

Abschlussdokumentation

BlueMilk: Kaskadierte und flexible Nutzung von thermischer Energie in milchverarbeitenden Betrieben mit Schwerpunkt auf die Steigerung der Energieeffizienz von Reinigungssystemen



Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Uwe Holzhammer
(uwe.holzhammer@thi.de)

Martin Stöckl, M. Sc.
(martin.stoeckl@thi.de)

Volker Selleneit, M. Eng.
(volker.selleneit@thi.de)

Förderkennzeichen: 281A103616

Datum: 20.09.2023

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zusammenfassung

BlueMilk untersuchte Bereiche zur Steigerung der Effizienz und Flexibilität sowie deren Wechselwirkung – genannt Systemeffizienz: Reinigungsanlagen, intelligente Energiebereitstellung durch Blockheizkraftwerke (BHKW) und Power-to-Heat und die Flexibilisierung der Kühlkette. In den Bereichen wurden Effizienz- und Flexibilitätpotenziale herausgearbeitet. Potenziale zur Flexibilisierung haben einen unterschiedlichen Aufwand bezüglich des Eingriffs in die Produktion.

Flexibilität bei Kühlhäusern als Teil der Kühlkette ergibt sich durch Anpassung der elektrischen Leistung der Verdichter. Eine Emissionsminderung entsteht durch die verminderten Emissionen beim Strombezug und durch eine Anpassung der Lkw-Temperatur in der Logistik.

Effizienzpotenziale der Reinigungsanlagen bestehen in der Anbringung von Isolierungen, Vorwärmen der Leitungen durch Abwärme und Ausnutzen der Abwärme der Fluide aus Abfallstoffen. Eine Verschiebung von Reinigungen bringt Flexibilität, stellt jedoch einen Eingriff in die Produktion dar.

Standortspezifische Effizienzpotenziale der Molkerei wurden ermittelt, Wärmenutzungskonzepte zur Potentialausschöpfung erstellt und in Modelle zur Untersuchung von Flexibilitätskonzepten mittels BHKW-Technik und ergänzenden Technologien mit eingebunden. Als Empfehlung steht ein Konzept mit einem 2 MW_{el}-BHKW ohne E-Kessel und ohne Absorptionskälteanlage. Mit geeigneter Wärmenutzung stellt es eine gute Flexibilisierungslösung bei niedrigen Investitionskosten für den Standort dar.

Abstract

BlueMilk investigated areas in dairies to increase efficiency and flexibility as well as their interaction - called system efficiency: Flexibility in cold stores in the cold chain results from adjusting the electrical power of the compressors. Emission reduction arises in electricity purchase and by adjusting truck temperature in logistics.

Efficiencies potentials in cleaning systems include adding insulation, preheating lines with waste heat, and utilizing waste fluid heat. Adjusting cleaning times brings flexibility but represents an interference with production.

Site-specific efficiency potentials of the dairy were determined, heat utilization concepts for exploiting the potential were developed and included in models for investigating flexibility concepts using CHP technology and supplementary technologies. A concept with a 2 MW_{el} CHP unit without an electric boiler and without an absorption chiller with suitable heat utilization represents a good flexibility solution with low investment costs for the site.

Inhalt

Vorbemerkung.....	12
Projektübersicht.....	12
1 Motivation.....	13
2 Grundlagen	14
2.1 Systemeffizienz	14
2.2 Berechnung des GEF	16
2.3 Korrelation zwischen Day-Ahead-Börsenpreisen und GEF.....	17
3 Gemeinsamer Forschungsansatz	20
4 Systemeffizienzpotenziale der Reinigungsanlagen (CIP)	22
4.1 Funktionsbeschreibung	22
4.2 Prämisse vor Projektbeginn.....	24
4.3 Durchgeführte Arbeiten/Untersuchungen	24
4.3.1 Auswahl der Linien für Rücklaufvolumenstrommessung	24
4.3.2 Erstellung der Vorlauftemperaturen aus den Schrittprotokollen	25
4.3.3 Berechnung Energiebedarf	26
4.3.4 Numerische Simulation der Temperaturänderungen in Leitungsreinigungen.....	29
4.3.5 Zeitreihenerstellung Bedarf.....	33
4.4 Effizienzpotenziale.....	34
4.4.1 Einfluss von Vorwärmen der Rohre auf die Effizienz.....	34
4.4.2 Einfluss von Isolierung auf die Effizienz.....	36
4.4.3 Einfluss von Wärmerückgewinnung (Gully) auf die Effizienz.....	36
4.5 Flexibilitätspotenziale	40
4.5.1 Optimierung Leistungsbedarf.....	40
4.5.2 Überprüfung Verschiebung von Reinigungen	43
4.5.3 Bewertung Verschiebung von Reinigungen.....	44
4.6 Zwischenfazit.....	45
5 Energiebereitstellung mit Blockheizkraftwerk.....	46
5.1 Prämisse vor Projektbeginn/Funktionsbeschreibung	46
5.2 Durchgeführte Arbeiten/Untersuchungen	49
5.2.1 Modellierung Gesamtbetriebliche Energieversorgung	49
5.2.2 Annahmen und Datenbasis.....	50
5.2.3 Forschungsansatz und Methodik.....	53
5.2.4 Erheben vorhandener Messdaten.....	56
5.2.5 Ergänzende Energieverbrauchsmessungen.....	57

