die Nutzung der Abwärme außerhalb der Prozessanlage in Betracht gezogen werden. Hier bietet sich in vielen Fällen eine weitere innerbetriebliche Nutzung an. [47][44]

Gängige Abwärmesenken für die indirekte innerbetriebliche Abwärmenutzung sind Anlagen zur Prozessdampf- oder Warmwassererzeugung, für Trockenvorgänge oder zur Bereitstellung von Prozesswärme. Sollte das Temperaturniveau des Abwärmestroms für die Wärmesenke nicht ausreichend sein, kann die Temperatur mittels Wärmepumpe erhöht werden.

An letzte Stelle der Abwärmenutzung stehen externe außerbetrieblich Anwendungen. Hierbei bietet sich als Nutzungsmöglichkeit hauptsächlich die Einspeisung in ein Nah- oder Fernwärmenetz ein, es kann aber auch die Versorgung eines benachbarten Betriebes erfolgen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass in der Regel zusätzliche Infrastruktur für den Transport der Wärme notwendig ist, was sich schließlich in den höheren Kosten dieser Form der Abwärmenutzung widerspiegelt. [50][51]

Für eine sinnvolle Nutzung von industrieller Abwärme sind als Zusammenfassung dieses Kapitels mehrere Aspekte zu beachten. Der erste Punkt ist die Forderung das Auftreten von Abwärme so gut als möglich zu vermeiden. Für die nicht vermeidbare Abwärme hingegen gilt der Grundsatz, sie möglichst nahe an ihrem Entstehungsort zu nutzen. Das heißt, im Optimalfall einer direkten Nutzung sie im Sinne einer Wärmerückgewinnung dem

ursprünglichen Prozess zuzuführen. Anschließend können weitere innerbetriebliche und zuletzt externe außerbetriebliche Anwendungen in Betracht gezogen werden.

In Anlehnung an [50] [51] [44] [42] werden nachfolgend einige Eigenschaften industrieller Abwärmen aufgelistet, deren Berücksichtigung im Zuge einer erfolgreichen Abwärmennutzung von Bedeutung sind :

- Temperaturniveau
- Zusammensetzung des Abwärmestroms
- Bindung an einen fassbaren Massenstrom
- Verfügbare Energiemenge
- Gleichzeitigkeit von Abwärmequelle und Abwärmesenke
- Kontinuität
- Nutzungsdauer
- Räumliche Nähe

4 MODELLBESCHREIBUNG/METHODIK

4.1 Excel Rauchgaskondensation

Die Rückgewinnung von Abwärme erfährt in der Industrie spätestens seit den umfangreich gesetzten Klimaschutzzielen und daraus resultierenden Energiezielen besondere Bedeutung. Aus Energiemanagementsicht nach DIN EN ISO 50001 [52] gehen Energieziele immer mit der Verbesserung der energiebezogenen Leistung einher. Dieses Konzept beinhaltet die Optimierung des Energieeinsatzes, die Erhöhung der Energieeffizienz sowie die Senkung des Energieverbrauchs. Damit bieten sich für Industrieunternehmen eine Vielzahl an Möglichkeiten ihre energiebezogene Leistung zu verbessern, wobei die Steigerung der Energieeffizienz eine bevorzugte Rolle einnimmt. In diesem Sinne wird stets nach Wegen gesucht Prozesse zu optimieren und Energie einzusparen.

Einer dieser Wege besteht darin, die im Wasserdampf von Rauchgasen enthaltene Kondensationswärme zurückzugewinnen. Diese beträgt wie in Kapitel 3.5 erläutert, pro Kilogramm kondensierten Wasserdampf ungefähr 2260 kJ. [38] Dementsprechend bietet die Kondensation von Wasserdampf das Potenzial großer Energieeinsparungen. Zur überschlagsmäßigen Bestimmung dieses Potenzials ist es möglich, mittels Diagrammen wie exemplarisch in Kapitel 3.5 Abbildung 8 dargestellt, anhand der Abgastemperatur und dem verwendeten Luftverhältnis λ auf den Grad der Kondensation zu schließen. Für eine exakte Bestimmung ist dies jedoch unzureichend und führte schlussendlich zur Erstellung des hier nachfolgend vorgestellten Excel-Programms.

Dieses Programm erlaubt unter der Berücksichtigung der physikalischen Grundlagen der Wasserdampfkondensation und der relevanten Parameter den Grad der Kondensation für die Abkühlung von Rauchgasen unterschiedlicher Zusammensetzungen zu berechnen.

Hierbei gibt es in Abhängigkeit des in der Feuerungsanlage eingesetzten Brennstoffs zwei Berechnungsvarianten.

Die erste Variante ist gedacht für Brennstoffe, die wie Methan (CH_4), Propan (C_3H_8) oder Methanol (CH_3OH) als chemische Verbindung definiert sind. Durch die chemische Formel ist ihre exakte Zusammensetzung aus den unterschiedlichen Elementen eindeutig vorgegeben. Auch für Gemische wie Erdgase, die durch eine überschaubare und genau bekannte Zusammensetzung chemischer Verbindungen gekennzeichnet sind, ist diese Variante geeignet. Dabei wird das Gemisch durch die Stoffmengenanteile x_i^B der anteilmäßig vorhandenen Verbindungen im Brennstoff beschrieben. Für Erdgase wäre beispielsweise der größte Stoffmengenanteil Methan (CH_4).

Die zweite Berechnungsvariante ist geeignet für Brennstoffe wie Kohle, Öl oder Holz. Diese festen und flüssigen Brennstoffe sind typische Vertreter für eine Brennstoffgruppe, die dadurch gekennzeichnet ist, dass ihr exakte Zusammensetzung aus vielen chemischen Verbindungen nicht bekannt ist und damit die für eine Berechnung mittels der ersten Variante notwendigen Stoffmengenanteile nicht zur Verfügung stehen. Deswegen wird für diese Brennstoffe eine sogenannte Elementaranalyse durchgeführt. Dabei werden die Massenanteile der brennbaren Elemente des Brennstoffes wie Kohlenstoff C, Wasserstoff H₂ und Schwefel S, zusätzlich die Stoffe Stickstoff N₂ und Sauerstoff O₂, sowie der Wasseranteil und Ascheanteil bestimmt.

Das Ergebnis der Elementaranalyse ergibt die Massenanteile der Brennstoffbestandteile, die auch im Excel-Programm für Kohlenstoff, Wasserstoff, Schwefel, Stickstoff, Sauerstoff, Wasser und Asche mit $\gamma_C, \gamma_{H_2}, \gamma_S, \gamma_{N_2}, \gamma_{O_2}, \gamma_W, \gamma_A$ bezeichnet werden. [36] Bevor nun die Funktionsweise des Programms im Detail vorgestellt wird, werden vorab die theoretischen Grundlagen, welche aus dem Buch mit dem Titel „*Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*“ [36] stammen nachfolgend zusammengefasst.

4.1.1 Verbrennungsgleichungen

Für die vollständige Verbrennung eines Brennstoffs sind die drei nachfolgenden Verbrennungsgleichungen maßgeblich. Sie beschreiben die Oxidation der brennbaren Bestandteile des Brennstoffs zu den Reaktionsprodukten CO₂, H₂O und SO₂.



Für die erste Reaktionsgleichung (4-1) kann exemplarisch das Stoffmengenverhältnis ν in Gleichung (4-4) angeschrieben werden.

Dabei bezeichnet $n_{O_2}^C$ die Stoffmenge des Sauerstoffs, welche für die vollständige Oxidation von Kohlenstoff (deswegen das hochgestellte C) benötigt wird. Die Stoffmenge des

Kohlenstoffs wird mit n_C bezeichnet und entspricht laut Reaktionsgleichung der Stoffmenge des Sauerstoffs. Daraus ergibt sich folgendes Stoffmengenverhältnis:

$$v_{O_2}^C = \frac{n_{O_2}^C}{n_C} = 1 \quad (4-4)$$

Analog verhält es sich zu den anderen beiden Verbrennungsgleichungen:

$$v_{O_2}^{H_2} = \frac{n_{O_2}^{H_2}}{n_{H_2}} = \frac{1}{2} \quad (4-5)$$

$$v_{O_2}^S = \frac{n_{O_2}^S}{n_S} = 1 \quad (4-6)$$

Ebenso kann jeweils ein Stoffmengenverhältnis für die drei entstehenden Reaktionsprodukte CO_2 , H_2O und SO_2 angeschrieben werden:

$$v_{CO_2}^C = \frac{n_{CO_2}^C}{n_C} = 1 \quad (4-7)$$

$$v_{H_2O}^{H_2} = \frac{n_{H_2O}^{H_2}}{n_{H_2}} = 1 \quad (4-8)$$

$$v_{SO_2}^S = \frac{n_{SO_2}^S}{n_S} = 1 \quad (4-9)$$

Somit werden für jede der drei Verbrennungsgleichungen zwei Stoffmengenverhältnisse aufgestellt, in denen im Nenner jeweils die von der Brennstoffkomponente stammende Stoffmenge als Bezugsgröße (n_C, n_{H_2}, n_S) steht.

Die weiteren Berechnungen erfordern eine Umrechnung der Stoffmengenverhältnisse v in Massenverhältnisse μ . Dies erfolgt für die Sauerstoffmasse $m_{O_2}^C$, welche für die Oxidation von Kohlenstoff benötigt wird, wie folgt:

$$\mu_{O_2}^C = \frac{m_{O_2}^C}{m_C} = \frac{M_{O_2} * n_{O_2}^C}{M_C * n_C} = \frac{31.99 \text{ kg / kmol}}{12.01 \text{ kg / kmol}} * v_{O_2}^C = 2,6642 \quad (4-10)$$

Analog werden die weiteren Massenverhältnisse erhalten:

$$\mu_{O_2}^{H_2} = \frac{m_{O_2}^{H_2}}{m_{H_2}} = \frac{M_{O_2}}{M_{H_2}} * v_{O_2}^{H_2} = 7,9366 \quad (4-11)$$

$$\mu_{O_2}^S = \frac{M_{O_2}}{M_S} * v_{O_2}^S = 0,9979 \quad (4-12)$$

Dabei bedeutet $\mu_{O_2}^C = 2,6642$, dass für die stöchiometrische Oxidation von 1 kg Kohlenstoff 2,6642 kg Sauerstoff benötigt werden.

Die restlichen Massenverhältnisse der Reaktionsprodukte werden wie folgt berechnet:

$$\mu_{CO_2}^C = \frac{m_{CO_2}^C}{m_C} = \frac{m_C + m_{O_2}^C}{m_C} = 1 + \mu_{O_2}^C = 3,6642 \quad (4-13)$$

$$\mu_{H_2O}^{H_2} = \frac{m_{H_2O}^{H_2}}{m_{H_2}} = 8,9366 \quad (4-14)$$

$$\mu_{SO_2}^S = \frac{m_{SO_2}^S}{m_S} = 1,9979 \quad (4-15)$$

Mithilfe der hier hergeleiteten Stoffmengen- und Massenverhältnisse der drei Verbrennungsreaktionen ist es möglich, die Mengenerrechnungen aller Brennstoffe durchzuführen, deren Elementaranalysen oder chemische Formeln beziehungsweise deren Stoffmengenanteile in chemischen Gemischen bekannt sind.

4.1.2 Mindestluftmenge, Luftverhältnis

Für jede Verbrennungsrechnung wird jene Menge an Sauerstoff bestimmt, die gerade notwendig ist, um alle brennbaren Bestandteile des Brennstoffs vollständig zu oxidieren. Dieser stöchiometrische Sauerstoffbedarf wird, wenn er durch die Verbrennungsluft zugeführt wird, auch als die stöchiometrische Mindestluftmenge bezeichnet.

Die zugeführte feuchte Verbrennungsluft m_L^f setzt sich dabei zusammen aus trockener Luft der Masse m_L und aus Wasserdampf der Masse m_w .

$$m_L^f = m_L + m_w = m_L(1 + X) \quad (4-16)$$

Der in der feuchten Verbrennungsluft mitgeführte Wasserdampf, die sogenannte Wasserbeladung X , gibt dabei das Verhältnis von Masse Wasser zu Masse trockener Luft an.

$$X = \frac{m_W}{m_L} \quad (4-17)$$

Die trockene Luft m_L setzt sich dabei einerseits aus dem für die Oxidation des Brennstoffs notwendigen Sauerstoff und andererseits aus Stickstoff sowie den Gasen Ar, Ne und CO_2 zusammen. Diese werden der Einfachheit halber als Luftstickstoff N_2^* zusammengefasst, wodurch die trockene Luft als Zweikomponentensystem bestehend aus Sauerstoff und Luftstickstoff betrachtet werden kann.

In der Praxis wird beim Betrieb einer Feuerung, um eine vollständige Verbrennung zu gewährleisten, nicht nur die Mindestluftmenge zugeführt, sondern immer ein gewisser Luftüberschuss. Das Verhältnis zwischen der tatsächlich zugeführten Luftmenge m_L zur stöchiometrischen Mindestluftmenge m_L^{\min} wird als Luftverhältnis λ bezeichnet.

$$\lambda = \frac{m_L}{m_L^{\min}} \quad (4-18)$$

4.1.3 Verbrennungsgas

Bei der stöchiometrischen Verbrennung wird der gesamte in der stöchiometrischen Verbrennungsluft enthaltene Sauerstoff verbraucht und alle brennbaren Bestandteile des Brennstoffs zu CO_2 , H_2O und SO_2 oxidiert. Die Reaktionsprodukte in Kombination mit dem unbeteiligten Luftstickstoff N_2^* werden als stöchiometrisches Verbrennungsgas bezeichnet. Dessen Masse m_V^+ wird folgendermaßen berechnet:

$$m_V^+ = (1 - \gamma_A)m_B + m_L^{\min} \quad (4-19)$$

Hierbei steht γ_A für das Massenverhältnis der im Brennstoff enthaltenen Asche und m_B als die Brennstoffmasse.

Sobald in der Feuerungsanlage mit einem Luftverhältnis von $\lambda > 1$ verbrannt wird, enthält das entstehende Verbrennungsgas neben dem stöchiometrischen Anteil aus Gleichung (4-19) den Luftüberschuss und die Luftfeuchte. Damit kann die Masse m_V des Verbrennungsgases beschrieben werden durch:

$$m_V = m_V^+ + (\lambda - 1) m_L^{\min} + \lambda m_L^{\min} X \quad (4-20)$$

Wenn jetzt noch Gleichung (4-19) eingesetzt wird erhält man für die Masse des Verbrennungsgases:

$$m_V = (1 - \gamma_A) m_B + m_L^f \quad (4-21)$$

Einfach ausgedrückt besteht die Masse des Verbrennungsgases aus der Masse des Brennstoffs m_B abzüglich seines Ascheanteils und der Masse der zugeführten feuchten Verbrennungsluft m_L^f .

4.1.4 Berechnungen für Brennstoffe mit bekannter chemischer Verbindung

Die für diesen Abschnitt betrachteten Brennstoffe sind in der Regel ein Gemisch aus mehreren chemischen Verbindungen mit bekannten Stoffmengenanteilen x_i^B . Jede der im Brennstoff enthaltenen Verbindungen ist durch die Elemente C, H, S, N und O aufgebaut. Die chemische Formel gibt dabei die Anzahl der Atome je Element in einer Verbindung an. Somit ist es möglich jede Verbindung i des Brennstoffs über die Terme a_{C_i} , a_{H_i} , a_{N_i} , a_{S_i} und a_{O_i} zu beschreiben, wobei a den Indizes in den chemischen Formeln entspricht.

So würde Methan (CH_4) exemplarisch durch $a_{C_i} = 1$, $a_{H_i} = 4$, $a_{N_i} = 0$, $a_{S_i} = 0$, und $a_{O_i} = 0$ beschrieben werden.

Da die Verbrennungsrechnung bevorzugt mittels dimensionsloser Gleichungen durchgeführt wird, wird hier mit dimensionslosen Stoffmengenverhältnissen v gerechnet, welche auf die Stoffmenge n_B des Brennstoffs bezogen werden.

Dies erfolgt aufgrund der Tatsache, da die Zahl der Atome beziehungsweise der Moleküle in den chemischen Verbindungen proportional der Stoffmenge n ist.

So erfolgt zu Beginn der Verbrennungsrechnung die Bestimmung der Mindestluftmenge des Brennstoffs über den minimalen Sauerstoffbedarf der Verbindungen i . Bei der Zufuhr des benötigten Sauerstoffs über feuchte Verbrennungsluft wird die molare Wasserbeladung \tilde{X} in die Feuerungsanlage eingebracht. Diese wird nach Gleichung (4-22) berechnet.

$$\tilde{X} = \frac{n_W}{n_L} = \frac{M_L}{M_W} X = 1,6078 X \quad (4-22)$$

Die im Excel-Programm verwendeten dimensionslosen Arbeitsgleichungen der Verbrennungsrechnung werden nachfolgend angeführt.

Molarer Sauerstoffbedarf der Verbindung i :

$$O_{min,i} = \frac{n_{O_2,i}^{min}}{n_i} = a_{Ci} + \frac{1}{4}a_{Hi} + a_{Si} - \frac{1}{2}a_{Oi} \quad (4-23)$$

Molarer Sauerstoffbedarf des Brennstoffs:

$$O_{min} = \sum_i x_i^B O_{min,i} \quad (4-24)$$

Molare Mindestluftmenge:

$$L_{min} = \frac{O_{min}}{0,20947} \quad (4-25)$$

Molarer Luftüberschuss:

$$v_{Lü} = (\lambda - 1)L_{min} \quad (4-26)$$

Molare Luftfeuchte:

$$v_{LF} = \lambda L_{min} \tilde{X} \quad (4-27)$$

Molare Verbrennungsluftmenge:

$$v_L = L_{min} + v_{Lü} + v_{LF} = \lambda L_{min} (1 + \tilde{X}) \quad (4-28)$$

Zusammensetzung und molare Stoffmenge des stöchiometrischen Verbrennungsgases:

$$v_{CO_2}^+ = \frac{n_{CO_2}^+}{n_B} = \sum_i x_i^B a_{Ci} \quad (4-29)$$

$$v_{H_2O}^+ = \frac{1}{2} \sum_i x_i^B a_{Hi} \quad (4-30)$$

$$v_{SO_2}^+ = \sum_i x_i^B a_{Si} \quad (4-31)$$

$$v_{N_2^*}^+ = \frac{1}{2} \sum_i x_i^B a_{Ni} + 0,79053 L_{min} \quad (4-32)$$

$$v_V^+ = \sum_i x_i^B (a_{Ci} + \frac{1}{2} a_{Hi} + a_{Si} + \frac{1}{2} a_{Ni}) + 0,79053 L_{min} \quad (4-33)$$

$$x_K^+ = \frac{n_K^+}{n_V^+} = \frac{v_K^+}{v_V^+} \quad K = \{CO_2, H_2O, SO_2, N_2^*\} \quad (4-34)$$

Molare Stoffmenge und Zusammensetzung des Verbrennungsgases:

$$v_V = \frac{n_V}{n_B} = v_V^+ + v_{Lü} + v_{LF} = v_V^+ + (\lambda - 1)L_{min} + \lambda L_{min} \tilde{X} \quad (4-35)$$

$$v_{CO_2} = v_{CO_2}^+ \quad (4-36)$$

$$v_{H_2O} = v_{H_2O}^+ + \lambda L_{min} \tilde{X} \quad (4-37)$$

$$v_{SO_2} = v_{SO_2}^+ \quad (4-38)$$

$$v_{N_2^*} = v_{N_2^*}^+ + 0,79053(\lambda - 1) L_{min} \quad (4-39)$$

$$v_{O_2} = (\lambda - 1)O_{min} \quad (4-40)$$

$$x_K = \frac{n_K}{n_V} = \frac{v_K}{v_V} \quad K = \{CO_2, H_2O, SO_2, N_2^*, O_2\} \quad (4-41)$$

4.1.5 Berechnungen für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse

Die Verbrennungsrechnung für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse ($\gamma_C, \gamma_{H_2}, \gamma_S, \gamma_{N_2}, \gamma_{O_2}, \gamma_W, \gamma_A$) wird mit auf die Brennstoffmasse m_B bezogene dimensionslose Verhältnisgrößen durchgeführt.

Diese dimensionslosen Verhältnisgrößen werden auch als spezifische Massen bezeichnet und durch die Division mit der Brennstoffmasse m_B erhalten. Die spezifische Mindestluftmasse l_{min} wird exemplarisch berechnet durch:

$$l_{\min} = \frac{m_L^{\min}}{m_B} \quad (4-42)$$

Alle weiteren dimensionslosen Verhältnisgrößen, welche für die Verbrennungsrechnung notwendig sind und im Excel-Programm verwendet wurden, werden nachfolgend aufgelistet:

Spezifischer Sauerstoffbedarf:

$$o_{\min} = \frac{m_{O_2}^{\min}}{m_B} = 2,6642 \gamma_C + 7,9366 \gamma_{H_2} + 0,9979 \gamma_S - \gamma_{O_2} \quad (4-43)$$

Anmerkung: Hier gibt $m_{O_2}^{\min}$ die mindestens notwendige Masse an Sauerstoff an, welche für eine vollständige Verbrennung der Brennstoffmasse m_B benötigt wird. Der Term γ_{O_2} berücksichtigt dabei den etwaigen Sauerstoffanteil, den der Brennstoff selbst mitbringt.

Spezifische Mindestluftmasse:

$$l_{\min} = \frac{o_{\min}}{0,23141} \quad (4-44)$$

Spezifischer Luftüberschuss:

$$\mu_{Lü} = (\lambda - 1) l_{\min} \quad (4-45)$$

Spezifische Luftfeuchte:

$$\mu_{LF} = \lambda l_{\min} X \quad (4-46)$$

Spezifische Masse der feuchten Verbrennungsluft:

$$\mu_L = \lambda l_{\min} (1 + X) \quad (4-47)$$

Spezifische Masse des stöchiometrischen Verbrennungsgases:

$$\mu_V^+ = 1 - \gamma_A + l_{min} \quad (4-48)$$

Anmerkung: Das Plus-Zeichen (+) in μ_V^+ weist daraufhin, dass es sich hierbei um eine stöchiometrische Größe handelt. Diese Art der Bezeichnung wird von nun an konsistent verwendet.

Spezifische Verbrennungsgasmasse:

$$\mu_V = 1 - \gamma_A + \lambda l_{min}(1 + X) \quad (4-49)$$

Zusammensetzung des stöchiometrischen Verbrennungsgases:

$$\mu_{CO_2}^+ = 3,6642 \gamma_C \quad (4-50)$$

$$\mu_{H_2O}^+ = 8,9366 \gamma_{H_2} + \gamma_w \quad (4-51)$$

$$\mu_{SO_2}^+ = 1,9979 \gamma_s \quad (4-52)$$

$$\mu_{N_2}^+ = \gamma_{N_2} + 0,76859 l_{min} \quad (4-53)$$

$$\mu_V^+ = \sum_K \mu_K^+ \quad K = \{CO_2, H_2O, SO_2, N_2^*\} \quad (4-54)$$

$$\xi_K^+ = \frac{m_K^+}{m_V^+} = \frac{\mu_K^+}{\mu_V^+} \quad K = \{CO_2, H_2O, SO_2, N_2^*\} \quad (4-55)$$

Anmerkung: ξ_K^+ bezeichnet die stöchiometrischen Massenanteile der Komponenten

Zusammensetzung des Verbrennungsgas

$$\mu_{CO_2} = \mu_{CO_2}^+ \quad (4-56)$$

$$\mu_{H_2O} = \mu_W = \mu_{H_2O}^+ + \lambda l_{min} X \quad (4-57)$$

$$\mu_{SO_2} = \mu_{SO_2}^+ \quad (4-58)$$

$$\mu_{N_2^*} = \mu_{N_2^*}^+ + 0,76859 (\lambda - 1) l_{min} \quad (4-59)$$

$$\mu_{O_2} = 0,23141 (\lambda - 1) l_{min} = (\lambda - 1) o_{min} \quad (4-60)$$

$$\mu_V = \sum_K \mu_K \quad K = \{CO_2, H_2O, SO_2, N_2^*, O_2\} \quad (4-61)$$

$$\xi_K = \frac{\mu_K}{\mu_V} \quad K = \{CO_2, H_2O, SO_2, N_2^*, O_2\} \quad (4-62)$$

Das aus der Feuerung stammende Verbrennungsgas kann somit durch ein Gemisch aus fünf Komponenten beschrieben werden. Die fünfte Komponente des Sauerstoffs, tritt erst bei der Verbrennung mittels Luftüberschuss auf. Dabei nimmt auch die Komponente des Luftstickstoffs N_2^* zu. Ebenso steigt der Wasserdampfanteil μ_{H_2O} der über die Luftfeuchte der zugeführten Verbrennungsluft eingebracht wird.