5.2.6	Modellierung jährlicher Energiebedarfszeitreihen	59
5.3	Effizienzpotenziale	61
5.3.1	Auffinden von zusätzlichen Wärmesenken und Wärmequellen und Wärmenutzungskonzepte	62
5.3.2	Integration Wärmepumpen	63
5.4	Flexibilitätpotenziale	63
5.4.1	Studiendesign und Fragestellungen	64
5.4.2	Techno-ökonomische Analysen neuer Energieversorgungskonzepte	65
5.4.3	Ergebnisse Betrachtungsjahr 2020	68
5.4.4	Ergebnisse Betrachtungsjahr 2022	69
5.4.5	Ergebnisse Betrachtungsjahr 2021	70
5.4.6	Zwischenfazit	71
5.4.7	Parameterstudien zu restriktiven oder inzentiven förderrechtlichen Rahmenbedingungen	71
5.5	Systemeffizienzpotenziale	72
5.5.1	Einbinden der Wärmenutzungskonzepte	72
5.5.2	Auswahl und Vorschlag von Konzepten	74
5.5.3	Zusammenfassung, Bewertung und Empfehlung	79
6	Systemeffizienzpotenziale der Kühlkette	81
6.1	Funktionsbeschreibung und Modellierung der einzelnen Glieder der Kühlkette	82
6.1.1	Kühltunnel	82
6.1.2	Kühlhaus	85
6.1.3	Lkw-Transport	88
6.2	Temperaturänderung und Wärmeströme der Palette	90
6.3	Simulationsablauf	93
6.4	Flexibilisierung der einzelnen Glieder der Kühlkette	93
6.4.1	Kühltunnel	93
6.4.2	Kühlhaus	95
6.4.3	Lkw-Transport	97
6.5	Ergebnisse Flexibilisierung der einzelnen Glieder	98
6.5.1	Kühltunnel	99
6.5.2	Kühlhaus zur Temperaturhaltung	100
6.5.3	Kühlhaus zur Abkühlung	101
6.5.4	Lkw-Transport	102
6.6	Ergebnisse Flexibilisierung der gesamten Kühlkette	103
6.6.1	Kühlkette mit Kühlhaus zur Temperaturhaltung	103

6.6.2	Kühlkette mit Kühlhaus zur Abkühlung	105
6.7	Einordnung der Ergebnisse	106
6.8	Zwischenfazit	106
7	Zusammenfassung: Systemeffizienz in der Molkerei	108
8	Wissenstransfer	111
8.1	Wissenschaftliche Veröffentlichungen	111
8.2	Beteiligungsworkshops und Online-Konferenzen	113
8.3	Studentische Arbeiten	117
9	Literaturverzeichnis	118

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der in BlueMilk untersuchten Handlungsfelder in Molkereien zur Erreichung der Klimaziele	13
Abbildung 2: Systemeffizienz besteht auf Energieeffizienz und Flexibilität.....	14
Abbildung 3: Vier Aspekte der Systemeffizienz.....	15
Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Aspekten und den unterschiedlichen Indikatoren ...	15
Abbildung 5: Auflistung der übergeordneten und bestimmten spezifischen Indikatoren für die Aspekte der Flexibilität	16
Abbildung 6: Energieträger und CO ₂ -Emissionsfaktor des Strommix (GEF) für Ende Januar 2023 (Agora Energiewende 2022)	16
Abbildung 7: GEF (CO ₂ -Emissionsfaktor) und Strompreis (Agora Energiewende 2022)	17
Abbildung 8: Korrelationskoeffizient für die vergangenen Jahre zwischen Day-Ahead-Börsenpreis und GEF (Fuchs 2021).....	18
Abbildung 9: EUA December Future Prices für die vergangenen Jahre (Fotina 2021) basierend auf Daten von (EEX 2023)	19
Abbildung 10: Fokussierte Teilbereiche in BlueMilk.....	20
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Reinigungsanlage CIP CC	22
Abbildung 12: Darstellung der einzelnen Phasen/Schritte eines gesamten Reinigungsprozesses	23
Abbildung 13: Durchgeführte Reinigungen der Reinigungsanlage CIP CC für den Zeitraum 13.07.2020 bis 20.07.2020.....	23
Abbildung 14: Kumulierte normierte Reinigungsdauer der sortierten Reinigungsdauern der Reinigungsanlage CIP CC im Monat August 2019	25
Abbildung 15: Erstellung einer synthetischen Vorlauftemperatur aus gemessenen Tanktemperaturen und Schrittprotokoll	26
Abbildung 16: Energiebedarf Vorlauf und Energieinhalt Rücklauf für Reinigungen der Linie CCL2	28
Abbildung 17: Energiebedarf für Reinigungen der Linie CCL2	28
Abbildung 18: Leitungsquerschnitt mit angedeuteten Gitterpunkten für eine 1-D-Wärmeleitung	29
Abbildung 19: Prinzipdarstellung der Aufteilung der gesamten Rohrleitungslänge.....	31
Abbildung 20: Rohrsegment mit auftretenden Wärmeströme	31
Abbildung 21: Leistungsbedarf Nachheizen für CIP CC im Monat Juli 2021	34
Abbildung 22: Leistungsbedarf Nachheizen für CIP CC in der Woche KW30 2021	34
Abbildung 23: Temperatur im Vor- und Rücklauf mit angedeuteten Änderungen durch Frischwassererwärmung aus Abwärme	35
Abbildung 24: Vergleich der Energieaufteilung im Vor- und Rücklauf bei einer Frischwassererwärmung	35
Abbildung 25: Thermische Verluste in % für unisolierte Rohre und drei verschiedene Isolierungsdicken.....	36