Wie bereits in Gleichung (4-57) dargestellt, wird an manchen Stellen im Excel-Programm zur Vereinfachung der Schreibweise anstelle des Index „ H_2O “ der Index „ W “ verwendet. Dies drückt keinen Unterschied hinsichtlich der Bedeutung aus und wird nur für Terme verwendet, welche einer Wasserdampf – Größe entsprechen.

Die zentrale Gleichung des Excel-Programms berechnet anhand der bisherigen Ausführungen die spezifische Masse der kondensierten Wassermenge $\mu_W^{kond}(t_0, p, \lambda)$ des Rauchgases in Abhängigkeit der vorherrschenden Umgebungstemperatur t_0 , des vorherrschenden Luftdrucks p und des Luftverhältnisses λ .

$$\mu_W^{kond}(t_0, p, \lambda) = \mu_W - \mu_W^S = \mu_W - \frac{\mu_V^{tr} R_V^{tr}}{R_W} \frac{p_W^S(t_0)}{p - p_W^S(t_0)} \quad (4-63)$$

Hierbei bezeichnet μ_W^S die spezifische Masse des Wasserdampfs im gesättigten Verbrennungsgas.

Der Term μ_V^{tr} steht für die spezifische Masse des trockenen Verbrennungsgases und wird durch

$$\mu_V^{tr} = \frac{m_V^{tr}}{m_B} = \mu_V - \mu_{H_2O} = \mu_V^+ - \mu_{H_2O}^+ + (\lambda - 1)l_{min} \quad (4-64)$$

berechnet.

Dessen Gaskonstante wird mit R_V^{tr} bezeichnet wobei der Term $\mu_V^{tr} R_V^{tr}$ durch

$$\mu_V^{tr} R_V^{tr} = \mu_{CO_2} R_{CO_2} + \mu_{SO_2} R_{SO_2} + \mu_{N_2^*} R_{N_2^*} + \mu_{O_2} R_{O_2} \quad (4-65)$$

ermittelt wird.

In Gleichung (4-63) wird weiters R_W als die Gaskonstante von Wasserdampf bezeichnet und $p_W^s(t_0)$ steht für den Sättigungsdampfdruck bei Umgebungstemperatur. Dieser kann durch Umformung der Gleichung:

$$\ln \frac{p_W^s}{p_{tr}} = 17,2799 - \frac{4102,99}{(t/^\circ C) + 237,431} \quad (4-66)$$

erhalten werden (gültig für $t > 0,01^\circ C$). Dabei steht $p_{tr} = 0,611657$ kPa für den Tripelpunkt-Druck.

Wird schließlich die aus Gleichung (4-63) erhaltene spezifische auskondensierte Wassermenge $\mu_W^{kond}(t_0, p, \lambda)$ des Verbrennungsgases mit der gesamt enthaltenen spezifischen Masse an Wasserdampf μ_W ins Verhältnis gesetzt, erhält man schlussendlich den Grad der Kondensation beim jeweiligen Umgebungszustand und verwendeten Verbrennungsluftverhältnisses.

4.1.6 Anwendung des Excel-Programms

In Abhängigkeit der Brennstoffart stehen zwei Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung. Für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse ist Blatt 1 des Excel-Programms mit der Beschriftung „Elementaranalyse“ zu verwenden.

Blatt 2 mit der Bezeichnung „Chemische Zusammensetzung“ ist für all jene Brennstoffe zu verwenden, deren exakte chemische Zusammensetzung bekannt ist.

Für den ersten Fall erfolgt die Bedienung wie folgt: Die aus der Elementaranalyse erhaltenen spezifischen Massen werden in die braun hinterlegten Felder aus Abbildung 11 eingetragen.

Für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse		dimensionslose Verhältnissgrößen werden durch Division mit der Brennstoffmasse m_B gebildet		
22				
23	spezifische Masse Kohlenstoff des Brennstoffs	γ_C	0,791	kg/kg BS
24	spezifische Masse Wasserstoff des Brennstoffs	γ_{H_2}	0,044	kg/kg BS
25	spezifische Masse Schwefel des Brennstoffs	γ_S	0,008	kg/kg BS
26	spezifische Masse Stickstoff des Brennstoffs	γ_{N_2}	0,013	kg/kg BS
27	spezifische Masse Sauerstoff des Brennstoffs	γ_{O_2}	0,054	kg/kg BS
28	spezifische Masse Wasser des Brennstoffs	γ_W	0,014	kg/kg BS
29	spezifische Masse Asche des Brennstoffs	γ_A	0,077	kg/kg BS

Abbildung 11: Spezifische Massen aus Elementaranalyse eintragen (Screenshot)

Im Anschluss daran können nun einige Parameter eingegeben werden, welche die vorherrschenden Bedingungen nach der Verbrennung definieren. Diese sind ebenfalls braun hinterlegt. Dazu zählen wie in Abbildung 12 ersichtlich der Luftdruck p und die Abgastemperatur t_0 .

11	Luftdruck	p	100,000	kPa
12	Abgastemperatur	t_0	50,000	°C

Abbildung 12: Luftdruck und Abgastemperatur eintragen (Screenshot)

Ebenso kann die relative Feuchte φ der zugeführten Verbrennungsluft und das angewendete Verbrennungsluftverhältnis λ , siehe Abbildung 13, frei gewählt werden.

31	Verbrennungsluftverhältnis	λ	1,100	
32	Wasserbeladung	X	0,009	kg/kg
33	relative Feuchte	φ	0,625	

Abbildung 13: Verbrennungsluftverhältnis und relative Feuchte frei wählbar (Screenshot)

Alle weiteren in Abbildung 14 ersichtlichen und in weiß gehaltenen Felder sind für die korrekte Arbeitsweise des Programms unverändert zu lassen. Die grün hinterlegten Felder sind Ergebnisfelder (das sind alle Felder von C4 bis C10), wobei das in Gelb extra hervorgehobene Feld C6 das wichtigste Ergebnisfeld darstellt, da es den Grad der Kondensation des zuvor im Verbrennungsgas enthaltenen Wasserdampfs angibt (und damit angibt, welcher Anteil an Wasserdampf bei vorherrschender Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und Verbrennungsluftverhältnis auskondensiert).

	A	B	C	D
1	Berechnung für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse			
2				
3				
4	spezifische Masse der kondensierten Wassermenge	$\mu_w^{\text{kond}}(t_0, p, \lambda)$	0,017	kg/kg BS
5	spezifische Masse des Wasserdampfs	μ_w	0,998	kg/kg BS
6	Grad der Kondensation		1,747	%
7	spezifische Masse trockenes Verbrennungsgas	μ_{tr}^v	11,958	kg/kg BS
8	Gaskonstante trockenes Verbrennungsgas	R_v^{tr}	0,269	kJ/kg K
9		$\mu_v^{tr} * R_v^{tr}$	3,211	kJ/kg BS K
10	Sättigungspartialdruck	$p_w^s(t_0)$	12,350	kPa
11	Luftdruck	p	100,000	kPa
12	Abgastemperatur	t_0	50,000	°C
13	Tripelpunktspdruck	p_{tr}	0,612	kPa
14	Gaskonstante Wasserdampf	R_w	0,462	kJ/kg K
15	Gaskonstante trockene Luft	R_L	0,287	kJ/kg K
16	Gaskonstante Kohlendioxid	R_{CO_2}	0,189	kJ/kg K
17	Gaskonstante Schwefeldioxid	R_{SO_2}	0,130	kJ/kg K
18	Gaskonstante Stickstoff*	$R_{N_2^*}$	0,295	kJ/kg K
19	Gaskonstante Sauerstoff	R_{O_2}	0,260	kJ/kg K

Abbildung 14: Zentrale Ergebnisfelder der Rauchgaskondensation (Screenshot)

In der Tabelle „Dimensionslose Arbeitsgleichungen der Verbrennungsrechnung für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse“ ist keine Eingabe zu treffen. Dies sind alles Ergebnisfelder.

Dasselbe gilt für die beiden Tabellen mit der Betitelung:

- „Zusammensetzung des stöchiometrischen Verbrennungsgases“
- „Zusammensetzung des Verbrennungsgases“
- „Massenanteile des stöchiometrischen Verbrennungsgases“
- „Massenanteile Verbrennungsgas“

Für den zweiten Fall, dass die chemischen Verbindungen und deren Stoffmengenanteile des Brennstoffs bekannt sind, wird Blatt 2 mit der Bezeichnung „Chemische Zusammensetzung“ ausgewählt.

Hier erfolgt als erstes die Eingabe der chemischen Verbindungen samt ihrer Stoffmengenanteile in den braun hinterlegten Feldern wie in Abbildung 15 dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass das hier angegebene Berechnungsschema für Erdgas ausgelegt ist. Sofern chemische Verbindungen im zu berechnenden Brennstoff enthalten sind, die nicht in

diesem Excel-Programm aufgelistet sind, können diese durch das Hinzufügen in der Tabelle recht simpel eingepflegt werden.

Für Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung		dimensionslose Verhältnisgrößen werden durch Division mit der				
	a_{C_i}	a_{H_i}	a_{N_i}	a_{S_i}	a_{O_i}	x_i^B
23	A_i					
24	CH_4	1	4	0	0	0,896
25	C_2H_6	2	6	0	0	0,012
26	C_3H_8	3	8	0	0	0,006
27	C_4H_{10}	4	10	0	0	0
28	C_5H_{12}	5	12	0	0	0
29	N_2	0	0	2	0	0,058
30	CO_2	1	0	0	0	2,028
31						1

Abbildung 15: Eingabe der Brennstoffzusammensetzung (Screenshot)

Ansonsten erfolgt die weitere Herangehensweise analog zur ersten Berechnungsvariante in Blatt 1 „Elementaranalyse“. Es werden wiederum der Luftdruck, die Umgebungstemperatur, die relative Feuchte und das Verbrennungsluftverhältnis, wie in Abbildung 16 und Abbildung 17 gezeigt, in den braun hinterlegten Feldern eingetragen.

11	Luftdruck	p	100,000	kPa
12	Abgastemperatur	t_0	59,000	°C

Abbildung 16: Eingabemöglichkeiten für Luftdruck und Abgastemperatur (Screenshot)

32	Verbrennungsluftverhältnis	λ	1,000	
33	Wasserbeladung	X	0,002	kg/kg
34	relative Feuchte	φ	0,021	

Abbildung 17: Freie Wahl des Verbrennungsluftverhältnisses und der relativen Feuchte (Screenshot)

Die weißen Felder in Abbildung 18 sind wiederum für die korrekte Arbeitsweise des Programms unverändert zu lassen. Die grün hinterlegten Felder sind Ergebnisfelder. Analog zu Blatt 1 „Elementaranalyse“ ist das in Gelb hinterlegte Feld, welches den Grad der Kondensation angibt, das Wichtigste.

	A	B	C	D
1	Für Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung			
2				
3				
4	spezifische Masse der kondensierten Wassermenge	$\mu_w^{\text{kond}}(t_0, p, \lambda)$	0,000	kg/kg BS
5	spezifische Masse des Wasserdampfs	μ_w	1,905	kg/kg BS
6	Grad der Kondensation		0,010	%
7	spezifische Masse trockenes Verbrennungsgas	μ_{tr}^v	13,509	kg/kg BS
8	Gaskonstante trockenes Verbrennungsgas	R_v^{tr}	0,277	kJ/kg K
9		$\mu_v^{tr} * R_v^{tr}$	3,735	kJ/kg BS K
10	Sättigungsdampfdruck	$p_w^s(t_0)$	19,049	kPa
11	Luftdruck	p	100,000	kPa
12	Abgastemperatur	t_0	59,000	°C
13	Tripelpunktspannung	p_{tr}	0,612	kPa
14	Gaskonstante Wasserdampf	R_w	0,462	kJ/kg K
15	Gaskonstante trockene Luft	R_L	0,287	kJ/kg K
16	Gaskonstante Kohlendioxid	R_{CO_2}	0,189	kJ/kg K
17	Gaskonstante Schwefeldioxid	R_{SO_2}	0,130	kJ/kg K
18	Gaskonstante Stickstoff*	$R_{N_2^*}$	0,295	kJ/kg K
19	Gaskonstante Sauerstoff	R_{O_2}	0,260	kJ/kg K

Abbildung 18: Zentrale Ergebnisfelder der Rauchgaskondensation (Screenshot)

Die grün hinterlegten Felder in Abbildung 19 sind alles ablesbare Ergebnisse.

Dimensionslose Arbeitsgleichungen der Verbrennungsrechnung für Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung					
				Molmasse [kg/mol]	
41	Molarer Sauerstoffbedarf des Brennstoffs	O_{min}	1,864	mol/mol BS	
42					
43	Molare Mindestluftmenge	L_{min}	8,899	mol/mol BS	0,02896
44					
45	Molarer Luftüberschuss	$v_{Lü}$	0,000	mol/mol BS	
46					
47	Molare Luftfeuchte	v_{LF}	0,036	mol/mol BS	
48					
49	Molare Verbrennungsluftmenge	v_L	8,934	mol/mol BS	

Abbildung 19: Ergebnisfelder in Grün (Screenshot)

Dasselbe gilt für die Tabellen mit der Betitelung:

- „Zusammensetzung und molare Stoffmenge des stöchiometrischen Verbrennungsgases“
- „Molare Stoffmenge und Zusammensetzung des Verbrennungsgases“
- „Molanteile des stöchiometrischen Verbrennungsgases“
- „Molanteile des Verbrennungsgases,,

4.2 PV-GIS

PV-GIS (Photovoltaic Geographical Information System) ist ein kostenfreies Tool, welches von dem gemeinsamen Forschungszentrum der Europäischen Kommission für Energieeffizienz und Erneuerbare Energien bereitgestellt wird. [53] PV-GIS bietet die Möglichkeit über die solare Einstrahlung, sowie hinterlegte Wetterdaten, die Photovoltaik Leistung an jedem beliebigen Standort in Europa und Afrika sowie großen Teilen Amerikas und Asiens zu berechnen.

Dabei stehen vielfältige Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung, welche in weiterer Folge erklärt werden. Zum besseren Verständnis ist in Abbildung 20 der grundsätzliche Aufbau der Webanwendung von PV-GIS dargestellt. Die Bedienung des Tools kann in den Sprachen, Englisch, Deutsch, Französisch, Spanisch und Italienisch erfolgen.

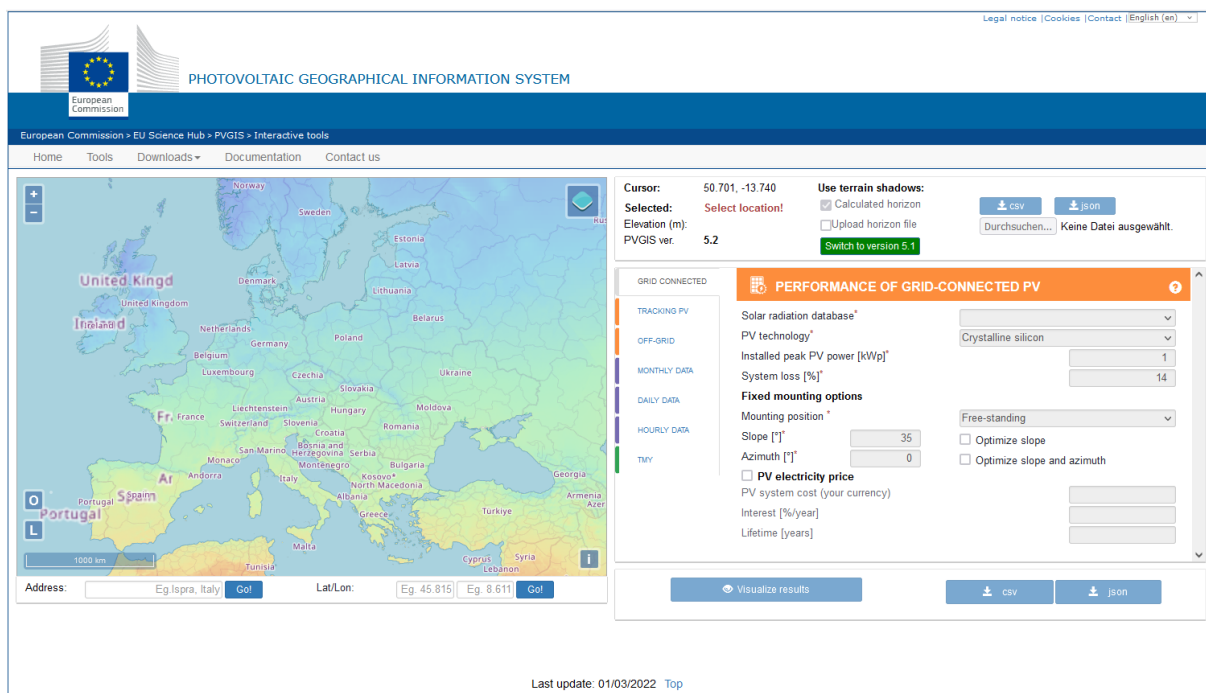


Abbildung 20: Erstansicht von PV-GIS bevor etwas eingegeben wurde [53]

4.2.1 Standortauswahl

Die Anwendung von PV-GIS startet mit der Auswahl des Standortes, für welchen die nachfolgenden Berechnungen durchgeführt werden sollen. Dies funktioniert entweder über eine direkte Adresseneingabe, eine Koordinateneingabe oder durch das Hineinzoomen in die linkerhand dargestellte Karte. [54]

4.2.2 Horizontinformationen

Als nächster Schritt kann vom Benutzer entweder eine sogenannte Horizontdatei hochgeladen, oder die in PV-GIS integrierten Horizontinformationen verwendet werden. Dadurch können in die Berechnung der PV-Leistung mögliche Verschattungen von Bergen und Hügeln auf die PV-Anlage miteinbezogen werden. Die integrierten Horizontinformationen hat allerdings nur eine Auflösung von rund 90 Metern, wodurch nahe, schattenwerfende Objekte wie Gebäude und Bäume nicht erfasst werden. [54]

4.2.3 Auswahl der Solarstrahlungsdatenbank

In diesem Punkt muss abhängig von der Lage des Standorts eine Strahlungsdatenbank ausgewählt werden. Für Europa ist dabei die Datenbank **PVGIS-SARAH2** wie in Abbildung 21 ersichtlich zu wählen.

Alle Strahlungsdatenbanken in PVGIS liefern stündliche Sonnenstrahlungsschätzungen.

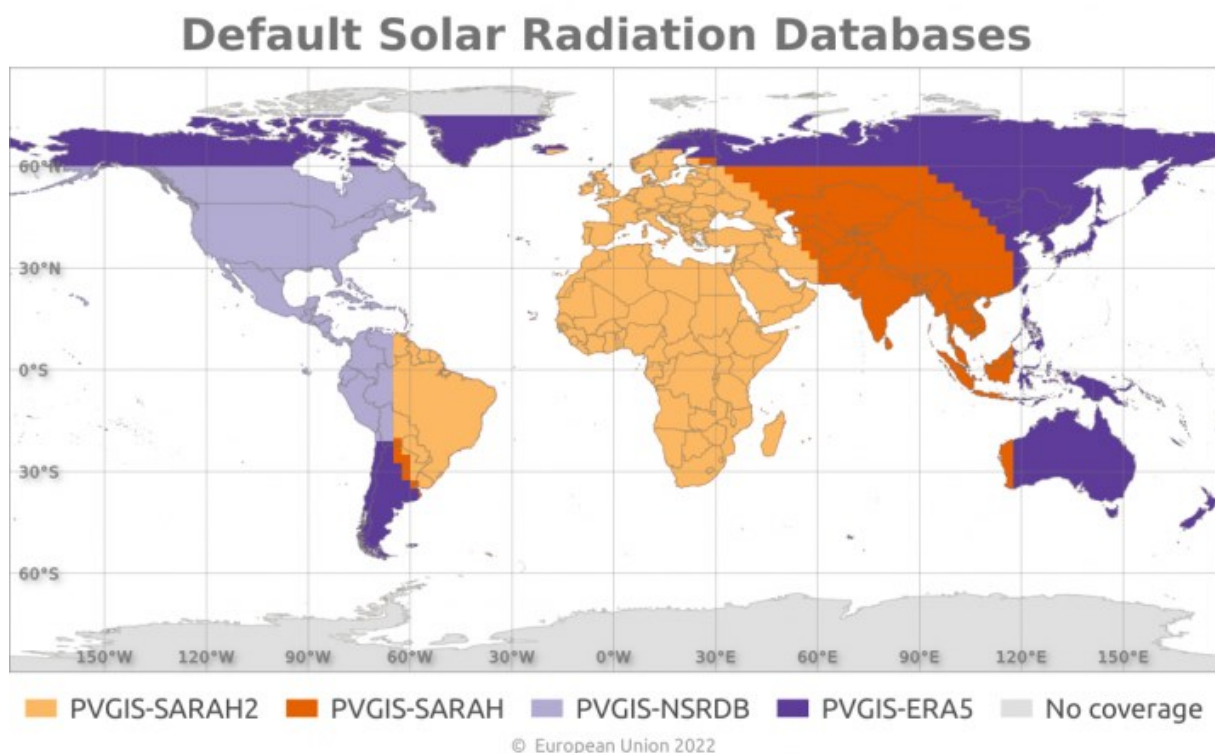


Abbildung 21: Auswahlmöglichkeiten der Solarstrahlungsdatenbank [54]

Nach erfolgter Eingabe der Solarstrahlungsdatenbank stehen in Abhängigkeit der angedachten PV-Anlage mehrere verschiedene Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung.

1. Der erste „Tab“ ist für Netzgekoppelte Anlagen, welche keinen Batteriespeicher verfügen

2. der zweite „Tab“ ist für PV-Anlagen mit Nachführsystem, welche damit dem Lauf der Sonne folgen
3. der dritte „Tab“ ist für PV-Anlagen, welche nicht ans Stromnetz angeschlossen sind und mit Batteriespeicher verbunden sind [54]

4.2.4 Netzgekoppelte PV-Anlagen

Im ersten „Tab“ für netzgekoppelte Anlagen ist es notwendig die nachfolgend beschriebenen Inputs für die Berechnung einzugeben.

- PV-Technologie: Die verschiedenen PV-Technologien weisen eine unterschiedliche Abhängigkeit von der vorherrschenden Temperatur und Sonneneinstrahlung auf. Daher erfolgt durch die Eingabe des PV-Typs (kristalline Siliziumzellen, Dünnschichtmodule bestehend aus CIS (Kupfer, Indium, Selen) oder CIGS (Kupfer, Indium, Gallium, Selen) und Dünnschichtmodule aus Cadmiumtellurid (CdTe) eine Abschätzung der durch Temperatur- und Bestrahlungseffekte hervorgerufenen Verluste. Bei der Auswahl „nicht bekannt“ wird von einem temperaturabhängigen Verlust der PV-Leistung von 8% ausgegangen.
- Installierte maximale PV-Leistung [kWp]: Hier ist die Leistung des PV-Moduls laut Herstellerangaben unter Standard-Testbedingungen (STC = konstante 1000 W Sonneneinstrahlung pro Quadratmeter in Modulebene bei einer Modultemperatur von 25°C) einzugeben.
- Systemverlust: Hier werden die geschätzten Verluste, welche durch Kabel, Wechselrichter, Schmutz, Schnee und Degradation des PV-Systems hervorgerufen werden eingegeben. Vorgeschlagen wird ein Wert von 14 %, wobei für besonders hochwertige Systeme auch ein niedrigerer Wert eingegeben werden kann.
- Montageposition: In PV-GIS gibt es zwei Möglichkeiten für feststehende Systeme zum Auswählen. Entweder „freistehend“ für Module, welche auf einem Gestell mit möglicher Luftzirkulation montiert sind oder „Auf Dach/Gebäudeintegriert“ wo die Module vollständig in die Struktur der Wand oder das Gebäudedach eingebaut sind und keine Luftbewegung hinter den Modulen stattfindet.
- Neigung [°]: Hier wird der Winkel der PV-Module aus horizontaler Ebene bei fester Montage eingegeben. Dies ist für Anwendungen gedacht, bei denen die Module direkt in das Dach eingebaut werden sollen und somit der Neigungs- und Azimutwinkel baulich vorgegeben ist.
- Azimut [°]: Der Azimut ist der Winkel der PV-Module relativ zur Richtung Süden. -90° entspricht Osten, 0° ist Süden und 90° ist Westen.

- Neigung/Azimut optimieren: Es gibt auch die Möglichkeit sich von PV-GIS die optimalen Werte für die Neigung oder Neigung und Azimut für den jeweiligen Standort berechnen zu lassen.
- PV-Strompreis: Wenn dieses Feld angehakt wird, werden auf Basis der anschließend eingegebenen Werte die Kosten des durch die PV-Anlage produzierte Stroms berechnet. Dazu müssen die Gesamtkosten der PV-Anlage für Kauf und Montage, der angenommene Zinssatz und die erwartete Lebensdauer der PV-Anlage eingetragen werden. Die Berechnung basiert dann auf einer „Levelised Cost of Energy“-Methode“. Bei dieser Berechnung werden pro Jahr 2 % der ursprünglichen Gesamtkosten des Systems für die Wartung veranschlagt. [54]

Ergebnisse der Berechnung

Sofern alle oben genannten Punkte korrekt eingetragen wurden, kann durch Betätigung des Buttons „Ergebnisse anzeigen“ die Berechnung durchgeführt und die in Abbildung 22 dargestellt die Ergebnisse erhalten werden.

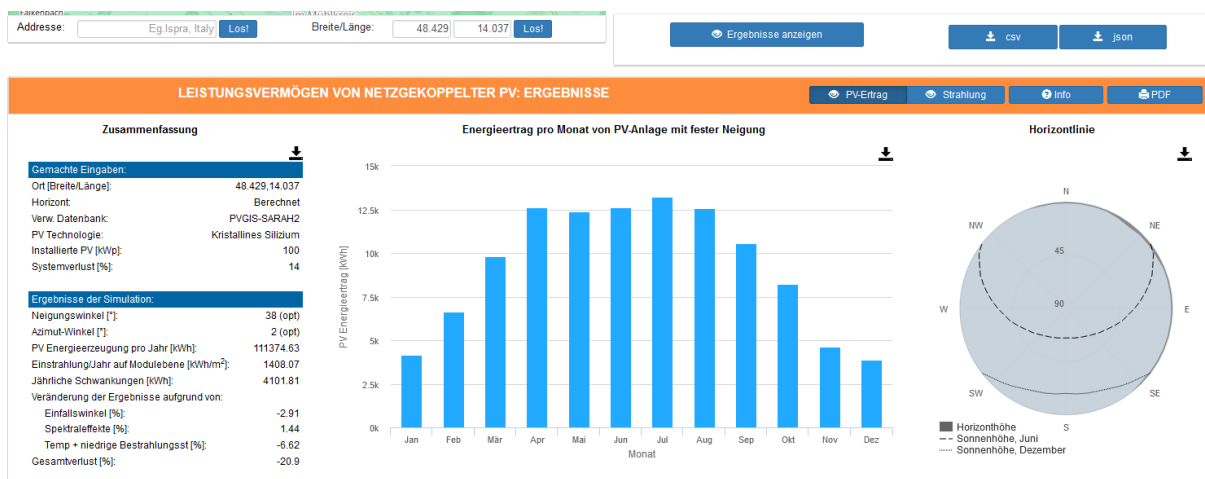


Abbildung 22: Ergebnisüberblick in PV-GIS [53]

Die Ergebnisse der Berechnung bestehen sowohl aus jährlichen Durchschnittswerten als auch den in den Diagrammen ersichtlichen monatlichen Werten. Berechnet werden unter anderem:

- PV-Energieerzeugung pro Jahr [kWh]
- Einstrahlung/Jahr auf Modulebene [kWh/m²]
- Jährliche Schwankungen [kWh]

- Verschiedene Verluste in der PV-Leistung, die durch unterschiedliche Effekte verursacht werden
- Monatlicher PV-Energieertrag [kWh]
- Monatliche Einstrahlung auf die Modulebene [kWh/m²]

PV-GIS führt alle Berechnungen Stunde für Stunde über die gesamte Zeitreihe der verwendeten Sonnenstrahlungsdaten durch. Bei Verwendung von PVGIS-SARAH2, werden die Berechnungen aus den Wetterdaten von 15 vorliegenden Jahren aggregiert. Dabei wird die PV-Leistung für jede Stunde aus der empfangenen Strahlungsstärke in der Modulebene geschätzt. [54]

Die somit generierten Ergebnisse können sowohl in der Web-Anwendung ausgegeben oder in einem PDF-Dokument heruntergeladen werden.

4.2.5 Nachgeführte PV-Anlagen

Im zweiten „Tab“ erfolgt die Bedienung sehr ähnlich zu den oben beschriebenen netzgekoppelten Anlagen. Der einzige Unterschied ist, dass es hinsichtlich der Montagemöglichkeiten für nachgeführten Anlagen mehrere Varianten zum Auswählen gibt.

Dabei kann manuell die Neigung für die „vertikale Achse“ oder die „geneigte Achse“ angegeben werden beziehungsweise von PV-GIS optimiert werden. Die letzte Auswahlmöglichkeit steht für „Zwei-achsig“ nachgeführte Anlagen zur Verfügung. [54]

4.2.6 Netzunabhängige PV-Anlagen

Im dritten „Tab“ ist es möglich Berechnungen für PV-Anlagen durchzuführen, die nicht ans Netz angeschlossen werden, sondern mit einem Batteriespeicher kombiniert werden. Dazu müssen nur einige wenige Angaben wie

- Installierte maximale PV-Leistung [Wp]
- Batteriekapazität [Wh]
- Entladungsgrenzwert [%]
- Tagesverbrauch [Wh]
- Neigung [°]
- Azimut [°]

eingegeben werden und schon kann für den ausgewählten Standort berechnet werden, wie gut der Batteriespeicher über das Jahr ausgelastet wird. [54]

4.2.7 Einstrahlungsdaten pro Monat

Im vierten „Tab“ gibt es die Möglichkeit sich für den Zeitraum zwischen 2005 und 2020 monatliche Durchschnittsdaten einerseits über die Durchschnittstemperatur aber auch für diverse Strahlungsdaten am jeweiligen Standort ausgeben zu lassen.

Die verschiedenen, möglichen Strahlungsdaten sind:

- Globale horizontale Einstrahlung
- Direkte senkechte Einstrahlung
- Globale Einstrahlung bei optimalem Winkel
- Globale Einstrahlung bei gewähltem Winkel
- Verhältnis Diffus/Global

Die Ergebnisse können einerseits in einem Diagramm graphisch dargestellt oder die tabellarischen Werte heruntergeladen werden. [54]

4.2.8 Durchschnittliche Bestrahlungsstärke pro Tag

Im fünften „Tab“ besteht die Möglichkeit sich für jedes Monat des Jahres die durchschnittliche, tägliche Bestrahlungsstärke sowie den Tagestemperaturverlauf anzeigen zu lassen. Dies kann einerseits „Auf fester Ebene“ mit gewählter Neigung und Azimut angegeben werden oder auf einer der Sonne nachgeführten Ebene. Als theoretischer Wert ist auch ein Ergebnis bei klarem Himmel verfügbar.

Die Ergebnisse können wiederum in einem Diagramm graphisch dargestellt oder als tabellarische Werte heruntergeladen werden. [54]

4.2.9 Bestrahlungsstärkedaten pro Stunde

Im sechsten „Tab“ wiederholen sich viele Eingaben aus dem ersten und zweiten „Tab“. Der Unterschied hier ist, dass dem Benutzer eine stündliche Auflösung sowohl der PV-Leistung als auch der Strahlungskomponenten ausgegeben werden können. Allerdings können aufgrund der großen Datenmenge (für bis zu 16 Jahre stündliche Einträge) diese Werte nur als csv- oder json-Datei heruntergeladen werden. [54]

4.2.10 Typisches Meteorologisches Jahr

Im siebten und letzten „Tab“ besteht die Möglichkeit sich meteorologische Daten ausgeben zu lassen. Diese stündlichen Datensätze wurden generiert, indem für die Datenbank PVGIS-SARAH2 aus den verfügbaren 16 Wetterjahren der jeweils typischste Monat ausgewählt wurde. So ist es möglich sich durchschnittliche Werte zu den folgenden Variablen ausgeben zu lassen:

- Trockentemperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit
- Globale horizontale Bestrahlungsstärke
- Direkte senkrecht einfallende Bestrahlungsstärke
- Diffuse horizontale Bestrahlungsstärke
- Nach unten gerichtete Infrarotstrahlung
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung
- Luftdruck [54]

4.3 Dachflächenbestimmung der Brauerei Hofstetten für PV

Das soeben in Kapitel 4.2 beschriebene PV-Berechnungstool PV-GIS soll in weiterer Folge dazu verwendet werden, um eine in Zukunft potenziell zu errichtende PV-Anlage auf den Dachflächen der Brauerei Hofstetten auszuwerten.

Dazu wurde aufgrund fehlender Daten als erster Schritt nach einer Möglichkeit gesucht die potenziell für eine PV-Anlage verfügbaren Dachflächen zu ermitteln. Dazu wurde in einem ersten Schritt die Brauerei Hofstetten, wie in Abbildung 23 dargestellt, mittels ihrer Anschrift über Google Maps in der Satellitenansicht gesucht.

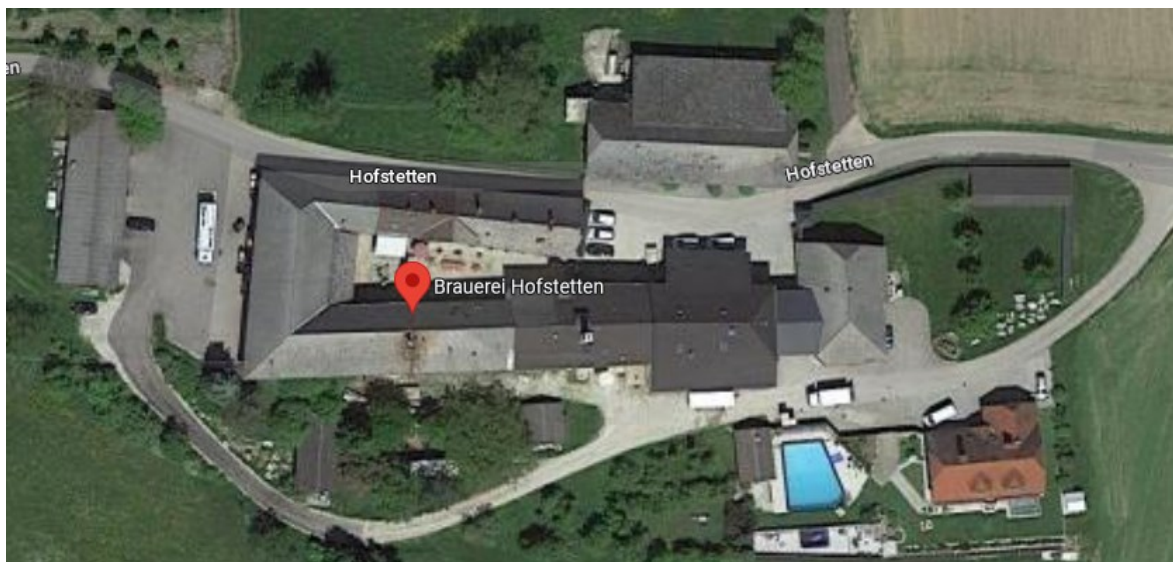


Abbildung 23: Satellitenaufnahme der Brauerei Hofstetten in Google Maps [55]

4.3.1 Nach Süden ausgerichtete Dachflächen

In einem zweiten Schritt wurden dann über den in dieser Ansicht verfügbaren Befehl „Entfernung messen“, wie in Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26 ersichtlich die südlich ausgerichteten Dachflächen A1, A2 und A3 ausgemessen.

Die damit erhaltenen Flächeninhalte sind nachfolgend aufgelistet:

$$A1 = 651,83 \text{ m}^2$$

$$A2 = 157,67 \text{ m}^2$$

$$A3 = 218,64 \text{ m}^2$$

$A_{\text{gesamt}} = A1 + A2 + A3 = 1028,14 \text{ m}^2$ Wenn man nach der Faustformel zehn Quadratmeter pro Kilowattpeak geht, dann wäre es möglich eine rund 100-kWp-PV-Anlage auf den südlichen Dachflächen der Brauerei zu errichten. [56]



Abbildung 24: Abmessung Südliche Dachfläche A1 [55]

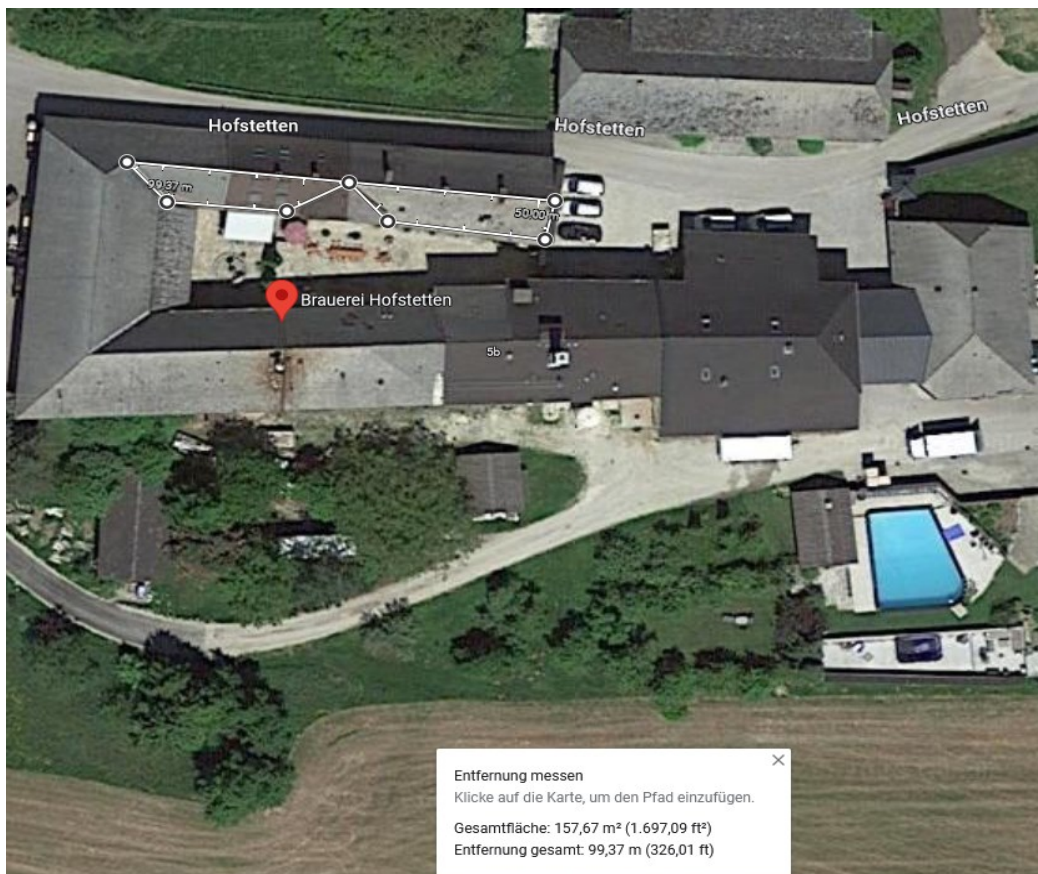


Abbildung 25: Abmessung Südliche Dachfläche A2 [55]



Abbildung 26: Abmessung Südliche Dachfläche A3 [55]

4.3.2 Nach Westen ausgerichtete Dachflächen

Dieselbe Vorgehensweise wie bei den nach Süden ausgerichteten Dachflächen wurde auch bei den nach Westen und Osten ausgerichteten Dachflächen verfolgt.

Für die westlichen Dachflächen A4 und A5 (siehe Anhang) konnten die folgenden Flächeninhalte ermittelt werden:

$$A4 = 186,94 \text{ m}^2$$

$$A5 = 98,75 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{ges}} = A4 + A5 = 285,68 \text{ m}^2$$

Bei einer Annahme von wiederum $10 \text{ m}^2/\text{kWp}$ erhält man eine potenzielle PV-Anlagegröße von 28 kWp.

4.3.3 Nach Osten ausgerichtete Dachflächen

Für die nach Osten ausgerichteten Dachflächen A6 und A7 (siehe Anhang) konnten die folgenden Flächeninhalte ermittelt werden:

$$A6 = 106,20 \text{ m}^2$$

$$A7 = 97,36 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{ges}} = 203,56 \text{ m}^2$$

Bei einer Annahme von $10 \text{ m}^2/\text{kWp}$ erhält man eine mögliche PV-Anlagengröße von 20 kWp.

4.4 Abwärmepotenziale

4.4.1 Methoden der Datenerhebung

Zur Bestimmung von Abwärmepotenzialen haben sich in den bisher durchgeführten Studien verschiedene Methoden etabliert. Die drei häufigsten Ansätze werden dabei als Top-Down-Ansatz, Bottom-Up-Ansatz und die Mischung beider als Kombiniertes Top-Down-Bottom-Up-Ansatz bezeichnet.

Welcher Ansatz für eine Studie gewählt wird, ist abhängig von den jeweiligen Rahmenbedingungen. Sofern es sich um eine sehr umfangreiche Abwärmepotenzialbestimmung handelt, die beispielsweise das Abwärmevorkommen in einem gesamten Land oder branchenübergreifend in einer Region ermitteln soll, bei der zusätzlich noch verhältnismäßig wenige Ressourcen zur Verfügung stehen, eignet sich die Top-Down-Analyse.

4.4.1.1 Top-Down-Ansatz

Die Top-Down-Analyse beschreibt den Ansatz, dass anhand von statistisch erfassten Daten zuerst Rückschlüsse auf beispielsweise den Energieverbrauch oder den Energieträgereinsatz eines Unternehmens gezogen werden. Nachfolgend werden beispielsweise über branchenspezifische Abwärmefaktoren das Abwärmepotenzial des jeweiligen Unternehmens abgeschätzt.

Für eine derartige Abwärmepotenzialbestimmung kann in Österreich auf „STATcube“, die statistische Datenbank der Statistik Austria zurückgegriffen werden. [57]

Hierbei gilt es allgemeine Daten, Ergebnisse oder Kennwerte auf einen Einzelfall anzuwenden. Diese von oben nach unten gerichtete Herangehensweise wird unter dem Top-Down-Ansatz verstanden. [48]

Über diese Methode ist es möglich, ohne sich mit den jeweiligen Betrieben näher auseinanderzusetzen, eine grobe Schätzung ihrer Energiebedarfe sowie Abwärmepotenziale zu treffen. Nicht möglich sind jedoch unternehmensspezifischen Aussagen über beispielsweise die genauen Temperaturniveaus oder die Verfügbarkeit sowie Zusammensetzung und Art der Abwärmeströme.[58] Dementsprechend lassen sich auf diese Art und Weise nur schwer Rückschlüsse auf das technische Potenzial der somit erhaltenen Abwärmemengen ziehen. [44]

4.4.1.2 Bottom-Up-Ansatz

Die zweite Methode zur Bestimmung von Abwärmepotenzialen wird als Bottom-Up-Ansatz bezeichnet. Dieser ist im Vergleich zur Top-Down-Methode deutlich aufwendiger, liefert im Gegenzug jedoch Ergebnisse mit höherer Genauigkeit. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier Kenntnisse zu den unternehmensspezifischen Produktionsabläufen und Prozesscharakteristika erlangt werden, welche sich in einer deutlich detaillierten Datenlage widerspiegeln. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, dass aufgrund des immensen Aufwandes dieses Ansatzes immer nur Teilmengen der zu bewertenden Unternehmen untersucht werden können. Es müssen jedoch, um beispielsweise das Abwärmepotenzial eines gesamten Wirtschaftszweiges zu ermitteln, immer eine repräsentative Anzahl an Unternehmen auf ihr Abwärmepotenzial hin analysiert werden, um eine aussagekräftige Hochrechnung zu erlauben. [42] [44]

In der Praxis wird bei der Bottom-Up-Methode zwischen einer veröffentlichungsbasierten Variante und einer Erhebung mittels Fragenbogen unterschieden. Letztere wird seitens der Industrie aufgrund von Problematiken hinsichtlich des Datenschutzes und der Wahrung von Betriebsgeheimnissen mit Skepsis begegnet und erschwert somit diese Art der Abwärmepotenzialerhebung. [58]

Folglich findet die veröffentlichungsbasierte Variante des Bottom-Up-Ansatzes breite Verwendung. Dabei wird versucht durch frei zugängliche Umweltberichte, aus den Umwelterklärungen von EMAS-zertifizierten Unternehmen und allen weiteren öffentlich zugänglichen Informationen die Energiebedarfe der gewünschten Betriebe zu erhalten. Diese Energiebedarfe werden weiters nach eingesetzten Energieträgern aufgeschlüsselt. Sofern die verwendeten Energieträger nicht öffentlich zugänglich sind, wird alternativ über das Emission Trading System (ETS) der Europäischen Union mittels Rückrechnung der dort angeführten CO_2 – Emissionen auf den Energiebedarf geschlossen. Dabei wird davon ausgegangen, dass es sich bei dem eingesetzten Energieträger um Erdgas handelt. Anhand dessen spezifischer CO_2 – Emissionen kann auf Basis des im ETS hinterlegten Gesamt- CO_2 -Ausstoßes des Unternehmens rückgerechnet werden.

Durch die Kenntnisse der unternehmensspezifischen Produktionsabläufe und Prozesscharakteristika, ist es möglich, anhand des Energiebedarfs das Abwärmepotenzial des jeweiligen Unternehmens zu berechnen. Dabei sind aufgrund des detaillierten Wissensstands der vorhandenen Abwärmequellen deutlich genauere Informationen über die entstehende Abwärme bekannt als beim Top-Down-Ansatz. So können beispielsweise Aussagen über die

vorliegenden Temperaturniveaus, die zeitliche Verfügbarkeit oder die Reinheit der Abwärmeströme getroffen werden. [46]

4.4.1.3 *Kombinierter Top-Down-Bottom-Up-Ansatz*

Die schon teilweise beschriebenen Vor- und Nachteile der Top-Down- und Bottom-Up-Analyse haben dazu geführt, dass in der Praxis oft eine Mischung der beiden Ansätze gewählt wird. [48] Dadurch wird erreicht, dass genauere und damit besser verwertbare Ergebnisse der Abwärmepotenzialbestimmung erzielt werden. Im kombinierten Top-Down-Bottom-Up-Ansatz fließen somit neben unternehmensspezifischen Informationen zu beispielsweise Temperaturniveaus und zeitlichen Verfügbarkeiten von Abwärmeströmen auch statistische Branchenkennzahlen und Energiebilanzen in die Abwärmepotenzialbestimmung ein. Dies führt dazu, dass die Stärken der beiden Ansätze kombiniert werden und die Nachteile, wie die unzureichende Genauigkeit oder der zu hohe Aufwand minimiert werden.

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde vorrangig auf einen Top-Down-Ansatz unter Verwendung statistischer Daten und branchenspezifischer Kennzahlen zurückgegriffen. Dieser wurde durch Bottom-Up Elemente ergänzt, um einerseits den Energiebedarf und andererseits das Abwärmepotenzial der energieintensivsten Unternehmen in 4810 Gmunden zu ermitteln.

Die genaue Vorgehensweise wird nachfolgend erläutert und ähnelt zum Teil der Herangehensweise des Planungsprozesses des PDCA-Zyklus nach DIN EN ISO 50001 [52]. In diesem werden als Eingangsparameter der energetischen Planung der bisherige Energieeinsatz und die wesentlichen Energieverbraucher, in diesem Fall die energieintensivsten Unternehmen Gmundens, verwendet. Als energetische Ausgangsbasis werden analog zur Abwärmepotenzialbestimmung verschiedene Werte wie der Gesamtenergieverbrauch, der Brennstoffeinsatz oder der elektrische Energieverbrauch benötigt. Zudem werden Energieleistungskennzahlen gebildet, anhand derer eine positive Entwicklung im Zuge des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses zu einem späteren Zeitpunkt abgelesen werden können. Dieser Fall würde bei einer späteren Nutzung der ermittelten Abwärmepotenziale auftreten.

4.4.2 Ermittlung Energiebedarf

Zur Ermittlung des Energiebedarfs wurde in einem ersten Schritt aus der zur Verfügung gestellten Herold-Datenbank [59] eine Auflistung all jener „Firmen“ in Gmunden extrahiert, die eine Mitarbeiterzahl >20 vorwiesen. Die damit erhaltenen 52 Einträge wurden zunächst grob gesichtet und all jene aus der Liste entfernt, die mit Sicherheit nicht der Industrie zuzuordnen sind. Darunter fielen Einträge wie Bildungseinrichtungen, Einrichtungen der öffentlichen Verwaltung und ähnliches.

Übrig geblieben sind schließlich die in Tabelle 4: Kategorisierung der zu untersuchenden Unternehmen dargestellten nach absteigender Mitarbeiteranzahl sortierten Unternehmen, welche den sechs nachfolgend aufgelisteten Branchen entstammen:

- Nahrungs- und Genussmittel, Tabak
- Maschinenbau
- Nicht-Eisen-Metalle
- Steine, Erden und Glas
- Fahrzeugbau
- Sonstiger produzierender Bereich

Tabelle 4: Kategorisierung der zu untersuchenden Unternehmen

Unternehmen	Zuteilung
Gmundner Molkerei eGen	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak
HIPP Produktion Gmunden GmbH	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak
IDEAL Kältetechnik GesmbH	Maschinenbau
FURAL Systeme in Metall GmbH	Nicht Eisen Metalle
Zementwerk Hatschek GmbH	Steine und Erden, Glas
Gmundner Keramik Manufaktur GmbH & Co KG	Steine und Erden, Glas
Frauscher Bootswerft GmbH & Co KG	Fahrzeugbau
RAUCH Furnace Technology GmbH	Maschinenbau
GILLES Energie- u Umwelttechnik GmbH & Co KG	Sonstiger produzierender Bereich
Robamat Automatisierungstechnik GesmbH	Maschinenbau
Sacotec Pulverbeschichtungs- GmbH	Nicht Eisen Metalle

Im nächsten Schritt wurden die aus der Herold-Datenbank [59] stammenden Daten zu den 11 vorliegenden Unternehmen, wie beispielsweise die Mitarbeiterzahl oder die Jahresumsätze mit veröffentlichungsbasierten Informationen wie Umweltberichten, Umwelterklärungen

oder den Unternehmenswebsites abgeglichen. Dabei erfolgte auch das Festhalten etwaiger Informationen zur Produktionsmenge oder den eingesetzten Energieträgern.

Anschließend galt es auf die Energiebedarfe der untersuchten Unternehmen zu schließen. Dazu wurden drei verschiedene Methoden genutzt, die nachfolgend beschrieben werden sollen.

4.4.2.1 Top-Down: STATcube

Der erste verfolgte Ansatz war die Verwendung der statistischen Daten aus STATcube, der Datenbank der Statistik Austria. Hierbei konnten in einem ersten Schritt, wie in

Tabelle 5 dargestellt, der sektorale energetische Endverbrauch an Gesamtenergie für das Bundesland Oberösterreich ausgegeben werden. Dasselbe wurde ebenso für den Einsatz elektrischer Energie und Erdgas durchgeführt. (Siehe Anhang)

Tabelle 5: Exemplarischer Auszug des sektoralen Endverbrauchs an Gesamtenergie in Oberösterreich [57]

Sektoraler Energetischer Endverbrauch Gesamtenergie in Terajoule	2021	2020	2019
Eisen- und Stahlerzeugung	18888	19131	19892
Chemie und Petrochemie	20665	19134	19659
Nicht Eisen Metalle	3 856	3 405	4 203
Steine und Erden, Glas	10 408	10 558	7 717
Fahrzeugbau	3 027	3 022	3 165
Maschinenbau	5 607	4 615	5 280
Bergbau	1 534	2 265	2 460
Nahrungs- und Genußmittel, Tabak	6 130	5 456	5 366
Papier und Druck	22751	20322	22280
Holzverarbeitung	2971	2281	2805
Bau	2961	2807	3156
Textil und Leder	327	311	354
Sonst. Produzierender Bereich	2867	2588	2721
Eisenbahn	976	967	1058
Sonstiger Landverkehr	60594	58350	66617
Transport in Rohrfernleitungen	261	841	629
Binnenschifffahrt	864	374	748
Flugverkehr	452	357	1032
Öffentliche und Private Dienstleistungen	16003	14206	16102
Private Haushalte	57758	52167	50511
Landwirtschaft	5187	4857	4892
Produzierender Bereich	101993	95894	99058
Verkehr	63147	60889	70083
Sonstige	78948	71230	71505

Die in Tabelle 5 orange hinterlegten Felder entsprechen den für die weitere Berechnung notwendigen Sektoren der zu untersuchenden Unternehmen.

Im Folgeschritt wurden aus der Arbeitsstättenstatistik in STATcube, wie in Tabelle 6 ersichtlich, die Anzahl der Beschäftigten für die entsprechenden Sektoren in Oberösterreich ausgegeben.

Tabelle 6: Anzahl der Beschäftigten je Sektor [57]

Beschäftigte	Oberösterreich	Österreich gesamt	Faktor Oberösterreich
Önace 2008 der Arbeitsstätte (Ebene +4)			
Herstellung von Waren <C>	155186	603374	0,257
H.v. Nahrungs- und Futtermitteln <C10>	15974	67138	0,238
H.v. Glas/-waren, Keramik u.Ä. <C23>	5230	32038	0,163
H.v. Metallerzeugnissen <C25>	17474	72338	0,242
H.v. elektrischen Ausrüstungen <C27>	10523	43169	0,244
Maschinenbau <C28>	23727	73547	0,323
Sonst. Fahrzeugbau <C30>	2987	5500	0,543

Mittels der nun verfügbaren Informationen zu den sektoralen energetischen Endverbräuchen an Gesamtenergie, Erdgas und elektrischer Energie, siehe Tabelle 7 , sowie der Beschäftigtenanzahl der jeweiligen Sektoren, konnten Kennzahlen der Form „Gigajoule pro Beschäftigte – [GJ/Besch]“ gebildet werden. Diese sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 7: Sektorale Energiebilanzen

2021	Nicht Eisen Metalle	Steine und Erden, Glas	Fahrzeugbau	Maschinenbau	Nahrungs- und Genußmittel, Tabak	Sonstiger produzierender Bereich
Gesamtenergiebilanz [TJ]	3856,45	10407,52	3027,32	5606,82	6130,01	2867,46
Erdgas [TJ]	2446,50	6216,99	1033,01	1348,30	3412,99	410,49
Elektrische Energie [TJ]	1363,85	1656,30	1569,52	3367,83	2182,25	1963,87
zugeordneter ÖNACE-Code	25	23	30	28	10	27

Tabelle 8: Gebildete Kennzahlen je Sektor

2021	Nicht Eisen Metalle	Steine und Erden, Glas	Fahrzeugbau	Maschinenbau	Nahrungs- und Genußmittel, Tabak	Sonstiger produzierender Bereich
Gesamtenergiebilanz [GJ/Besch]	220,70	1989,97	1013,50	236,31	383,75	272,49
Erdgas [GJ/Besch]	140,01	1188,72	345,83	56,83	213,66	39,01
Elektrische Energie [GJ/Besch]	78,05	316,69	525,45	141,94	136,61	186,63
zugeordneter ÖNACE-Code	25	23	30	28	10	27

Mittels der nun gebildeten Kennzahlen wurden für die nach Sektoren zugeordneten Unternehmen anhand der zu Beginn ermittelten Mitarbeiterzahlen der Gesamtenergiebedarf, der Erdgasbedarf und der Elektrische Energiebedarf errechnet.

4.4.2.2 Top-Down: Energieeffizienz-Benchmark Industrie

Die zweite Variante zur Berechnung der Energiebedarfe lag darin, branchenspezifische Kennzahlen zum Gesamtenergiebedarf, des Brennstoffverbrauchs und des Stromverbrauchs auf die elf zu untersuchenden Unternehmen umzulegen. Dazu wurden einige der im Buch mit dem Titel „Energieeffizienz-Benchmark Industrie, Energiekennzahlen für kleinere und mittlere Unternehmen“ [60] veröffentlichten Kennzahlen verwendet. Dabei ist zu erwähnen, dass diese Kennzahlen aus statistischen Erhebungen von über 44000 in Deutschland ansässigen Unternehmen ab einer Beschäftigtenzahl größer 20 gebildet wurden.

Aufgrund der Tatsache, dass die österreichische und deutsche Industrie auf technologischem Niveau vergleichbar sind und die zu analysierenden Unternehmen hinsichtlich der Beschäftigtenzahl der Annahmen des Buches entsprechen, schien die Wahl dieser Kennzahlen zu Vergleichszwecken als geeignet.

In Tabelle 9 sind die somit nach Wirtschaftszweigen sortierten Kennzahlen ersichtlich.

Tabelle 9: Sektorale Kennzahlen - Benchmark deutsche Industrie

	C25 Herstellung von Metallerzeug- nissen	C23 Herstellung von Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden	C30 Sonstiger Fahrzeugbau	C28 Maschinenbau	C10 Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln	C27 Herstellung von elektrischen Ausrüstungen
Gesamtenergieverbrauch pro Beschäftigten [GJ/Besch]	152,31	1434,36	97,2	73,51	333,28	91,68
Brennstoffverbrauch pro Beschäftigten [GJ/Besch]	63,67	1208,33	54,94	33,43	240,41	35,55
Stromverbrauch pro Beschäftigten [GJ/Besch]	88,71	226,21	42,29	40,11	92,95	56,17

Auf Basis dieser sektoralen, beschäftigtenbezogenen Kennzahlen konnte anhand der zuvor ermittelten Mitarbeiterzahlen auf die Energiebedarfe der Gmundner Unternehmen geschlossen werden.

4.4.2.3 *Bottom-Up*

Die zuletzt angewandte Methode fand ausschließlich zu Vergleichszwecken Anwendung. Hierbei wurden die Berechnungen aus einer schon früher am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik der Montanuniversität durchgeführten Forschungsarbeit zur Niederösterreichischen Molkerei (NÖM) verwendet. [61] Die dort ermittelten spezifischen Kennzahlen zum Gesamtenergieeinsatz, Brennstoffeinsatz und Stromeinsatz wurden auf die Gmundner Molkerei umgelegt, sodass ein Vergleich der damit erhaltenen Werte mit jenen der ersten beiden angewandten Methoden aus 4.4.2.1 und 4.4.2.2 gezogen werden konnte.

Zusätzlich wurde für das Zementwerk Hatschek ein Vergleich zu dessen berechneten Gesamtenergiebedarf gezogen. Zum einen aus den Ergebnissen aus den beiden in 4.4.2.1 und 4.4.2.2 vorgestellten Top-Down-Ansätzen und zum anderen aus dem ermittelten Gesamtenergiebedarf, stammend aus einer weiteren, ebenso am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik der Montanuniversität durchgeführten Bottom-Up-Analyse im Zuge des Projekts INXS (Industrial Excess Heat – Erhebung industrieller Abwärmepotentiale in Österreich) [62].

4.4.3 Ermittlung Abwärmepotenzial

Nachdem durch die zuvor vorgestellten Methoden der Energiebedarf der Unternehmen ermittelt wurde, musste im nächsten Schritt eine Möglichkeit gefunden werden, um daraus ein Abwärmepotenzial ableiten zu können.

Die dazu durchgeführte Literaturrecherche ergab zwei Varianten, welche nachfolgend beschrieben werden.

4.4.3.1 *Abschätzung über Prozesswärme*

Die erste Variante wurde in [63] vorgestellt und ist für eine erste rasche Abschätzung eines theoretischen Abwärmepotenzials gedacht. Hier wurde davon ausgegangen, dass es für das verarbeitende Gewerbe genüge, dessen Prozesswärmeanteil zu bestimmen und daraus mittels einer Art Wirkungsgrad den Abwärmeanteil zu berechnen. Dabei wurde sich darauf festgelegt, dass 66,8 % der eingesetzten Endenergie eines Unternehmens zur Bereitstellung von Prozesswärme verwendet wird. Davon sollen wiederum 60 % als Abwärme anfallen. Diese könne schließlich zu 90 % bei reiner Wärmenutzung weiterverwendet werden, oder zu 15 % bei nachfolgender Stromherstellung.

4.4.3.2 Abschätzung über Abwärmefaktoren

Die zweite Variante, die Anwendung in vielen verschiedenen Studien findet, leitet das Abwärmepotenzial mittels Abwärmefaktoren anhand des Gesamtenergiebedarfs eines Unternehmens ab.

Die dazu betrachteten und für die weiteren Berechnungen verwendeten Studien [42] [48] [49] [64] hatten den Vorteil, dass ihre veröffentlichten Abwärmefaktoren hinsichtlich ihrer Kategorisierung nach Wirtschaftszweigen ident beziehungsweise sehr ähnlich waren. Somit konnten sie bei der in dieser Arbeit erfolgten Abwärmepotenzialbestimmung direkt miteinander verglichen werden.

Es ist allerdings anzumerken, dass es innerhalb der Studien Unterschiede bei der Bildung der Abwärmefaktoren gab, welche in weiterer Folge erläutert werden sollen.

Datengrundlage

Der erste große Unterschied, der beim Vergleich der Studien auffällt, liegt im abweichenden Regionalbezug. Während in [48] Daten für ganz Deutschland zur Ermittlung der Abwärmefaktoren verwendet wurden, wurden in [42] nur Daten aus Baden-Württemberg (BW), in [49] Daten aus Nordrhein-Westfalen (NRW) und in [64] Daten aus Schweden verwendet.

Die Datenbeschaffung erfolgte jedoch bei den drei deutschen Studien auf dieselbe Art und Weise. Es wurden auf Basis der Emissionserhebungen nach der Bundesimmissionschutzverordnung (BImSchV) die dort erhobenen Abgasströme des verarbeitenden Gewerbes analysiert.

Die in BW und NRW analysierten Daten stammten dabei aus dem Jahr 2012, während jene für ganz Deutschland aus dem Jahr 2008 datierten.

Die schwedische Studie hingegen bezog ihre Daten von ihrer Vorgängerstudie [65] respektive bei Statistics Sweden. Das Alter der hier verwendeten Daten ist nicht genau bekannt. Sie sollen jedoch nach der Vorgängerstudie aus dem Jahr 2002 aktualisiert worden sein.

Abwärmequellen

Der zweite Unterschied bestand darin, welche Abwärmequellen in den Studien betrachtet wurden.

In allen drei deutschen Studien wurde sich ausschließlich auf die aus Abgasströmen stammende Abwärme bezogen. Andere Abwärmequellen wie Abwasser, Kühlwasser und

Strahlung wurden nicht analysiert. Dementsprechend könnte die somit ermittelte Abwärme als „industrielle Abwärme aus geführten Abgasströmen“ bezeichnet werden, wobei die nicht genutzte oder innerhalb der betriebsgrenzen verlorene Energiemenge der Abgase in den Studien außer Acht gelassen wurde. [42]

In der schwedischen Studie wurde hingegen ein anderer Ansatz verfolgt. Dort wurde alle an Flüssigkeiten und Gasen gebundene Wärme betrachtet, die in einem industriellen Prozess an die Umwelt abgegeben und nicht genutzt wurde. Abwärmern aus Elektrizität wurden dabei jedoch nicht betrachtet. Zudem erfolgte eine Einschränkung hinsichtlich der analysierten Unternehmen. Es wurden ausschließlich Unternehmen untersucht, die in Orten oder Städten mit mindestens 200 Einwohnern sowie einem maximalen Häuserabstand von 200 Meter angesiedelt waren. Zudem mussten die Unternehmen einen jährlichen Gesamtenergieverbrauch von ungefähr 3 GWh vorweisen. [65]

Art des Potenzials

In allen Studien, bis auf jener aus NRW, wurde bei der Ermittlung der Abwärmefaktoren von einem theoretischen Potenzial ausgegangen. In der aus NRW hingegen von einem technischen Abwärmepotential. Infolgedessen wurde dort bei der Temperatur jedes Abwärmestroms eine Grädigkeit von 15 K miteinbezogen. Zudem wurde eine brennstoff- beziehungsweise technologieabhängige minimale Referenztemperatur bei der Ermittlung der Abwärmemenge aus den Abwärmeströmen angewandt. Diese wurde wie folgt gewählt:

- Für Erdgas und Kohle: $T_{\min} = 60\text{ °C}$
- Für Gasturbinen, BHKWs etc.: $T_{\min} = 70\text{ °C}$
- Für Holz, Kohle und sonstiges: $T_{\min} = 100\text{ °C}$

Aufgrund dieser minimalen Referenztemperaturen wurden rund 4300 ansonst berücksichtigter Anlagen in der Berechnung nicht in Betracht gezogen. Ebenso wurde hier keine latente Wärme berücksichtigt. [49]

Die minimale Referenztemperatur der anderen beiden deutschen Studien wurde mit 35 °C gewählt. Bei der schwedischen Studie hingegen wurde diese nicht angegeben.

Gegenüberstellung der Abwärmefaktoren

In Tabelle 10 sind die aus den vier Studien gefunden Abwärmefaktoren für die sechs Wirtschaftszweige abgebildet, denen die zu untersuchenden Gmundner Unternehmen zuzuordnen sind.

Tabelle 10: Sektorale Abwärmefaktoren der vier Studien

Gegenüberstellung der Abwärmefaktoren					
WZ 2008	Sektorbezeichnung	Deutschland	BW	NRW	Schweden
10	Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln	10%	5%	9%	8,6%
23	Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden	15%	13%	10%	1,7%
25	Herstellung von Metallerzeugnissen	19%	21%	18%	11,2%
27	Herstellung von elektrischen Ausrüstungen	31%	39%	20%	x
28	Maschinenbau	16%	5%	3%	2,8%
30	Sonstiger Fahrzeugbau	38%	4%	4%	2,7%

Dabei ist gut ersichtlich, dass sich die Abwärmefaktoren aus den Studien für BW und NRW meist sehr ähnlich sind. Für die Wirtschaftszweige mit der Abkürzung 10, 23, 25, und 27 bestehen auch im Vergleich zur Gesamtdeutschen Studie nur relativ geringe Abweichungen. Weshalb allerdings für den Wirtschaftszweig Maschinenbau und Sonstiger Fahrzeugbau so große Unterschiede vorliegen können ohne Einsicht in die zugrundeliegenden Daten nicht begründet werden.

Die schwedische Studie liefert für den Wirtschaftszweig 27, Herstellung von elektrischen Ausrüstungen, keinen Abwärmefaktor. Ansonsten besteht für die Sektoren 10, 28 und 30 vornehmlich Ähnlichkeit mit den beiden Studien aus BW und NRW. Dennoch erscheinen die hier angeführten Abwärmefaktoren, speziell unter dem Gesichtspunkt, dass in der schwedischen Studie neben Abgasströmen auch andere Abwärmequellen betrachtet wurden als zu niedrig gewählt.

5 ERGEBNISSE

5.1 Rauchgaskondensation

Das im Zuge der Masterarbeit erstellte Excel-Programm ermöglicht durch seine einfache Bedienung eine schnelle Berechnung wichtiger Größen der Rauchgaskondensation.

Dabei ist es möglich sowohl Auswertungen für Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung (z.B. Erdgas) als auch für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse (z.B.: Kohle, Öl, Holz) vorzunehmen.

Dazu können verschiedene Parameter wie beispielsweise das Verbrennungsluftverhältnis, die Abgastemperatur, der Umgebungsdruck oder die relative Feuchte der zugeführten Verbrennungsluft variiert werden.

Unter Berücksichtigung dieser Eingaben wird automatisch die exakte Zusammensetzung des entstehenden Verbrennungsgases sowie verschiedene für die Feuerungsanlage interessante Größen wie die benötigte Mindestluftmenge, beziehungsweise der Sauerstoffbedarf des Brennstoffs berechnet.

Das Herzstück des Excel-Tools errechnet den Grad der Kondensation des im Rauchgas enthaltenen Wasserdampfs bei gewähltem Luftdruck, Verbrennungsluftverhältnis, relativer Feuchte sowie Abgastemperatur. Es wird dabei auch die auf die Brennstoffmasse bezogene spezifische Masse der kondensierten Wassermenge ausgegeben.

Alle weiteren nicht dezidiert genannten automatisch berechenbaren Größen finden sich in den grün hinterlegten Ergebnisfeldern des Excel-Programms. Dazu sei auf den Anhang verwiesen.

Hinsichtlich der Genauigkeit der durch das Excel-Tool errechneten Ergebnisse wurde eine Beispielberechnung mit dem Brennstoff Erdgas durchgeführt. Dort erfolgte die Ermittlung jener Temperatur des Abgases, an dem der enthaltene Wasserdampf auszukondensieren beginnt, der sogenannte Taupunkt.

Wie in Abbildung 27 dargestellt wurde der Taupunkt für das gewählte Erdgas bei einem Verbrennungsluftverhältnis $\lambda = 1,2$ mit 55,505 °C errechnet.

Dieser Wert wurde schließlich in der Literatur überprüft. In [40] erfolgte die Angabe eines in Abhängigkeit des Verbrennungsluftverhältnisses angegebenen Wertes für Erdgas. Dieser

wurde bei einer Luftzahl $\lambda = 1,2 - 1,3$ mit circa 55 °C beziffert und entspricht damit dem aus dem Excel-Programm gelieferten Ergebnis.

	A	B	C	D
1	Für Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung			
2				
3				
4	spezifische Masse der kondensierten Wassermenge	$\mu_w^{\text{kond}}(t_0, p, \lambda)$	0,000	kg/kg BS
5	spezifische Masse des Wasserdampfs	μ_w	1,904	kg/kg BS
6	Grad der Kondensation		0,020	%
7	spezifische Masse trockenes Verbrennungsgas	μ_{tr}^v	16,396	kg/kg BS
8	Gaskonstante trockenes Verbrennungsgas	R_v^{tr}	0,278	kJ/kg K
9		$\mu_v^{tr} * R_v^{tr}$	4,561	kJ/kg BS K
10	Sättigungspartialdruck	$p_w^s(t_0)$	16,149	kPa
11	Luftdruck	p	100,000	kPa
12	Abgastemperatur	t_0	55,505	°C
13	Tripelpunktspdruck	p_{tr}	0,612	kPa
14	Gaskonstante Wasserdampf	R_w	0,462	kJ/kg K
15	Gaskonstante trockene Luft	R_L	0,287	kJ/kg K
16	Gaskonstante Kohlendioxid	R_{CO_2}	0,189	kJ/kg K
17	Gaskonstante Schwefeldioxid	R_{SO_2}	0,130	kJ/kg K
18	Gaskonstante Stickstoff*	$R_{N_2^*}$	0,295	kJ/kg K
19	Gaskonstante Sauerstoff	R_{O_2}	0,260	kJ/kg K

Abbildung 27: Errechneter Taupunkt (Screenshot Excel Berechnung)

Damit kann das in dieser Masterarbeit vorgestellte Excel-Tool für Rauchgaskondensations-Berechnungen verwendet werden. Diese können aus Energiemanagementsicht einen großen Mehrwert liefern, indem sie das Potenzial der aus Rauchgasen rückgewinnbaren Abwärme aufzeigen.

Sofern auf Basis dieser Berechnungen entsprechende Maßnahmen zur Rauchgaskondensation durchgeführt werden, könnten damit, wie in der EINLEITUNG gefordert, Energieeffizienzsteigerungen in der Industrie erreicht werden.

Somit bietet die Rauchgaskondensation die Möglichkeit einer effizienteren Brennstoffausnutzung, die neben der Einsparung an Brennstoffkosten und der höheren Versorgungssicherheit auch die Treibhausgasemissionen aus Feuerungsanlagen mindert.

5.2 PV-GIS-Berechnungen

In Kapitel 4.2 erfolgte bereits eine detaillierte Beschreibung, welche Berechnungen mittels PV-GIS möglich sind. Zudem wurden in Kapitel 4.3 die Dachflächen der Brauerei Hofstetten ermittelt und die in Zukunft potenziell realisierbaren PV-Anlagengrößen in südlicher, westlicher und östlicher Ausrichtung bestimmt.

Für diese wurden schließlich eine Fülle an Berechnungen durchgeführt, welche nachfolgend erklärt sowie deren Ergebnisse eingeordnet werden sollen. Aus Energiemanagementsicht war es zweckmäßig die Berechnungen mit einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung durchzuführen, da es speziell bei kleineren Brauereien üblich ist, nicht rund um die Uhr im Schichtbetrieb zu produzieren. Damit könnten sich bei entsprechend guter Datenlage zur zeitlich schwankenden PV-Leistung Potenziale für die Optimierung von Prozessabläufen im Sinne eines Demandside-Managements ergeben.

So wurde in PV-GIS die Berechnung auf Stundenbasis gewählt, welche 8760 Stundenwerte pro Jahr für die ausgewählten Parameter liefert. Exemplarisch sind diese in Abbildung 28 für die zu berechnende 100 kWp PV-Anlage der südlichen Dachflächen für das Jahr 2020 angeführt.

The screenshot displays the PVGIS web interface for calculating solar radiation data. The top section shows cursor coordinates (48.429, 14.037) and elevation (553 m). The 'Geländeschatten verwenden' (Use terrain shadows) section is checked for 'Berechneter Horizont' (Calculated horizon). The main configuration area is titled 'BESTRAHLUNGSSTÄRKEDATEN PRO STUNDE' (Solar radiation data per hour). It includes a sidebar with navigation options like 'NETZGEKOPPELT', 'NACHGEFÜHRTE PV', and 'DATEN PRO STUNDE'. The main form contains the following parameters:

- Datenbank für Solareinstrahlung***: PVGIS-SARAH2
- Startjahr***: 2020
- Endjahr***: 2020
- Montageart***: Fest (Fixed)
- Neigung [°]**: 45
- Azimut [°]**: 0
- PV-Leistung**: (checked)
- PV Technologie***: Kristallines Silizium
- Installierte maximale PV-Leistung [kWp]***: 100
- Systemverlust [%]***: 14
- Einstrahlungskomponenten**: (unchecked)

Abbildung 28: Eingegebene Parameter zur Berechnung der südlichen PV-Anlage für das Jahr 2020 [53]

Hierbei wurden, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, die entsprechende Solardatenbank, die feste Montageart für PV-Dachanlagen, die anhand von Bildern der Brauerei geschätzte Dachneigung mit 45 Grad, die PV-Technologie mit kristallinem Silizium sowie Systemverlusten

von 14 Prozent gewählt. Dies erfolgte für eine installierte PV-Leistung von 100 kWp und dem für Süden passenden Azimutwinkel von 0°.

Dasselbe wurde für alle Wetterjahre beginnend mit 2005 bis zum oben beschriebenen Jahr 2020 gemacht. In Tabelle 11 ist der Auszug eines vollen Tages, der durch PV-GIS generierten und in EXCEL aufbereiteten Daten dargestellt. Dabei bedeuten die Größen in den abgebildeten Spalten A bis F folgendes:

- time nach Stunden aufgelöste Zeit über das gesamte Wetterjahr in [h]
- P stündliche, durchschnittliche Leistung in [W]
- G(i)..... Globale Bestrahlungsstärke auf der schiefen Ebene in [W/m²]
- H_sun Höhe der Sonne in Grad [°]
- T2m Lufttemperatur in 2 Meter Höhe in Grad Celsius [°C]
- WS10m Windgeschwindigkeit in 10 Meter Höhe [m/s] [54]

Tabelle 11: Auszug eines vollen Tages der durch PV-GIS ermittelten und in Excel aufbereiteten Werte [53]

A	B	C	D	E	F
time	P	G(i)	H_sun	T2m	WS10m
20200101:0010	0	0	0	-1,08	1,1
20200101:0110	0	0	0	-0,97	0,83
20200101:0210	0	0	0	-1,15	0,41
20200101:0310	0	0	0	-1,34	0,48
20200101:0410	0	0	0	-1,61	0,62
20200101:0510	0	0	0	-1,64	0,83
20200101:0610	0	0	0	-1,78	1,17
20200101:0710	0	0	0	-2,33	0,62
20200101:0810	40793	464,24	8,4	-1,97	0,62
20200101:0910	60024	697,23	13,95	-0,9	0,62
20200101:1010	68493	814,87	17,45	0,92	0,62
20200101:1110	72420	879,79	18,56	2,39	0,41
20200101:1210	67206	812,5	17,16	3,19	0,34
20200101:1310	55832	657,98	13,4	3,53	0,76
20200101:1410	21316	252,29	7,63	3,25	0,97
20200101:1510	0	0	0	2,09	1,17
20200101:1610	0	0	0	0,28	1,38
20200101:1710	0	0	0	-0,88	1,59
20200101:1810	0	0	0	-1,52	1,59
20200101:1910	0	0	0	-1,56	1,52
20200101:2010	0	0	0	-1,79	1,59
20200101:2110	0	0	0	-1,78	1,59
20200101:2210	0	0	0	-1,79	1,72
20200101:2310	0	0	0	-1,81	1,79
20200102:0010	0	0	0	-1,71	1,93

Die wichtigste Spalte ist dabei die mit den stündlich angegebenen Werten der PV-Leistung. Damit konnte für jedes Wetterjahr wie in Tabelle 12 dargestellt der PV-Ertrag der nach Süden ausgerichteten 100-kWp-Anlage berechnet werden.

Tabelle 12: PV-Jahreserträge der nach Süden ausgerichteten 100 kWp PV-Anlage

Jahr	PV-Jahresertrag [kWh]
2005	107029,59
2006	112438,60
2007	114297,89
2008	107318,85
2009	104584,15
2010	102407,40
2011	113671,38
2012	110995,58
2013	102929,30
2014	106536,91
2015	109122,80
2016	106322,61
2017	108980,42
2018	115377,23
2019	112818,90
2020	113912,76

Der dabei erzielte Maximalwert, Minimalwert und der Durchschnittswert sind in Tabelle 13 ersichtlich.

Tabelle 13: Maximalwert, Minimalwert und Durchschnittswert der 100 kWp PV-Anlage

2018	PV-Max	115377,23	kWh
2010	PV-Min	102407,40	kWh
2005-2020	Mittelwert	109296,52	kWh

Damit konnte festgestellt werden, dass auf Basis der angenommenen Parameter auf den südlichen Dachflächen ein durchschnittlicher Jahresertrag von rund 1100 Kilowattstunden pro kWp installierter Leistung zu erwarten sind. Dieser Wert ist laut [66] und [67] für Österreich als durchaus realistisch anzusehen, da hier bei einer guter Ausrichtung sowie professioneller Installation der PV-Anlage von 900 bis 1200 Kilowattstunden pro kWp ausgegangen wird.

Mit derselben Vorgehensweise wurden auch die PV-Jahreserträge sowie Maximalwerte, Minimalwerte und Durchschnittswerte der nach Osten und Westen ausgerichteten PV-Anlagen berechnet.

Die dafür erhaltenen Ergebnisse der nach Westen ausgerichteten Dachflächen sind in Tabelle 14 und Tabelle 15 angeführt.

Tabelle 14: PV-Jahreserträge der nach Westen ausgerichteten 28 kWp PV-Anlage

Jahr	PV-Jahresertrag [kWh]
2005	24665,69
2006	23770,13
2007	24386,68
2008	23260,35
2009	22782,29
2010	22217,62
2011	24328,94
2012	24139,49
2013	22904,09
2014	23254,88
2015	23609,87
2016	23399,10
2017	24137,48
2018	24644,42
2019	23783,09
2020	23822,72

Tabelle 15: Maximalwert, Minimalwert und Durchschnittswert der 28 kWp PV-Anlage

2018	PV-Max	24665,69	kWh
2010	PV-Min	22217,62	kWh
2005 - 2020	Mittelwert	23694,18	kWh

Die in westlicher Ausrichtung installierte PV-Anlage würde bei ansonsten gleich gewählten Parametern einen geringeren Jahresertrag von rund 850 Kilowattstunden pro kWp liefern.

Ähnlich verhält es sich für die nach Osten ausgerichtete PV-Anlage. Die dabei erzielbaren Werte sind in Tabelle 16 und Tabelle 17 dargestellt. Hier wird ein durchschnittlicher Jahresertrag von rund 830 Kilowattstunden pro kWp erreicht.

Tabelle 16: PV-Jahreserträge der nach Osten ausgerichteten 20 kWp PV-Anlage

Jahr	PV-Jahresertrag [kWh]
2005	15372,80
2006	16800,70
2007	17673,49
2008	16206,63
2009	16080,19
2010	16006,15
2011	17029,04
2012	16764,64
2013	15813,61
2014	15958,32
2015	16484,67
2016	15995,22
2017	16607,75
2018	17492,24
2019	16946,58
2020	17372,23

Tabelle 17: Maximalwert, Minimalwert und Durchschnittswert der 20 kWp PV-Anlage

2018	PV-Max	17673,49	kWh
2010	PV-Min	15372,80	kWh
2005 - 2020	Mittelwert	16537,77	kWh

Die hier ermittelten Ergebnisse für die nach Süden, Osten und Westen ausgerichteten PV-Anlagen ergeben über den Zeitraum zwischen 2005 und 2020 einen durchschnittlichen Gesamtjahresertrag von rund 150000 Kilowattstunden. Das entspricht einem Ertrag von etwas mehr als 1000 Kilowattstunden pro 1 kWp installierten PV-Leistung.

5.2.1 Zeitliche Einordnung der Ergebnisse

Nachdem alle PV-Anlagen-Berechnungen auf Basis von Stundenwerten über jeweils ein komplettes Wetterjahr durchgeführt wurden, konnten ein paar ergänzende Auswertungen über sowohl den tageszeitlichen als auch saisonalen Verlauf der verfügbaren PV-Leistung angestellt werden. Dazu wurden aus den berechneten Daten der nach Süden (100 kWp), Osten (20 kWp) und Westen (28 kWp) ausgerichteten PV-Anlagen jeweils ein schöner Tag im Frühling, Sommer, Herbst und Winter des Wetterjahres 2020 herausgesucht.

Die von PV-GIS aggregierten Daten wurden schließlich so aufbereitet, dass die stündlichen PV-Erträge der drei PV-Anlagen entsprechend ihrer Anlagengröße in einem Diagramm

dargestellt werden konnten. In Abbildung 29 erkennt man für den 15. Februar 2020 die zeitlichen Verläufe der PV-Anlagen. Hier fallen auf den ersten Blick die unterschiedlich hohen PV-Erträge aufgrund der differierenden Anlagenleistungen auf. Auf den zweiten Blick erkennt man zudem, dass je nach Ausrichtung der PV-Anlage der Peak (Maximalwert des PV-Ertrags) zeitlich verschoben auftritt.

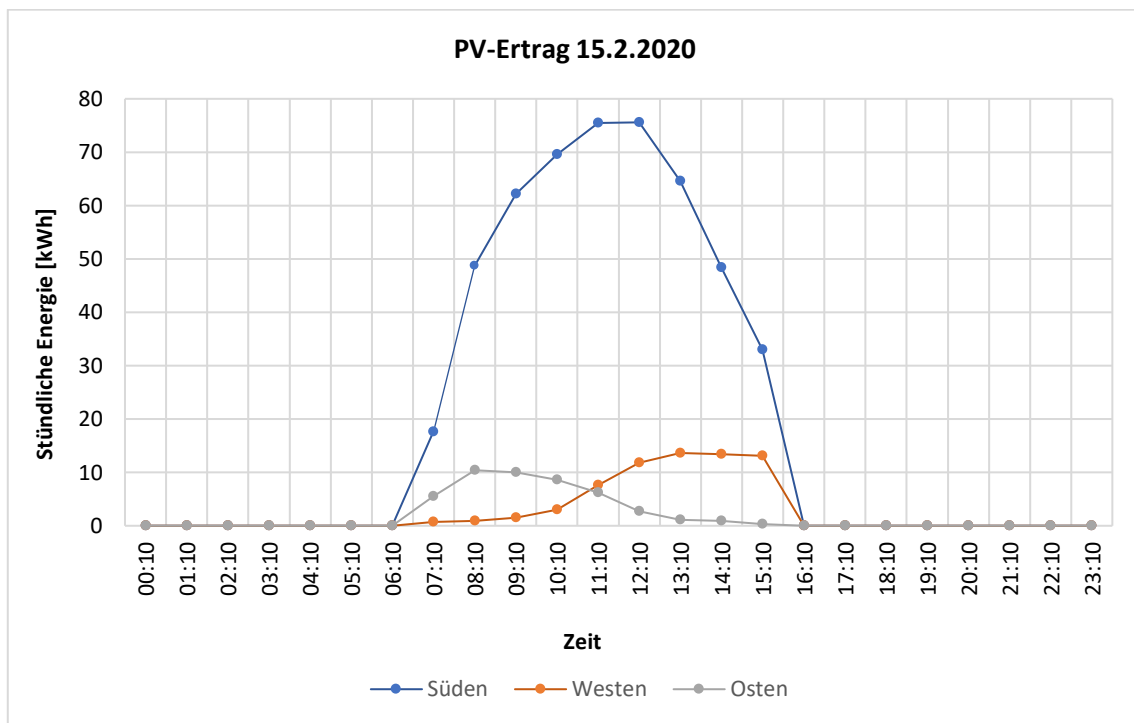


Abbildung 29: Stündliche PV-Erträge der nach Süden, Westen und Osten ausgerichteten Anlagen

Bei Normierung der PV-Erträge auf je 1 kWp installierter Anlagenleistung erhält man das in Abbildung 30 dargestellte Ergebnis. Hier wird die zeitliche Verschiebung der Maximal-Leistung noch deutlicher. Die nach Osten ausgerichtete Anlage erreicht ihren Peak um ungefähr 8 Uhr, während die nach Süden ausgerichtete Anlage erst bei rund zwei Drittel ihrer maximalen Leistung steht und die nach Westen ausgerichtete noch nahezu keine Leistung liefert.

Die nach Süden ausgerichtete Anlage erreicht erwartungsgemäß ihren Peak um die Mittagszeit, während die beiden anderen Anlagen etwas mehr als die Hälfte ihrer Leistung liefern.

Im tageszeitlichen Verlauf erreicht schließlich die nach Westen ausgerichtete Anlage zuletzt ihr Leistungsmaximum, während die südliche PV-Anlage deutlich unter ihrem Peak und die östlich ausgerichtete Anlage schon fast gar keine Leistung mehr bereitstellt.

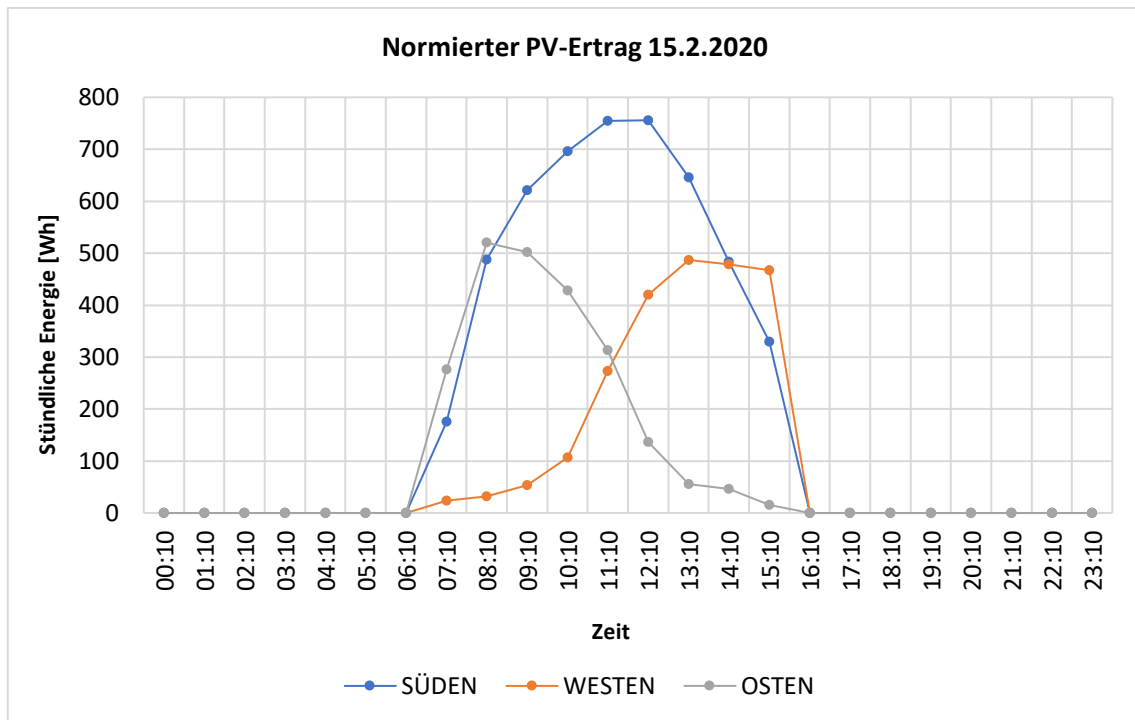


Abbildung 30: Stündlicher Verlauf der auf 1 kWp normierten Anlagenleistung

Diese tageszeitliche Verschiebung der Leistungsmaxima lässt sich wie in den nachfolgenden Grafiken über das gesamte Jahr hinweg in ähnlicher Art und Weise beobachten.

Es werden dazu die erstellten Diagramme für einen schönen Tag im Frühling, Sommer und Herbst in Abhängigkeit der installierten Anlagenleistung und nach Normierung auf 1 kWp gezeigt.

Frühling

Für einen schönen Tag im Frühling sind in Abbildung 31 und Abbildung 32 der PV-Ertrag beziehungsweise der normierte PV-Ertrag dargestellt.

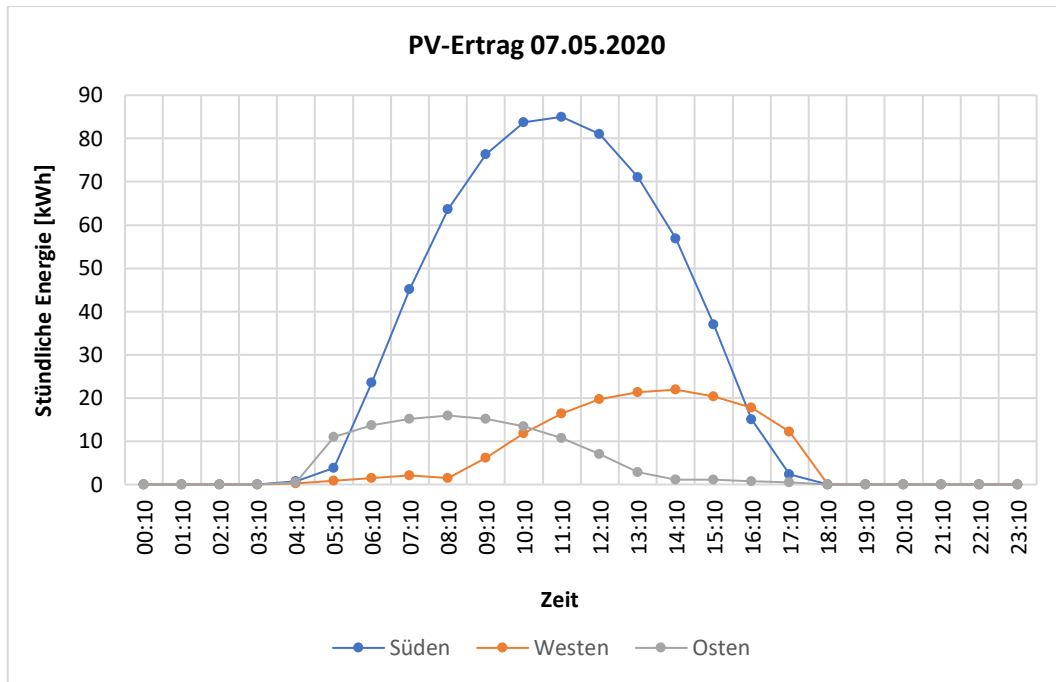


Abbildung 31: Stündliche PV-Erträge der drei ausgewerteten Anlagen im Frühling

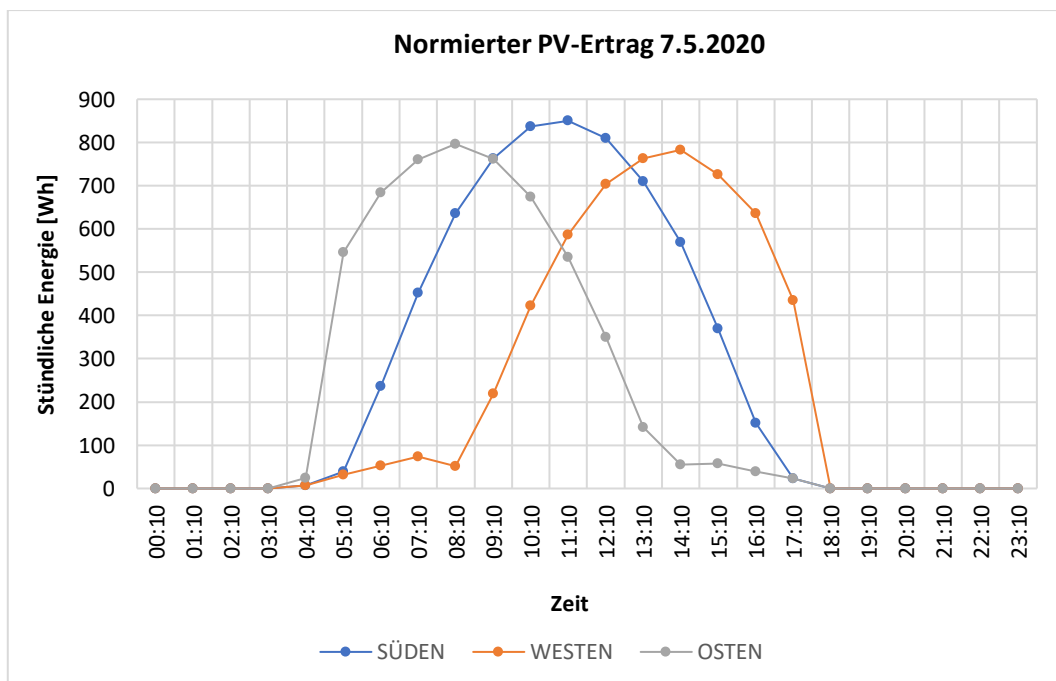


Abbildung 32: Stündlicher Verlauf der auf 1 kWp normierten Anlagenleistung im Frühling

Sommer

Ebenso sind in Abbildung 33 und Abbildung 34 für einen schönen Sommertag der PV-Ertrag beziehungsweise der normierte PV-Ertrag dargestellt.

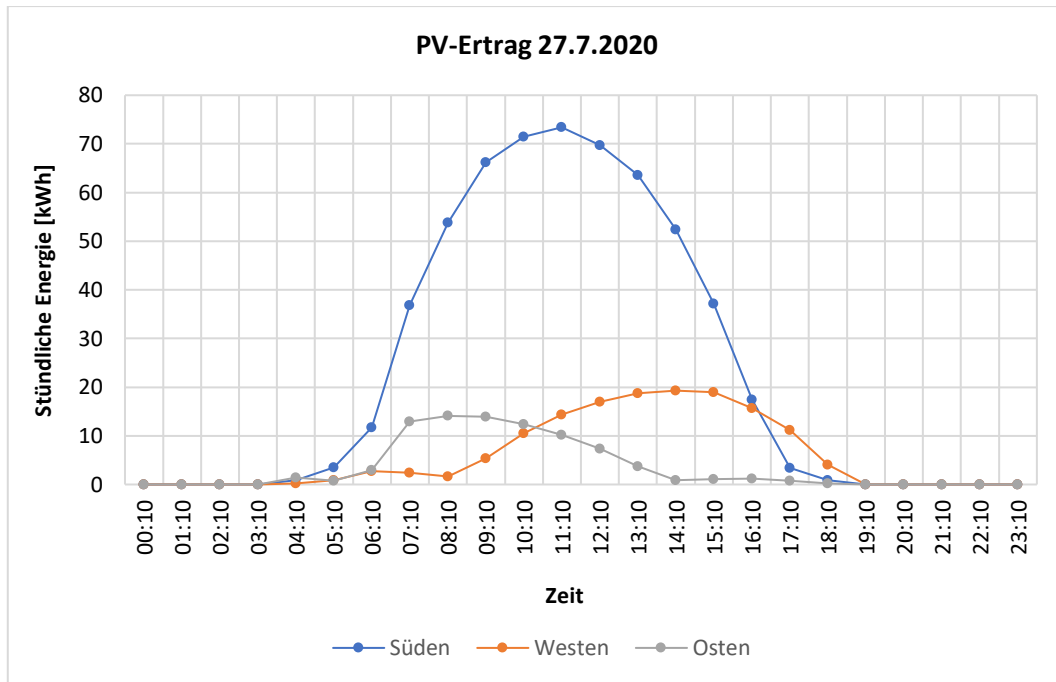


Abbildung 33: Stündliche PV-Erträge der drei ausgewerteten Anlagen im Sommer

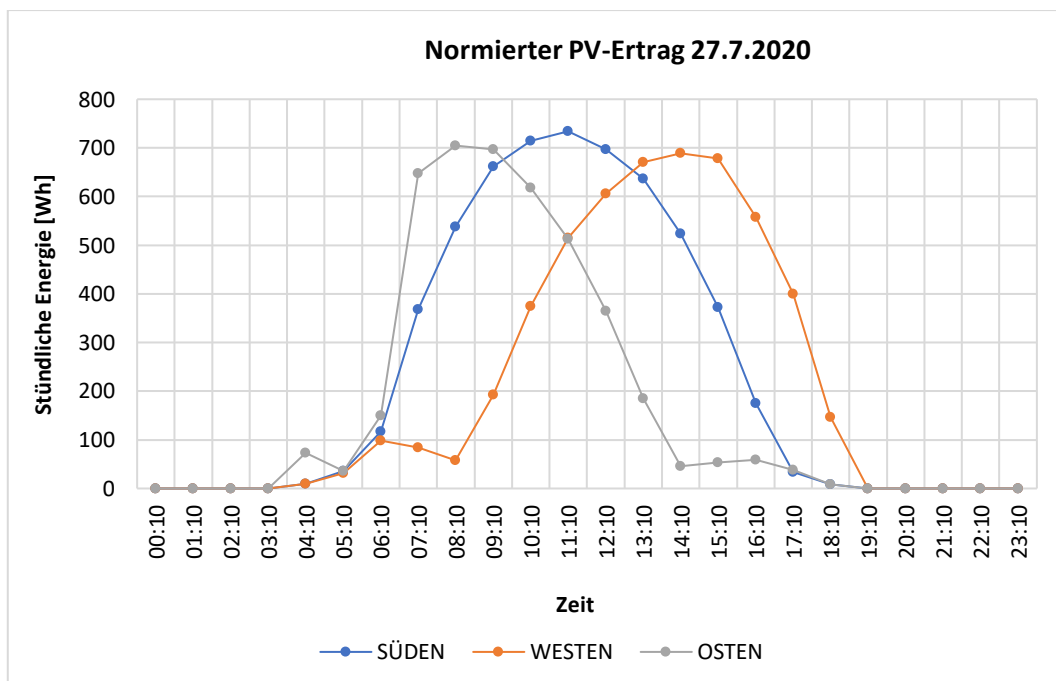


Abbildung 34: Stündlicher Verlauf der auf 1 kWp normierten Anlagenleistung im Sommer

Herbst

In Abbildung 35 und Abbildung 36 sieht man für einen schönen Herbsttag den PV-Ertrag beziehungsweise den normierten PV-Ertrag.

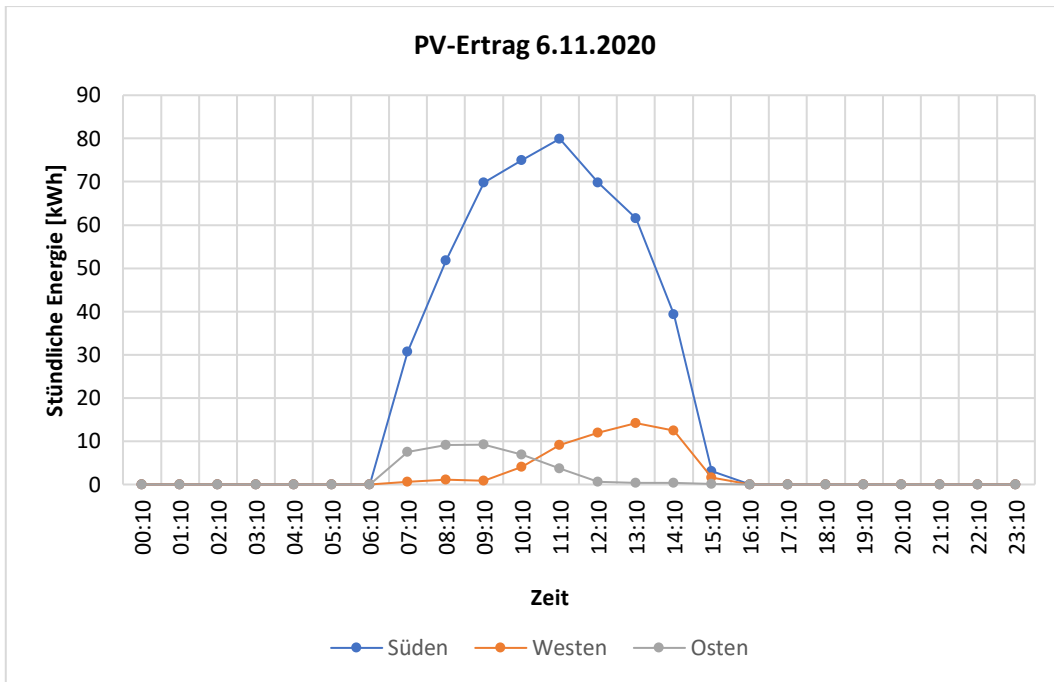


Abbildung 35: Stündliche PV-Erträge der drei ausgewerteten Anlagen im Herbst

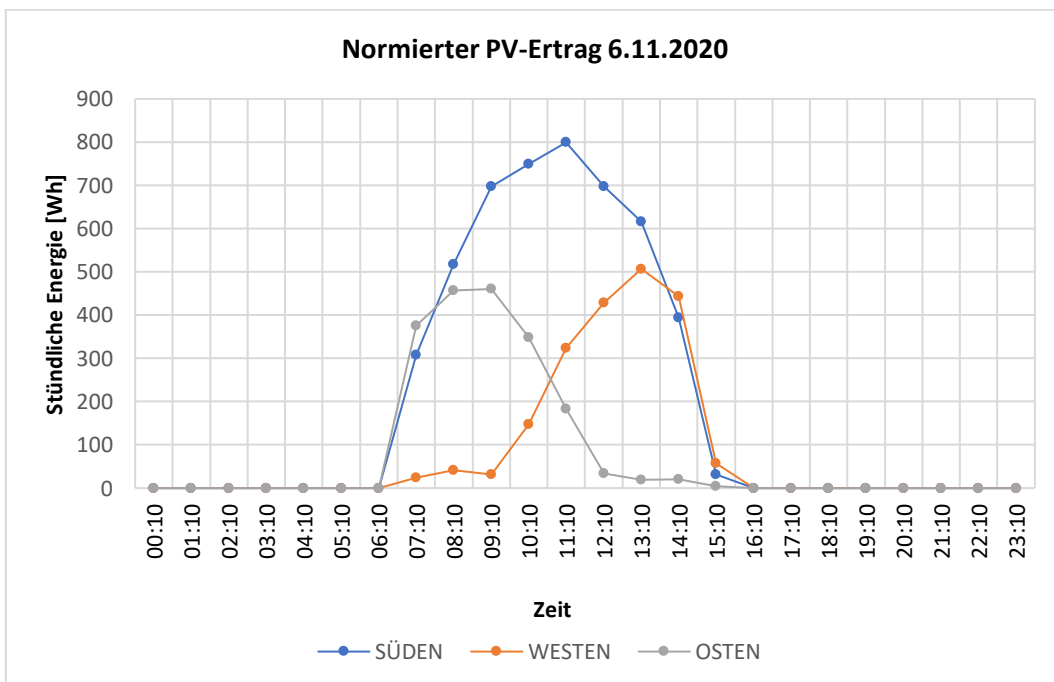


Abbildung 36: Stündlicher Verlauf der auf 1 kWp normierten Anlagenleistung im Herbst

Ergänzend kann festhalten werden, dass für die Brauerei Hofstetten die größte und nach Süden ausgerichtete PV-Anlage mit rund 1100 Kilowattstunden pro kWp den höchsten PV-Ertrags erzielt. Dennoch können die PV-Anlagen in westlicher und östlicher Ausrichtung eine sinnvolle Ergänzung darstellen, da sie jeweils die geringeren Erträge der „Hauptanlage“ in den Morgenstunden sowie Nachmittags-/Abendstunden durch ihre dort liegenden Peaks ausgleichen.

5.3 Energiebedarf/Abwärmepotenziale

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der in Kapitel 4.4 vorgestellten Möglichkeiten zur Bestimmung der Energiebedarfe und Abwärmepotenziale der elf Gmundner Unternehmen erläutert werden.

Beginnend mit den Energiebedarfen konnte über den Top-Down-Ansatz durch die mittels STATcube generierten Beschäftigtenkennzahlen die in Tabelle 18 dargestellten Bedarfe an Gesamtenergie, Brennstoff und elektrischer Energie berechnet werden.

Tabelle 18: Energiebedarfe nach Top-Down-Ansatz mittels STATcube

Unternehmen	Zuteilung	Gesamtenergie -bedarf	Brennstoff -bedarf	Elektrischer Energiebedarf
		[GWh]	[GWh]	[GWh]
Gmundner Molkerei eGen	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	37,52	20,89	13,36
HIPP Produktion Gmundner GmbH	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	22,39	12,46	7,97
IDEAL Kältetechnik GesmbH	Maschinenbau	12,93	3,11	7,77
FURAL Systeme in Metall GmbH	Nicht Eisen Metalle	8,77	5,56	3,10
Zementwerk Hatschek GmbH	Steine und Erden, Glas	77,39	46,23	12,32
Gmundner Keramik Manufaktur GmbH & Co KG	Steine und Erden, Glas	71,86	42,93	11,44
Frauscher Bootswerft GmbH & Co KG	Fahrzeugbau	17,74	6,05	9,20
RAUCH Furnace Technology GmbH	Maschinenbau	4,07	0,98	2,44
GILLES Energie- u Umwelttechnik GmbH & Co KG	Sonstiger produzierender Bereich	3,94	0,56	2,70
Robamat Automatisierungstechnik GesmbH	Maschinenbau	2,03	0,49	1,22
Sacotec Pulverbeschichtungs- GmbH	Nicht Eisen Metalle	1,35	0,86	0,48
Summe		259,98	140,12	71,98

Im Vergleich dazu sind in Tabelle 19 die über die deutschen Benchmark-Kennzahlen des im Kapitel 4.4.2.2 vorgestellten Top-Down-Ansatzes ermittelten Werte dargestellt.

Tabelle 19: Energiebedarfe nach Top-Down-Ansatz deutscher Benchmarks

Unternehmen	Zuteilung	Gesamtenergie -bedarf	Brennstoff -bedarf	Elektrischer Energiebedarf
		[GWh]	[GWh]	[GWh]
Gmundner Molkerei eGen	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	32,59	23,51	9,09
HIPP Produktion Gmunden GmbH	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	19,44	14,02	5,42
IDEAL Kältetechnik GesmbH	Maschinenbau	4,02	1,83	2,19
FURAL Systeme in Metall GmbH	Nicht Eisen Metalle	6,05	2,53	3,52
Zementwerk Hatschek GmbH	Steine und Erden, Glas	55,78	46,99	8,80
Gmundner Keramik Manufaktur GmbH & Co KG	Steine und Erden, Glas	51,80	43,63	8,17
Frauscher Bootswerft GmbH & Co KG	Fahrzeugbau	1,70	0,96	0,74
RAUCH Furnace Technology GmbH	Maschinenbau	1,27	0,58	0,69
GILLES Energie- u Umwelttechnik GmbH & Co KG	Sonstiger produzierender Bereich	1,32	0,51	0,81
Robamat Automatisierungstechnik GesmbH	Maschinenbau	0,63	0,29	0,35
Sacotec Pulverbeschichtungs- GmbH	Nicht Eisen Metalle	0,93	0,39	0,54
Summe		175,53	135,24	40,32

Beim Vergleich der Ergebnisse beider Ansätze wird deutlich, dass die Größenordnung der ermittelten Energiebedarfe für einige Wirtschaftszweige sehr ähnlich ausfällt, für andere jedoch auch stark auseinander geht.

In Summe erhält man für die Abschätzung des Gesamtenergiebedarfs mittels der deutschen Benchmark-Kennzahlen (175,33 GWh) einen geringeren Wert als durch den Ansatz mittels STATcube (259,98 GWh). Bei genauerer Betrachtung erkennt man zudem, dass für jedes einzelne Unternehmen über die deutschen Benchmarks ein geringerer Wert erhalten wird.

Die größten Abweichungen der beiden Ansätze bestehen für die Wirtschaftszweige Fahrzeugbau und Maschinenbau. Für Unternehmen, die dem Wirtschaftszweig Maschinenbau zugeordnet werden, erhält man als Abschätzung des Gesamtenergiebedarfs über die deutschen Kennzahlen in etwa ein Drittel der mittels STATcube ermittelten Werte. Beim Fahrzeugbau sogar nur ein Zehntel.

Energiebedarf mittels exakter ÖNACE-Code Zuordnung

Bei der Ermittlung der Energiebedarfe in Tabelle 19 über die deutschen Benchmark-Kennzahlen wurden die einzelnen Unternehmen analog zum Top-Down-Ansatz mittels STATcube den übergeordneten Wirtschaftszweigen wie beispielsweise „Nahrungs-, Genussmittel und Tabak“, „Steine, Erden und Glas“ und „Maschinenbau“ zugeordnet.

Die elf Unternehmen konnten aufgrund ihres genau zugewiesenen ÖNACE-CODE wie beispielsweise 10510 für die Gmundner Molkerei nicht nur dem übergeordneten Wirtschaftszweig „Nahrungs-, Genussmittel und Tabak“ zugeordnet werden, sondern auch der exakten Sparte. In diesem Fall „10510 Milchverarbeitung (ohne Herstellung von Speiseeis)“.

Für diese exakte Zuordnung waren auch Benchmark-Kennzahlen der deutschen Industrie verfügbar. [60] Diese wurden in weiterer Folge auf die elf Gmundner Unternehmen umgelegt. Die damit erhaltenen Ergebnisse sind in Tabelle 20 dargestellt.

Die mittels exakter Zuordnung erhaltenen Werte unterscheiden sich gegenüber der Berechnung mittels übergeordneter Wirtschaftszweige mitunter erheblich. Speziell die Energiebedarfe für das „Zementwerk Hatschek GmbH“ und die „Gmundner Molkerei eGen“ zeigen die größten Abweichungen. Für das Zementwerk wurde der fast zehnfache Wert (541,11 GWh gegenüber 55,78 GWh) bezüglich des Gesamtenergiebedarfs und für die Molkerei mehr als der doppelte Wert (75,87 GWh gegenüber 32,59 GWh) errechnet.

Aber es konnten auch Ergebnisse in die gegenteilige Richtung wie für die „Gmundner Keramik Manufaktur GmbH & Co KG“ und die „FURAL Systeme in Metall GmbH“ ausgemacht werden. Für die Gmundner Keramik Manufaktur wurde nach exakter Zuordnung nur mehr rund ein Achtel des ursprünglichen Gesamtenergiebedarfs berechnet (6,73 GWh gegenüber 51,8 GWh) und für „FURAL Systeme in Metall GmbH“ weniger als die Hälfte (2,63 GWh gegenüber 6,05 GWh).

Tabelle 20: Energiebedarfe nach exakter Zuordnung über deutsche Benchmark-Kennzahlen

Unternehmen	Zuteilung	Gesamtenergie	Brennstoff	Elektrischer
		-bedarf	-bedarf	Energiebedarf
		[GWh]	[GWh]	[GWh]
Gmundner Molkerei eGen	Milchverarbeitung (ohne Herstellung von Speiseeis)	75,98	55,27	20,65
HIPP Produktion Gmunden GmbH	Herstellung von homogenisierten und diätischen Nahrungsmitteln	18,92	14,38	4,50
IDEAL Kältetechnik GesmbH	Herstellung von kälte- und lufttechnischen Erzeugnissen, nicht für den Haushalt	2,49	1,15	1,39
FURAL Systeme in Metall GmbH	Herstellung von Metallkonstruktionen	2,63	1,46	1,16
Zementwerk Hatschek GmbH	Herstellung von Zement	541,11	471,04	70,16
Gmundner Keramik Manufaktur GmbH & Co KG	Herstellung von keramischen Haushaltswaren und Ziergegenständen	6,73	5,69	1,04
Frauscher Bootswerft GmbH & Co KG	Boots- und Yachtbau	3,45	2,44	1,00
RAUCH Furnace Technology GmbH	Herstellung von Öfen und Brennern	0,95	0,55	0,40
GILLES Energie- u Umwelttechnik GmbH & Co KG	Herstellung von elektrischen Haushaltsgeräten	0,75	0,46	0,31
Robamat Automatisierungstechnik GesmbH	Herstellung von Maschinen für die Verarbeitung von Kunststoffen und Kautschuck	0,62	0,29	0,32
Sacotec Pulverbeschichtungs- GmbH	Oberflächenveredelung und Wärmebehandlung	1,52	0,88	0,64
Summe		655,16	553,61	101,57

Vergleiche mit Bottom-Up Ergebnissen

In weiterer Folge konnten für die Gmundner Molkerei und das Zementwerk Hatschek noch zwei weitere Vergleiche zu deren ermittelten Gesamtenergiebedarfen gezogen werden. Wie in Kapitel 4.4.2 erwähnt wurden schon früher am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik der Montanuniversität das Zementwerk Hatschek mittels Bottom-Up-Berechnungen analysiert. Ebenso wurde dort auch die Niederösterreichische Molkerei (NÖM) untersucht, deren Kennzahlen schließlich auf die Gmundner Molkerei umgelegt wurden. [61]

Die erzielten Ergebnisse aus diesen Arbeiten (grau hinterlegt) wurden in Tabelle 21 und Tabelle 22 mit den bisher über die Top-Down-Ansätze erhaltenen Ergebnisse verglichen.

Tabelle 21: Geschätzter Gesamtenergiebedarf anhand der verschiedenen Ansätze

Gmundner Molkerei eGen		
Ansatz	Zuteilung	Gesamtenergiebedarf
		[GWh]
STATcube	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	37,52
Deutsche Benchmark	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	32,59
Deutsche Benchmark exakte Zuordnung	Milchverarbeitung (ohne Herstellung von Speiseeis)	75,98
Bottom-Up	Milchverarbeitung (ohne Herstellung von Speiseeis)	55,60

Tabelle 22: Geschätzter Gesamtenergiebedarf anhand der verschiedenen Ansätze

Zementwerk Hatschek GmbH		
Ansatz	Zuteilung	Gesamtenergiebedarf
		[GWh]
STATcube	Steine und Erden, Glas	77,39
Deutsche Benchmark	Steine und Erden, Glas	55,78
Deutsche Benchmark exakte Zuordnung	Herstellung von Zement	541,11
Bottom-Up	Herstellung von Zement	361,43

Für die beiden verglichenen Unternehmen ist ersichtlich, dass die Top-Down-Ansätze mit der groben Zuordnung der übergeordneten Wirtschaftszweige im Vergleich zur exakten Zuordnung mittels der Deutschen Benchmark deutlich weiter entfernt vom ermittelten Gesamtenergiebedarf der Bottom-Up-Analyse liegen.

Das Ergebnis des Bottom-Up-Ansatzes wird in der Regel dem realen Gesamtenergiebedarf am nächsten kommen. Grund dafür ist, dass durch die aufwändige Bottom-Up-Analyse unternehmensspezifische Prozesscharakteristika in die Berechnung einfließen und somit die Energieverbräuche des Unternehmens besser beurteilt werden.

Schlussfolgernd werden die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse der berechneten Abwärmepotenziale aufgrund des direkten Zusammenhangs mit dem Gesamtenergiebedarf

über die mittels exakter ÖNACE-CODE Zuordnung der deutschen Benchmarks am nächsten an der Realität liegen.

Abwärmepotenziale

Nachdem der Gesamtenergiebedarf der elf Gmundner Unternehmen auf verschiedene Arten ermittelt wurde, konnte für eine erste rasche Abschätzung deren Abwärmepotenzial nach der in 4.4.3.1 vorgestellten Methode ermittelt werden. Als Basis der Berechnung wurden die in Tabelle 20 vorgestellten Ergebnisse zum Gesamtenergiebedarf mittels der exakten Zuordnung nach ÖNACE-CODE der deutschen Benchmarks verwendet. Die damit erhaltene, überschlägige Abschätzung des Abwärmepotenzials ist in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Abwärmepotenzialerhebung über Prozesswärme

Unternehmen	Gesamtenergie - bedarf	Prozesswärme	Abwärme - potenzial
	[GWh]	[GWh]	[GWh]
Gmundner Molkerei eGen	75,98	50,76	30,45
HIPP Produktion Gmunden GmbH	18,92	12,64	7,58
IDEAL Kältetechnik GesmbH	2,49	1,67	1,00
FURAL Systeme in Metall GmbH	2,63	1,76	1,06
Zementwerk Hatschek GmbH	541,11	361,46	216,88
Gmundner Keramik Manufaktur GmbH & Co KG	6,73	4,49	2,70
Frauscher Bootswerft GmbH & Co KG	3,45	2,30	1,38
RAUCH Furnace Technology GmbH	0,95	0,64	0,38
GILLES Energie- u Umwelttechnik GmbH & Co KG	0,75	0,50	0,30
Robamat Automatisierungstechnik GesmbH	0,62	0,41	0,25
Sacotec Pulverbeschichtungs- GmbH	1,52	1,02	0,61
Summe	655,16	437,65	262,59

Der mit 262,59 GWh ermittelte Summenwert für das Abwärmepotenzial der Gmundner Unternehmen muss als erste grobe Schätzung eines theoretischen Potenzials interpretiert werden. Dies liegt an den Rahmenbedingungen der durchgeführten Berechnung. Bei dem anfangs zu ermittelnden Prozesswärmebedarf wird keine Unterscheidung getroffen, welchem Industriesektor ein Unternehmen angehört. Außerdem wird ein pauschaler, über alle Wirtschaftszweige gemittelter Faktor verwendet, um aus dem Prozesswärmebedarf das Abwärmepotenzial abzuleiten.

Abwärmepotenzial mittels Abwärmefaktoren

Für die in der Literatur übliche Bestimmung des Abwärmepotenzials durch Abwärmefaktoren wurden die in Kapitel 4.4.3 Tabelle 10 dargestellten Abwärmefaktoren verwendet.

Diese wurden in Tabelle 24 den Gmundner Unternehmen zugeordnet. [48] [49] [42] [64]

Tabelle 24: Zuordnung der Abwärmefaktoren

Unternehmen	Abwärmefaktoren der 4 Studien			
	Deutschland	NRW	BW	Schweden
Gmundner Molkerei eGen	10%	9%	5%	9%
HIPP Produktion Gmunden GmbH	10%	9%	5%	9%
IDEAL Kältetechnik GesmbH	16%	3%	5%	3%
FURAL Systeme in Metall GmbH	19%	18%	21%	11%
Zementwerk Hatschek GmbH	15%	10%	13%	2%
Gmundner Keramik Manufaktur GmbH & Co KG	15%	10%	13%	2%
Frauscher Bootswerft GmbH & Co KG	38%	4%	4%	3%
RAUCH Furnace Technology GmbH	16%	3%	5%	3%
GILLES Energie- u Umwelttechnik GmbH & Co KG	31%	20%	39%	k.A.
Robamat Automatisierungstechnik GesmbH	16%	3%	5%	3%
Sacotec Pulverbeschichtungs- GmbH	19%	18%	21%	11%

Anhand dieser Abwärmefaktoren wurden für die drei unterschiedlich berechneten Gesamtenergiebedarfe und schon in Tabelle 18, Tabelle 19 und Tabelle 20 vorgestellten Gesamtenergiebedarfen jeweils das Abwärmepotenzial berechnet.

Dementsprechend wurde jeweils eine Abwärmepotenzialerhebung basierend auf:

- den statistischen Daten von STATcube
- den deutschen Benchmarks der übergeordneten Wirtschaftszweigen
- den deutschen Benchmarks mit exakter ÖNACE-Code Zuordnung

erhalten.

Die Ergebnisse dazu sind nachfolgend in Tabelle 25, Tabelle 26 und Tabelle 27 dargestellt. Dabei ist zu erwähnen, dass der Aufbau dieser Ergebnisdarstellungen immer demselben Schema folgt und analog der Zuordnung der Abwärmefaktoren in Tabelle 24 bei der ersten Ergebnisspalte links mit „Deutschland“ startet, gefolgt von „NRW“ und „BW“ und in der letzten Spalte mit „Schweden“ endet.

Tabelle 25: Abwärmepotenzialberechnung nach STATcube

Unternehmen	Abwärmepotenzial			
	[GWh]	[GWh]	[GWh]	[GWh]
Gmundner Molkerei eGen	3,75	3,38	1,88	3,23
HIPP Produktion Gmunden GmbH	2,24	2,01	1,12	1,93
IDEAL Kältetechnik GesmbH	2,07	0,39	0,65	0,36
FURAL Systeme in Metall GmbH	1,67	1,58	1,84	0,98
Zementwerk Hatschek GmbH	11,61	7,74	10,06	1,32
Gmundner Keramik Manufaktur GmbH & Co KG	10,78	7,19	9,34	1,22
Frauscher Bootswerft GmbH & Co KG	6,74	0,71	0,71	0,48
RAUCH Furnace Technology GmbH	0,65	0,12	0,20	0,11
GILLES Energie- u Umwelttechnik GmbH & Co KG	1,22	0,79	1,54	k.A.
Robamat Automatisierungstechnik GesmbH	0,33	0,06	0,10	0,06
Sacotec Pulverbeschichtungs- GmbH	0,26	0,24	0,28	0,15
Summe	41,31	24,20	27,72	9,83

Tabelle 26: Abwärmepotenzialberechnung nach übergeordneten Wirtschaftszweigen

Unternehmen	Abwärmepotenzial			
	[GWh]	[GWh]	[GWh]	[GWh]
Gmundner Molkerei eGen	3,26	2,93	1,63	2,80
HIPP Produktion Gmunden GmbH	1,94	1,75	0,97	1,67
IDEAL Kältetechnik GesmbH	0,64	0,12	0,20	0,11
FURAL Systeme in Metall GmbH	1,15	1,09	1,27	0,68
Zementwerk Hatschek GmbH	8,37	5,58	7,25	0,95
Gmundner Keramik Manufaktur GmbH & Co KG	7,77	5,18	6,73	0,88
Frauscher Bootswerft GmbH & Co KG	0,65	0,07	0,07	0,05
RAUCH Furnace Technology GmbH	0,20	0,04	0,06	0,04
GILLES Energie- u Umwelttechnik GmbH & Co KG	0,41	0,26	0,52	k.A.
Robamat Automatisierungstechnik GesmbH	0,10	0,02	0,03	0,02
Sacotec Pulverbeschichtungs- GmbH	0,18	0,17	0,20	0,10
Summe	24,67	17,21	18,93	7,30

Tabelle 27: Abwärmepotenzialberechnung nach exakter Zuordnung

Unternehmen	Abwärmepotenzial			
	[GWh]	[GWh]	[GWh]	[GWh]
Gmundner Molkerei eGen	7,60	6,84	3,80	6,53
HIPP Produktion Gmunden GmbH	1,89	1,70	0,95	1,63
IDEAL Kältetechnik GesmbH	0,40	0,07	0,12	0,07
FURAL Systeme in Metall GmbH	0,50	0,47	0,55	0,30
Zementwerk Hatschek GmbH	81,17	54,11	70,34	9,20
Gmundner Keramik Manufaktur GmbH & Co KG	1,01	0,67	0,87	0,11
Frauscher Bootswerft GmbH & Co KG	1,31	0,14	0,14	0,09
RAUCH Furnace Technology GmbH	0,15	0,03	0,05	0,03
GILLES Energie- u Umwelttechnik GmbH & Co KG	0,23	0,15	0,29	k.A.
Robamat Automatisierungstechnik GesmbH	0,10	0,02	0,03	0,02
Sacotec Pulverbeschichtungs- GmbH	0,29	0,27	0,32	0,17
Summe	94,65	64,48	77,47	18,15

Um die Ergebnisse dieser drei Abwärmepotenzialerhebungen besser einordnen zu können kann sich an den Ergebnissen der Gesamtenergiebedarfe orientiert werden. Diese stehen schließlich über die Abwärmefaktoren in direktem Zusammenhang mit den berechneten Abwärmepotenzialen. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass die berechneten Abwärmepotenziale aus Tabelle 27 aufgrund der direkten Zuordnung nach ÖNACE-CODES auch die besten Gesamtergebnisse bezüglich des Abwärmepotenzials der elf Gmundner Unternehmen liefern.

Wenn die Ergebnisse der sicherlich zu niedrig schätzenden schwedischen Studie außen vor gelassen werden, ist es möglich sich an einem Gesamtabwärmepotenzial der analysierten Unternehmen im Bereich von 60 bis 100 Gigawattstunden zu orientieren.

Gegenüber der ersten überschlagsmäßigen Abwärmepotenzialbestimmung über den „Prozesswärmeansatz“ mit 262,59 Gigawattstunden, ist das ein deutlich geringeres Potenzial.

Dabei darf jedoch nicht vergessen werden, dass in dem mit 60 bis 100 GWh ermittelten Wert ausschließlich Abwärme stammend aus Abgasströmen betrachtet wurden.

Um einen weiteren Vergleich zu ziehen, wurde abschließend noch eine Einzelfallbetrachtung für das Zementwerk Hatschek durchgeführt. Hierbei standen nämlich, über eine schon früher am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik der Montanuniversität im Rahmen des Projekts INXS [62] durchgeführten Bottom-Up-Berechnung, ein ermitteltes Abwärmepotenzial zur Verfügung.

Dieses wurde den Ergebnissen der Top-Down-Ansätze und des „Prozesswärme-Ansatzes“ in Tabelle 28 gegenübergestellt.

Tabelle 28: Vergleich der Ergebnisse über die verschiedenen Ansätze für das Zementwerk Hatschek

Abwärmepotenzial Zementwerk Hatschek GmbH				
Ansatz	[GWh]	[GWh]	[GWh]	[GWh]
STATcube	11,61	7,74	10,06	1,32
Deutsche Benchmark	8,37	5,58	7,25	0,95
Deutsche Benchmark exakte Zuordnung	81,17	54,11	70,34	9,20
Bottom-Up (theoretisches Potenzial)	119,37 [GWh]			
"Prozesswärme" (exakte Zuordnung dt. Benchmarks)	216,88 [GWh]			

Aus einer Einzelfallbetrachtung kann zwar nicht auf die anderen Gmundner Unternehmen geschlossen werden, sie hilft aber dennoch bei der Einordnung der Ergebnisse. Das aus der Bottom-Up-Analyse stammende Ergebnis wird aufgrund der Einbeziehung unternehmensspezifischer Daten, sowie der besseren Kenntnis der Prozesscharakteristika dem realen Abwärmeaufkommen des Zementwerks am nächsten kommen.

Das mittels exakter ÖNACE-CODE-Zuordnung der deutschen Benchmarks erhaltene Abwärmepotenzial weist die geringste Abweichung zum Bottom-Up Ergebnis innerhalb der verschiedenen Ansätze auf. Dennoch fällt es nicht unwesentlich geringer aus, was sich jedoch über die ausschließliche Betrachtung von Abgasströmen als Abwärmequellen in den verwendeten Abwärmefaktoren erklären lässt.

Abschließend kann dennoch festgehalten werden, dass die Top-Down-Analyse mittels der exakt zugeordneten ÖNACE-CODES über die deutschen Benchmarks Ergebnisse einer korrekten Größenordnung liefern. Sie werden aufgrund der verwendeten Abwärmefaktoren voraussichtlich eher zu niedrig ausfallen, da wie in Kapitel 4.4.3 genauer erläutert, keine Abwärmequellen aus beispielsweise Abwasser, Kühlwasser und Strahlung miteinberechnet sind. Dennoch eignen sich die Ergebnisse für eine gute Abschätzung.

Die mittels der Abwärmefaktoren der schwedischen Studie erhaltenen Ergebnisse scheinen für die Abwärmepotenzialbestimmung der elf untersuchten Unternehmen, siehe Tabelle 27 in Summe am weitesten entfernt zu liegen.

Dazu können mehrere Gründe angeführt werden. Zum einen ist die Datengrundlage der Studie, anhand derer die Abwärmefaktoren ermittelt wurden, auf die schwedische Industrie bezogen und damit schwer umlegbar auf die österreichische Industrie. Dazu bestehen Unklarheiten über die Aktualität der zugrundeliegenden Daten, sie stammen nämlich aller Wahrscheinlichkeit nach schon aus den frühen 2000er. Dazu sollen die dortigen Auswertungen zur Abschätzung des Potenzials für Fernwärme angepasst worden sein. Deswegen wurden die in Kapitel 4.4.3 beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der analysierten schwedischen Unternehmen getroffen. [48]

Für die Abschätzung der Abwärmepotenziale mittels des „Prozesswärme-Ansatzes“ lässt sich festhalten, dass die damit erzielten Ergebnisse nur einer sehr groben Abschätzung dienen. Bei Gegenüberstellung der damit erzielten Ergebnisse mit jenen des gut geeigneten Ansatzes anhand der exakten Zuordnung mittels ÖNACE-CODE, werden für einige Gmundner Unternehmen dreifach so hohe Werte erhalten.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Bereiche Energieeffizienz, Erneuerbare Energien und Versorgungssicherheit stellen innerhalb der oberösterreichischen Energiestrategie wichtige Aspekte dar, um die dort gesteckten energiepolitischen Ziele zu erreichen. [3]

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit hat sich mit drei unterschiedlichen Themenfeldern befasst, welche allesamt einen Mehrwert im Sinne dieser Energiestrategie liefern.

Im Zuge dieser Masterarbeit wurde als ein Teil die Rauchgaskondensation untersucht. Daraus ist ein Excel-Programm hervorgegangen, mithilfe dessen es möglich ist, die Zusammensetzung des aus Feuerungsanlagen stammenden Rauchgases für beliebige Brennstoffe zu berechnen. Dabei wird im Speziellen der Grad des auskondensierten Wasserdampfs in Abhängigkeit des gewählten Verbrennungsluftverhältnisses, der Abgastemperatur, der vorherrschenden Luftfeuchte und des Umgebungsdrucks ausgegeben. Dieses Ergebnis dient als Grundlage dafür, das oft ungenutzte Potenzial der im Rauchgas enthaltenen Kondensationsenthalpie des mitgeführten Wasserdampfs auszuschöpfen.

Die Relevanz dieses Potenzials kann insofern bewertet werden, dass dieses branchenübergreifend bei der Prozessdampfbereitstellung auftritt. Österreichweit werden 40 % des gesamten Brennstoffeinsatzes der Industrie für Dampfsysteme benötigt, in denen die Rauchgaskondensation zu Energieeffizienzsteigerungen und damit zur Erhöhung der energiebezogenen Leistung der Unternehmen führen würde. [26] Dies würde eine klare Verbesserung im Sinne der oberösterreichischen Energiestrategie darstellen.

Im zweiten Themenfeld der Masterarbeit wurden Berechnungen für eine auf den Dachflächen der oberösterreichischen Brauerei Hofstetten angedachten Photovoltaik-Anlage durchgeführt. Dabei wurde gezeigt, dass für eine installierte Anlagenleistung von 100 kWp auf den südlichen, 28 kWp auf den westlichen und 20 kWp auf den östlichen Dachflächen mit einem durchschnittlichen Jahresertrag von rund 150.000 Kilowattstunden zu rechnen ist. Außerdem konnte festgestellt werden, dass sich die nach Süden ausgerichtete Hauptanlage mit den beiden nach Osten und Westen ausgerichteten Anlagen durch die zeitlich verschoben auftretenden Leistungsmaxima optimal ergänzen. Somit würde die sowohl am Vormittag als auch am Nachmittag niedriger ausfallende Leistung der Hauptanlage durch die Peak-Leistungen der beiden anderen Anlagen ausgeglichen werden.

Außerdem hat sich gezeigt, dass bei der Durchrechnung des erwartbaren PV-Jahresertrags sich pro Kilowattpeak installierter Anlagenleistung für Österreich ansprechende Werte mit

rund 1100 kWh/kWp für die südlichen Dachflächen, 850 kWh/kWp für die westlichen Dachflächen und 830 kWh/kWp für die östlichen Dachflächen ergeben.

Bezugnehmend auf die oberösterreichische Energiestrategie könnte mit der Realisierung der sohin berechneten Anlage ein erhöhter erneuerbarer Energien-Anteil am Stromverbrauch der Brauerei erreicht werden. Ebenso könnte im Kontext der Versorgungssicherheit durch eine firmeneigene PV-Anlage ein Teil der benötigten Energie selbst bereitgestellt werden.

Zuletzt könnten zukünftig, nach erfolgter Installation der PV-Anlage, mittels der stündlich berechneten PV-Leistungen, zeitlich anpassbare Prozessschritte der Brauerei im Sinne eines Demandsidemanagements optimiert werden.

Das dritte und letzte Themenfeld der Masterarbeit umfasste die Ermittlung des Energiebedarfs und des daraus erhobenen Abwärmepotenzials elf Gmundner Industrieunternehmen. Die mittels verschiedener Ansätze erzielten Ergebnisse unterschieden sich mitunter deutlich. Es hat sich herausgestellt, dass unter den verwendeten Ansätzen der Top-Down-Ansatz mittels deutscher branchenspezifischer Kennzahlen/Benchmarks, die besten Ergebnisse lieferte. Dabei wurde anhand exakter ÖNACE-CODE Zuordnung der Gmundner Unternehmen ein Gesamtenergiebedarf von rund 655 Gigawattstunden berechnet. Daraus konnte mittels Abwärmefaktoren ein resultierendes, theoretisches Abwärmepotenzial von 60 bis 100 Gigawattstunden bestimmt werden. Dabei ist zu erwähnen, dass dieses Abwärmepotenzial ausschließlich Abwärmequellen aus Abgasströmen betrachtet und somit weitere Abwärmepotenziale aus beispielsweise Abwasser, Kühlwasser und Strahlung außer Acht lässt. Damit ist der eben genannte Wertebereich als untere Schätzung des Abwärmepotenzials zu verstehen.

Um den Bogen zur oberösterreichischen Energiestrategie zu spannen, kann festgehalten werden, dass über die erfolgte Abwärmepotenzialerhebung ein deutlicher Raum für Verbesserungen aufgezeigt wurde. Abwärmen stellen immer eine Möglichkeit für Energieeffizienzsteigerungen in Unternehmen dar. Dabei gilt der Grundsatz, dass Abwärmen stets über eine verbesserte Dimensionierung und Steuerung von Produktionsprozessen, durch eine Optimierung der Anlageneffizienz oder durch Alternativprozesse so gut als möglich vermieden werden sollen. [51] Erst wenn diese Optionen ausgeschöpft sind, sollen der Reihe nach Möglichkeiten zur prozessinternen Wärmerückgewinnung, der kaskadischen innerbetrieblichen oder betriebsexternen Abwärmenutzung in Betracht gezogen werden.

Betriebsexterne Nutzungen könnten dabei die Versorgung angrenzender Unternehmen mit thermischer Energie oder die Einspeisung in Fernwärme- beziehungsweise Anergienetze darstellen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE (Hrsg.): *Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich : Periode 2021-2030*. Aktualisierung gemäß Artikel 14 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz. Wien, 2023
- [2] BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *Energie in Österreich : Zahlen, Daten, Fakten*. Wien, 2023
- [3] DELL, Gerhard: *Energie Leitregion OÖ 2050 : Die Energiestrategie Oberösterreichs*. Linz, 2017
- [4] SCHMITT, Bastian: *Integration thermischer Solaranlagen zur Bereitstellung von Prozesswärme in Industriebetrieben*. Zugl.: Kassel, Univ., Fachbereich Maschinenbau, Diss., 2014. Aachen, 2014 (Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung)
- [5] LAUTERBACH, C. ; SCHMITT, B. ; VAJEN, K.: *Das Potential solarer Prozesswärme in Deutschland : Teil 1 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „SOPREN – Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“ Förderkennzeichen: 0329601T*. Kassel, Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik. 2011
- [6] WIND, Irina: *DAS OFFENE BUCH : Umwelterklärung 2019*. Murauer Rein das Beste. 2019
- [7] KERNSTOCK, Florian: *Automatisierung und Optimierung einer Kleinbrauanlage*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik. Masterarbeit. 2018
- [8] NARZIß, Ludwig ; BACK, Werner: *Die Bierbrauerei : Band 2: Die Technologie der Würzebereitung*. Achte, überarbeitete und ergänzte Auflage. 8. Aufl. Stuttgart, Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009
- [9] DEUTSCHER BRAUER BUND: *Wie unser Bier entsteht : Der Brauprozess vom Sudhaus bis zur Abfüllung*. URL <https://brauer-bund.de/wp-content/uploads/2020/06/180306-Grafik-Brauprozess-kleiner.jpg>. – Aktualisierungsdatum: 2023-09-13
- [10] BECK, Anton ; KNÖTTNER, Sophie ; UNTERLUGGAUER, Julian ; HALMSCHLAGER, Daniel ; HOFMANN, René: *An Integrated Optimization Model for Industrial Energy System Retrofit with Process Scheduling, Heat Recovery, and Energy Supply System Synthesis*. Basel (3)
- [11] BRAUHERR.DE: *besser bier brauen*. URL <http://www.besser-bier-brauen.de/selber-bier-brauen/brauanleitungen/detailwissen/maischen/index.html> – Überprüfungsdatum 2023-09-01

- [12] HUBER, Johannes ; HLATKY, Christine ; HLATKY, Michael: *Bier : Rezepte Kultur Gesundheit*. 2015
- [13] STANGL, Severin: *Technologie der Brauerei*. URL
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj27L3frJCBAXHgf0HHaPoCwoQFnoECBQQAQ&url=https%3A%2F%2Fvowi.fsinf.at%2Fimages%2Ffe%2Ffe7%2FBOKU_Wien-Technologie_der_Brauerei_VO_\(Urban\)_-_Technologie_der_Brauerei.pdf&usg=AOvVaw3AGsAio5WQitG9fkURhh5j&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj27L3frJCBAXHgf0HHaPoCwoQFnoECBQQAQ&url=https%3A%2F%2Fvowi.fsinf.at%2Fimages%2Ffe%2Ffe7%2FBOKU_Wien-Technologie_der_Brauerei_VO_(Urban)_-_Technologie_der_Brauerei.pdf&usg=AOvVaw3AGsAio5WQitG9fkURhh5j&opi=89978449)
– Überprüfungsdatum 2023-09-04
- [14] RIMBACH, Gerald ; NAGURSKY, Jennifer ; ERBERSDOBLER, Helmut F.: *Lebensmittel-Warenkunde für Einsteiger*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015
- [15] BYLUND, Gösta: *Handbuch der Milch- und Molkereitechnik*. Lund : Tetra Pak, 2019
- [16] FORSCHUNGSANSTALT AGROSCOPE LIEBEFELD-POSIEUX ALP: *TRINKMILCHTECHNOLOGIEN : Eine Übersicht*. ALP forum 2009, Nr. 72 d. Schweiz, 2009
- [17] PESSL, Andrea: *Die Chemie der Milch : Eine theoretische und didaktische Aufbereitung für den Chemieunterricht*. Graz, Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Chemie. Diplomarbeit. 2018
- [18] KRATZ, Marco: *Mikrobiologische Qualitätsparameter und Nachweis der Erhitzung von Konsummilch verschiedener Herstellungsarten*. Gießen, Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Tierärztliche Nahrungsmittelkunde. INAUGURAL-DISSERTATION. 2014
- [19] WESTPHALEN, Gesa: *Verpackungen von Milchpackungen im Wandel der Zeit*. Hamburg, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Life Sciences. Bachelorarbeit. 2013
- [20] ROHWER, Annika: *Erstellung eines Hygienekonzeptes nach HACCP für die Direktvermarktung durch Landwirte am Beispiel von Milchtankstellen*. Hamburg, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Life Sciences. Bachelorarbeit. 2020
- [21] STEINER, Julia: *WERTVERTEILUNG & PREISZUSAMMENSETZUNG ENTLANG DER LEBENSMITTEL- WERTSCHÖPFUNGSKETTE IN ÖSTERREICH : am Beispiel von Frischmilch mithilfe qualitativer ExpertInneninterviews*. Wien, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Marketing und Innovation. Masterarbeit. 2021
- [22] BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG: *Wärmebehandlung von Milch*. URL
<https://www.oekolandbau.de/handel/marketing/sortiment/warenkunde/molkereiprodukte-und-kaese/verarbeitung/waermebehandlung-von-milch/>. – Aktualisierungsdatum: 2023-09-29

- [23] GRUBHOFER, Johann ; HARTL, Josef ; ROGENHOFER, Martin: *Käseherstellung und Käsetechnologie*. 3.0. Wien, 2009
- [24] BERNETT, Linda: *Einfluss des Calciumgehaltes auf die sensorischen Eigenschaften und die Festigkeit von Schnittkäse*. Neubrandenburg, Hochschule Neubrandenburg, Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften. Bachelor-Arbeit. 2010
- [25] LEICHTL, B.: *Warenkunde Käse Der Weg zum Käsewissen*. 9. Aufl. München, 2015
- [26] KULTERER, Konstantin: *Machen Sie Dampf für Energieeffizienz : Einsparungen im Dampfsystem*. Wien
- [27] PFLUGER, Benjamin ; TERSTEEGEN, Bernd ; FRANKE, Bernd: *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland : Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*. 2017
- [28] SPIRAX SARCO LIMITED: *Dampf - Das Energiemedium*. URL https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/introduction/steam---the-energy-fluid?sc_lang=de-DE. – Aktualisierungsdatum: 2023-09-12
- [29] ARNING, J.P ; GOSE, S. ; PETERS, W. ; RIEGER, B. ; SCHMIDT, T. ; SCHOPF, N. ; STERNBERG, J.: *Faustformelsammlung*. 8. Aufl. Bremen, 2014
- [30] VISSMANN WERKE GMBH & CO KG: *Fachreihe Dampfkessel*. Berlin, 2006
- [31] GEYER, Roman ; KNÖTTNER, Sophie ; DIENDORFER, Christian ; DREXLER-SCHMID, Gerwin: *IndustRIES : Energieinfrastruktur für 100 % Erneuerbare Energie in der Industrie*. Wien, 2019
- [32] ARMSTRONG INTERNATIONAL SA (Hrsg.): *Dampf- und Kondensat-Handbuch : Nachschlagewerk für Planer und Betreiber von Dampfanlagen*. Herstal, Belgien, 2011
- [33] VEY, Stephan: *Anlagenplanung in Brauereien und Getränkeabfüllbetrieben unter Verwenden von Standardsoftware*. München, Technischen Universität München, Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik. Dissertation. 2000
- [34] BARTMANN, Dirk: *Modernisierung des Sudhauses der Brauerei C. & A. VELTINS : Energetische und technologische Aspekte*. 2017
- [35] BOSCH INDUSTRIEKESSEL GMBH: *Molkerei NÖM steht unter effizientem Dampf : Referenzbericht Bosch Industrial Effektive Wärmerückgewinnung mit Abgaswärmetauscher*. Gunzenhausen, 2017
- [36] BAEHR, Hans Dieter ; KABELAC, Stephan: *Thermodynamik : Grundlagen und technische Anwendungen*. 14. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009

- [37] EFFENBERGER, Helmut: *Dampferzeugung*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2000
- [38] HERBST, Thomas Peter: *WÄRMEPUMPEN FÜR DIE FERNWÄRMEERZEUGUNG DER SALZBURG AG : PRÜFUNG DER EINSETZBARKEIT EINER WÄRMEPUMPEN- TECHNOLOGIE IM FERNWÄRME-VERBUNDNETZ SALZBURG*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik. Masterarbeit. 2017
- [39] HARTMANN, Hans ; ROßMANN, Paul ; LINK, Heiner ; MARKS, Alexander: *Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelfeuerungen mit Sekundärwärmetauscher : Berichte aus dem TFZ*. Straubing, 2004
- [40] KULTERER, Konstantin ; SCHIRMER, Michael ; SARCO, Spirax ; WALLNER, Michael ; BRANDL, Gabriele: *Auditleitfaden zur Optimierung von Dampfsystemen*. Wien, 2020
- [41] PASCHOTTA, Rüdiger: *RP-Energie-Lexikon : Brennwertkessel*. URL <https://www.energielexikon.info/brennwertkessel.html> – Überprüfungsdatum 2023-09-14
- [42] AYDEMIR, Ali ; DODERER, Hannes ; HOPPE, Felix ; BRAUNGARDT, Sibylle: *Abwärmennutzung in Unternehmen : Studie für das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg*. Karlsruhe, 2019
- [43] PEHNT, Martin (Hrsg.); LANGNIß, Ole (Hrsg.): *Energie im Wandel : Politik, Technik und Szenarien einer nachhaltigen Energiewirtschaft*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2001
- [44] PEHNT, Martin ; BÖDEKER, Jan ; ARENS, Marlene ; JOCHEM, Eberhard ; IDRISOVA, Farikha: *Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung : Bericht im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“*. FKZ 03KSW016A und B. Heidelberg, Karlsruhe, 2010
- [45] BLÖMER, Sebastian ; GÖTZ, Christian ; PEHNT, Martin ; HERING, Dominik ; OCHSE, Susanne ; HESPELER, Sabrina ; RICHTER, Stephan ; THOMASSEN, Peter ; GRYTSCHE, Gerd ; ZOPFF, Claus ; JÄGER, Stefan ; HUBER, Bernd: *EnEff:Wärme - netzgebundene Nutzung industrieller Abwärme (NENIA) : Kombinierte räumlich-zeitliche Modellierung von Wärmebedarf und Abwärmeangebot in Deutschland*. Schlussbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Heidelberg, 2019
- [46] GRUBER-GLATZL, Wolfgang ; KRAINZ, Rebecca ; FLUCH, Jürgen ; MAUTHNER, Franz ; HAMMER, Andreas ; LACHNER, Elisabeth ; KIENBERGER, Thomas ; HUMMEL, Marcus ; MÜLLER, Andreas: *Abwärmekataster III Steiermark : Öffentlicher Kurzbericht*. Graz, 2021

- [47] MEUSER, Jeanette: *Abwärmepotenzial von Industrieöfen : Messtechnische Untersuchung und Simulationsstudie*. Kassel, Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau. Dissertation. 2019
- [48] BRÜCKNER, Sarah: *Industrielle Abwärme in Deutschland : -Bestimmung von gesichertem Aufkommen und technischer bzw. wirtschaftlicher Nutzbarkeit-*. München, Technischen Universität München, Fakultät für Maschinenwesen. Dissertation. 2016
- [49] DERING, Nils ; KRUSE, Antje ; VOGEL, Klaus: *Potenzialstudie Industrielle Abwärme : LANUV-Fachbericht 96*. Recklinghausen, 2019
- [50] GRAHL, Andrea ; JOEST, Steffen ; RAULIEN, Tom: *Erfolgreiche Abwärmennutzung im Unternehmen. : Energieeffizienzpotenziale erkennen und erschließen*. Berlin, 2015
- [51] HIRZEL, Simon ; SONTAG, Benjamin ; ROHDE, Clemens: *Industrielle Abwärmennutzung : Kurzstudie*. Karlsruhe, 2013
- [52] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 50001:2018-12 : Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 50001:2018); Deutsche Fassung EN ISO 50001:2018*. Berlin, 2018-12
- [53] EUROPEAN COMMISSION, JOINT RESEARCH CENTRE, ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLES UNIT: *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*. URL https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/. – Aktualisierungsdatum: 2022-03-01 – Überprüfungsdatum 2023-10-04
- [54] EUROPEAN COMMISSION, JOINT RESEARCH CENTRE ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLES UNIT: *PVGIS user manual*. URL https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual_en – Überprüfungsdatum 2023-09-26
- [55] GOOGLE MAPS/GOOGLE EARTH: *Geo Content, Geoimage Austria : Maxar Technologies, Kartendaten* : Airbus, 2023
- [56] HARTL, Lorenz: *Wie viel Fläche wird für eine 1 kWp PV-Anlage benötigt?* URL <https://www.dachgold.at/pv-lexikon/wie-viel-flaeche-wird-fuer-eine-1-kwp-pv-anlage-benoetigt/>. – Aktualisierungsdatum: 2023-09-25
- [57] BUNDESANSTALT STATISTIK ÖSTERREICH: *STATcube - Statistische Datenbank von Statistik Austria*. URL <https://statcube.at/statistik.at/ext/statcube/jsf/dataCatalogueExplorer.xhtml> – Überprüfungsdatum 2023-10-04

- [58] WALDHOFF, Christian ; RECKZÜGEL, Matthias: *ReWIn – Regionales Wärmekataster Industrie Strategieentwicklung für die systematische Optimierung der Abwärmenutzung in Industrie und Gewerbe*. Osnabrück, 2014
- [59] HEROLD BUSINESS DATA GMBH: *HEROLD DATENBANK*. URL <https://www.herold.at> – Überprüfungsdatum 2023-10-04
- [60] LÄSSIG, Jörg (Hrsg.); SCHÜTTE, Tino (Hrsg.); RIESNER, Wilhelm (Hrsg.): *Energieeffizienz-Benchmark Industrie : Energiekennzahlen für kleinere und mittlere Unternehmen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016
- [61] HASLINGER, Edith ; TUREWICZ, Veronika ; PONWEISER, Karl ; HAMMER, Andreas ; STUCKEY, David ; BIERMAYR, Peter ; BARTAK, Gerhard ; KOCH, Gerfried ; NIEDERBRUCKNER, Richard ; VOGL, Franz: *SANBA – Development of a lowtemperature heating and cooling grid for the future Smart Energy Quarter Baden : Endbericht FTI-Initiative Vorzeigeregion Energie*. 2021 (868655)
- [62] KLIMA- UND ENERGIEFONDS DER ÖSTERREICHISCHEN BUNDESREGIERUNG: *INXS Industrial Excess Heat – Erhebung industrieller Abwärmepotentiale in Österreich*. URL <https://energieforschung.at/projekt/industrial-excess-heat-erhebung-industrieller-abwaermepotentiale-in-oesterreich/> – Überprüfungsdatum 2023-10-04
- [63] GROTE, Lars ; HOFFMANN, Patrick ; TÄNZER, Guillem: *Abwärmenutzung - Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge*. Saarbrücken, 2015
- [64] CRONHOLM, Lars-Ake ; GRÖNKVIST, Stefan ; SAXE, Maria: *Waste heat from industry and buildings (in Swedish: Spillvärme från industrier och lokaler)*. Stockholm, 2009
- [65] LINDQVIST LAND, Anna ; FELDHUSEN, Henrik ; TVÄRNE, Anders ; CRONHOLM, Lars-Ake ; SUNDLÖF, Camilla ; AGRELL, Ingmar ; STRÖMBERG, Mats ; ÅBERG, Anders: *INDUSTRIELL SPILLVÄRME Processer och potentialer*. 2002
- [66] OÖ ENERGIESPARVERBAND: *PHOTOVOLTAIK Strom aus der Sonne*. INFORMATIONSBROSCHÜRE. Linz, 2023
- [67] SCHLADER, Wilhelm ; FECHNER, Johannes ; RIEDMANN, Andreas ; FECHNER, Hubert ; MORITZ, Gerhard: *klimaaktiv Wegweiser zur guten Installation von Photovoltaik-Anlagen*. Wien, 2020

7 ANHANG

Excel-Programm: Rauchgaskondensation

	A	B	C	D
1	Berechnung für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse			
2				
3				
4	spezifische Masse der kondensierten Wassermenge	$\mu_w^{kond}(t_0, p, \lambda)$	0,017	kg/kg BS
5	spezifische Masse des Wasserdampfs	μ_w	0,998	kg/kg BS
6	Grad der Kondensation		1,747	%
7	spezifische Masse trockenes Verbrennungsgas	μ_{tr}^v	11,958	kg/kg BS
8	Gaskonstante trockenes Verbrennungsgas	R_{tr}	0,269	kJ/kg K
9		$\mu_{tr}^v * R_{tr}$	3,211	kJ/kg BS K
10	Sättigungspartialdruck	$p_w^s(t_0)$	12,350	kPa
11	Luftdruck	p	100,000	kPa
12	Abgastemperatur	t_0	50,000	°C
13	Tripelpunktspdruck	p_{tr}	0,612	kPa
14	Gaskonstante Wasserdampf	R_w	0,462	kJ/kg K
15	Gaskonstante trockene Luft	R_L	0,287	kJ/kg K
16	Gaskonstante Kohlendioxid	R_{CO_2}	0,189	kJ/kg K
17	Gaskonstante Schwefeldioxid	R_{SO_2}	0,130	kJ/kg K
18	Gaskonstante Stickstoff*	$R_{N_2^*}$	0,295	kJ/kg K
19	Gaskonstante Sauerstoff	R_{O_2}	0,260	kJ/kg K
20				
21				
22	Für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse	dimensionslose Verhältnisgrößen werden durch Division mit der Brennstoffmasse m_b gebildet		
23	spezifische Masse Kohlenstoff des Brennstoffs	γ_c	0,791	kg/kg BS
24	spezifische Masse Wasserstoff des Brennstoffs	γ_{H_2}	0,044	kg/kg BS
25	spezifische Masse Schwefel des Brennstoffs	γ_s	0,008	kg/kg BS
26	spezifische Masse Stickstoff des Brennstoffs	γ_{N_2}	0,013	kg/kg BS
27	spezifische Masse Sauerstoff des Brennstoffs	γ_{O_2}	0,054	kg/kg BS
28	spezifische Masse Wasser des Brennstoffs	γ_w	0,014	kg/kg BS
29	spezifische Masse Asche des Brennstoffs	γ_A	0,077	kg/kg BS
30				
31	Verbrennungsluftverhältnis	λ	1,100	
32	Wasserbeladung	X	0,052	kg/kg
33	relative Feuchte	φ	0,625	

Abbildung 37: Berechnungsoberfläche für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse (Screenshot)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
37	Dimensionslose Arbeitsgleichungen der Verbrennungsrechnung für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse								
38									
39	Spezifischer Sauerstoffbedarfs	O_{min}	2,406	kg/kg BS					
40									
41	Spezifische Mindestluftmasse	l_{min}	10,398	kg/kg BS					
42									
43	Spezifischer Luftüberschuss	μ_{Lu}	1,040	kg/kg BS					
44									
45	Spezifische Luftfeuchte	μ_{Lf}	0,595	kg/kg BS					
46									
47	Spezifische Masse der feuchten Verbrennungsluft	μ_L	12,033	kg/kg BS					
48									
49	Spezifische Masse des stöchiometrischen Verbrennungsgases	μ^+_v	11,321	kg/kg BS					
50									
51	Spezifische Verbrennungsgasmasse (Abgasmasse)	μ_v	12,956	kg/kg BS					
52									
53									
54	Zusammensetzung des stöchiometrischen Verbrennungsgases				Zusammensetzung des Verbrennungsgases				
55	spezifische Masse stöchiometrisches Kohlendioxid	$\mu^+_{CO_2}$	2,897	kg/kg BS	μ_{CO_2}	2,897	kg/kg BS		
56	spezifische Masse stöchiometrischer Wasserdampf	$\mu^+_{H_2O}$	0,403	kg/kg BS	μ_{H_2O}	0,998	kg/kg BS		
57	spezifische Masse stöchiometrisches Schwefeldioxid	$\mu^+_{SO_2}$	0,016	kg/kg BS	μ_{SO_2}	0,016	kg/kg BS		
58	spezifische Masse stöchiometrischer Stickstoff*	$\mu^+_{N_2^*}$	8,005	kg/kg BS	$\mu_{N_2^*}$	8,804	kg/kg BS		
59	spezifische Masse stöchiometrisches Verbrennungsgas	μ^+_v	11,321	kg/kg BS	μ_{O_2}	0,241	kg/kg BS		
60					μ_v	12,956	kg/kg BS		
61									
62									
63	Massenanteile des stöchiometrischen Verbrennungsgases				Massenanteile Verbrennungsgas				
64	Massenanteil Kohlendioxid	$\xi^+_{CO_2}$	0,256		ξ_{CO_2}	0,224	Massenanteil Kohlendioxid		
65	Massenanteil Wasserdampf	$\xi^+_{H_2O}$	0,036		ξ_{H_2O}	0,077	Massenanteil Wasserdampf		
66	Massenanteil Schwefeldioxid	$\xi^+_{SO_2}$	0,001		ξ_{SO_2}	0,001	Massenanteil Schwefeldioxid		
67	Massenanteil Stickstoff*	$\xi^+_{N_2^*}$	0,707		$\xi_{N_2^*}$	0,680	Massenanteil Stickstoff*		
68					ξ_{O_2}	0,019	Massenanteil Sauerstoff		
69									

Abbildung 38: Grün hinterlegte Ergebnisfelder für Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse (Screenshot)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Für Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung											
2												
3												
4	spezifische Masse der kondensierten Wassermenge	$\mu_w^{kond}(t_0, p, \lambda)$	0,000	kg/kg BS								
5	spezifische Masse des Wasserdampfs	μ_w	1,904	kg/kg BS								
6	Grad der Kondensation		0,020	%								
7	spezifische Masse trockenes Verbrennungsgas	μ_{tr}^v	16,396	kg/kg BS								
8	Gaskonstante trockenes Verbrennungsgas	R_{tr}^v	0,278	kJ/kg K								
9		$\mu_{tr}^v \cdot R_{tr}^v$	4,561	kJ/kg BS K								
10	Sättigungspartialdruck	$p_w^s(t_0)$	16,149	kPa								
11	Luftdruck	p	100,000	kPa								
12	Abgastemperatur	t_0	55,505	°C								
13	Tripelpunktspdruck	p_w	0,612	kPa								
14	Gaskonstante Wasserdampf	R_w	0,462	kJ/kg K								
15	Gaskonstante trockene Luft	R_L	0,287	kJ/kg K								
16	Gaskonstante Kohlendioxid	R_{CO_2}	0,189	kJ/kg K								
17	Gaskonstante Schwefeldioxid	R_{SO_2}	0,130	kJ/kg K								
18	Gaskonstante Stickstoff*	R_{N_2}	0,295	kJ/kg K								
19	Gaskonstante Sauerstoff	R_{O_2}	0,260	kJ/kg K								
20												
21												
22	Für Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung	dimensionlose Verhältnissgrößen werden durch Division mit der Stoffmenge n_b des Brennstoffs gebildet										
23	A_i	a_{C_i}	a_{H_i}	a_{N_i}	a_{S_i}	a_{O_i}	x_i^s	$O_{min,i}$	$x_i^s \cdot O_{min,i}$	B_i	$x_i^s \cdot B_i$	Molmasse [kg/mol]
24	CH ₄	1	4	0	0	0	0,896	2	1,792	3	2,688	0,016
25	C ₂ H ₆	2	6	0	0	0	0,012	3,5	0,042	5	0,06	0,030
26	C ₃ H ₈	3	8	0	0	0	0,006	5	0,03	7	0,042	0,044
27	C ₄ H ₁₀	4	10	0	0	0	0	6,5	0	9	0	0,058
28	C ₅ H ₁₂	5	12	0	0	0	0	8	0	11	0	0,072
29	N ₂	0	0	2	0	0	0,058	0	0	1	0,058	0,028
30	CO ₂	1	0	0	0	2	0,028	0	0	1	0,028	0,044
31							1		1,864		2,876	0,018
32	Verbrennungsluftverhältnis	λ	1,200									
33	Wasserbeladung	X	0,002	kg/kg								
34	relative Feuchte	φ	0,020									
35	molare Wasserbeladung	\dot{X}	0,003	mol/mol								

Abbildung 39: Berechnungsfläche für Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung (Screenshot)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
39	Dimensionslose Arbeitsgleichungen der Verbrennungsrechnung für Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung													
40						Molmasse [kg/mol]								
41	Molarer Sauerstoffbedarf des Brennstoffs	O_{min}	1,864	mol/mol BS										
42														
43	Molare Mindestluftmenge	L_{min}	8,899	mol/mol BS		0,02896								
44														
45	Molarer Luftüberschuss	v_{Lu}	1,780	mol/mol BS										
46														
47	Molare Luftfeuchte	v_{LF}	0,035	mol/mol BS										
48														
49	Molare Verbrennungsluftmenge	v_L	10,713	mol/mol BS										
50														
51														
52	Zusammensetzung und molare Stoffmenge des stöchiometrischen Verbrennungsgases													
53						Molmasse [kg/mol]								
54	molare Stoffmenge stöchiometrisches Kohlendioxid	v'_{CO_2}	0,966	mol/mol BS		0,044								
55	molare Stoffmenge stöchiometrischer Wasserdampf	v'_{H_2O}	1,852	mol/mol BS		0,018								
56	molare Stoffmenge stöchiometrisches Schwefeldioxid	v'_{SO_2}	0,000	mol/mol BS		0,066								
57	molare Stoffmenge stöchiometrischer Stickstoff*	$v'_{N_2^*}$	7,093	mol/mol BS		0,028								
58	molare Stoffmenge stöchiometrisches Verbrennungsgas	v'_V	9,911	mol/mol BS										
59														
60														
61	Molanteile des stöchiometrischen Verbrennungsgases													
62	Molanteil Kohlendioxid	x'_{CO_2}	0,097											
63	Molanteil Wasserdampf	x'_{H_2O}	0,187											
64	Molanteil Schwefeldioxid	x'_{SO_2}	0,000											
65	Molanteil Stickstoff*	$x'_{N_2^*}$	0,716											
66	Summe		1,000											
67														
68														

Molare Stoffmenge und Zusammensetzung des Verbrennungsgases				
			Molmasse [kg/mol]	kg/kg BS
v_{CO_2}	0,966	mol/mol BS	0,044	2,381
v_{H_2O}	1,887	mol/mol BS	0,018	1,904
v_{SO_2}	0,000	mol/mol BS	0,066	0,000
$v_{N_2^*}$	8,500	mol/mol BS	0,028	13,336
v_{O_2}	0,373	mol/mol BS	0,032	0,668
v_V	11,725	mol/mol BS		18,289

Molanteile des Verbrennungsgases		
x_{CO_2}	0,082	Molanteil Kohlendioxid
x_{H_2O}	0,161	Molanteil Wasserdampf
x_{SO_2}	0,000	Molanteil Schwefeldioxid
$x_{N_2^*}$	0,725	Molanteil Stickstoff*
x_{O_2}	0,032	Molanteil Sauerstoff
Summe	1,000	

Abbildung 40: Grün hinterlegte Ergebnisfelder für Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung (Screenshot)

Nach Westen ausgerichtete Dachflächen der Brauerei Hofstetten



Abbildung 41: Westliche Dachfläche A4 [55]



Abbildung 42: Westliche Dachfläche A5 [55]

Nach Osten ausgerichtete Dachflächen der Brauerei Hofstetten



Abbildung 43: Östliche Dachfläche A6 [55]

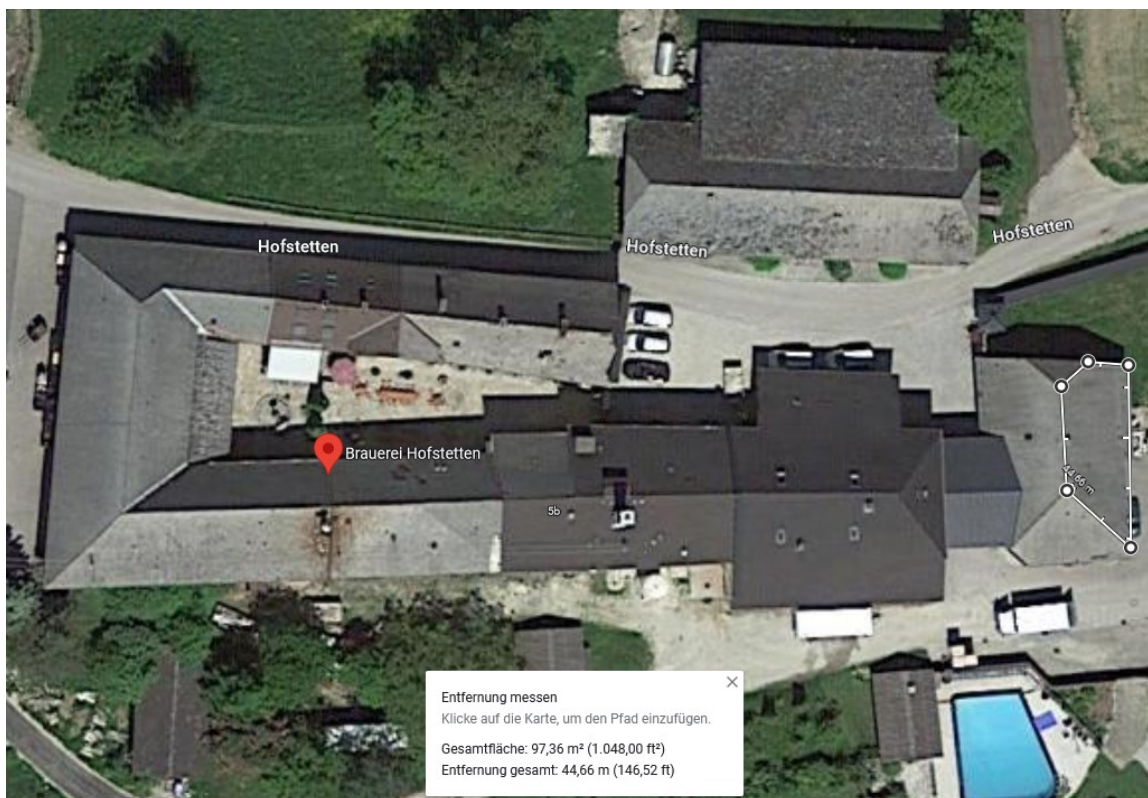


Abbildung 44: Östliche Dachfläche A7 [55]

Von STATcube bezogene Daten bezüglich dem sektoralen Energieverbrauch in Oberösterreich

Erdgas

Tabelle 29: STATcube: Sektoraler Erdgasverbrauch in Oberösterreich [57]

Sektoraler Energetischer Endverbrauch Erdgas in Terajoule	2021	2020	2019
Eisen- und Stahlerzeugung	7 066	8 055	8 379
Chemie und Petrochemie	8 196	8 123	8 319
Nicht Eisen Metalle	2 447	2 117	2 651
Steine und Erden, Glas	6 217	4 973	3 649
Fahrzeugbau	1 033	1 069	1 057
Maschinenbau	1 348	1 138	1 337
Bergbau	466	952	975
Nahrungs- und Genußmittel, Tabak	3 413	2 914	2 882
Papier und Druck	7 034	5 887	6 989
Holzverarbeitung	45	97	85
Bau	363	326	367
Textil und Leder	82	126	137
Sonst. Produzierender Bereich	410	353	381
Eisenbahn	0	0	0
Sonstiger Landverkehr	149	155	146
Transport in Rohrfernleitungen	237	810	601
Binnenschifffahrt	0	0	0
Flugverkehr	0	0	0
Öffentliche und Private Dienstleistungen	1 761	1 401	1 459
Private Haushalte	10 248	9 020	9 248
Landwirtschaft	139	132	173
Produzierender Bereich	38 120	36 130	37 209
Verkehr	386	965	746
Sonstige	12 148	10 553	10 879

Elektrische Energie

Tabelle 30: STATcube: sektoraler elektrischer Energieverbrauch in Oberösterreich [57]

Sektoraler Energetischer Endverbrauch el. Energie	2021	2020	2019
in MWh			
Eisen- und Stahlerzeugung	1 053 575	938 714	1 059 647
Chemie und Petrochemie	1 893 363	1 675 086	1 845 966
Nicht Eisen Metalle	378 846	345 244	414 379
Steine und Erden, Glas	460 082	462 337	466 270
Fahrzeugbau	435 978	406 402	448 968
Maschinenbau	935 508	778 613	891 988
Bergbau	289 357	352 671	399 202
Nahrungs- und Genußmittel, Tabak	606 182	575 144	582 179
Papier und Druck	1 474 616	1 565 824	1 711 647
Holzverarbeitung	183 125	194 222	199 041
Bau	120 115	122 691	125 858
Textil und Leder	61 499	47 491	55 277
Sonst. Produzierender Bereich	545 520	496 770	510 623
Eisenbahn	222 109	219 675	238 387
Sonstiger Landverkehr	314 098	293 413	295 278
Transport in Rohrfernleitungen	6 822	8 363	7 973
Binnenschifffahrt	0	0	0
Flugverkehr	0	0	0
Öffentliche und Private Dienstleistungen	1 985 437	1 803 418	1 910 599
Private Haushalte	3 278 958	3 178 247	3 111 875
Landwirtschaft	297 745	284 435	271 140
Produzierender Bereich	8 437 766	7 961 209	8 711 043
Verkehr	543 029	521 451	541 638
Sonstige	5 562 140	5 266 100	5 293 614