Abbildung 26: Temperaturen des Vor- und Rücklaufs mit Hervorhebung (rot) der Gully-Phase im Rücklauf.....	37
Abbildung 27: Übersicht der aller verschiedenen Phasen der Reinigungen im Monat Juli 2021 und Hervorhebung der Gully-Phasen.....	37
Abbildung 28: Relative Häufigkeitsverteilung der Dauer der einzelnen Gully-Phasen im Monat Juli 2021	38
Abbildung 29: Relative Häufigkeitsverteilung der Temperaturen der einzelnen Gully-Phasen im Monat Juli 2021	38
Abbildung 30: Durchschnittliche Temperatur, wenn Gully-Phasen täglich in Tank gesammelt werden.....	39
Abbildung 31: Tägliches energetisches Potenzial, wenn Gully-Phasen täglich in Tank gesammelt werden	39
Abbildung 32: Reinigungsübersicht und dazugehöriger Leistungsbedarf für das Referenzszenario	41
Abbildung 33: Schematische Darstellung der Verschiebung der Reinigungen	41
Abbildung 34: Reinigungsübersicht und dazugehöriger Leistungsbedarf für das Spitzenlast-Szenario	42
Abbildung 35: Reinigungsübersicht und dazugehöriger Leistungsbedarf für das gleichmäßiger-Bedarf-Szenario	42
Abbildung 36: Modernisierte Energieversorgung der Andechser Molkerei mit der Lösung Eigenenergieversorgung	47
Abbildung 37: Flexibilisierte Energieversorgung schematisch angelehnt an die Umsetzung im Modell.....	48
Abbildung 38: schematische Darstellung eines Anlageneinsatzplanes orientierend am Strombörsenpreis.....	53
Abbildung 39: Ablaufplan zur Bestimmung der Einsatzreihenfolge der Energieerzeugungsanlagen (vereinfacht)	54
Abbildung 40: WGK-Diagramm zur Erklärung der Modellierungsmethode für die Zuschlagszeitreihe	56
Abbildung 41: Beispiel einer Wärmemengenmessung installiert an einem Apparatezulauf ..	58
Abbildung 42: Unterschiedliche/ sich nicht vollständig überschneidende Zeitabschnitte	59
Abbildung 43: Beispiel 1 - Überlappende Zeitstempel	60
Abbildung 44: Beispiel 2 - Abweichende Zeitstempel im Produktionslogbuch	60
Abbildung 45: Beispiel 3 - keine einheitliche Leistung von gleichlangen Blöcken.....	60
Abbildung 46: Beispiel 4 - keine einheitliche Leistung von Produktsorten	60
Abbildung 47: Lösungsansatz - Projektion des zeitlich gewichteten Mittelwertes	61
Abbildung 48: Ausschnitt einer Jahreszeitreihe in einheitlichem Reihentyp	61
Abbildung 49: Studiendesign: Modellierungs- und Untersuchungspfade	65
Abbildung 50: schematische Darstellung der Verknüpfung beider Modelle und der Weiterverwendung von Zwischenergebnissen.....	66

Abbildung 51: Varianten 2020	69
Abbildung 52: Energieversorgungskosten BHKW-Variantenvergleich 2022	69
Abbildung 53: Energieversorgungskosten BHKW-Variantenvergleich 2021	70
Abbildung 54: betriebliche CO ₂ Emissionen BHKW-Variantenvergleich 2021	70
Abbildung 55: Verringerung der ungenutzten „0-Cent-Wärme“ durch die Nutzungskonzepte	73
Abbildung 56: Verringerung der CO ₂ Emissionen durch die Nutzungskonzepte.....	73
Abbildung 57: Energieversorgungskosten im Gesamtkonzeptvergleich - Betrachtungszeitraum 2020	75
Abbildung 58: Energieversorgungskosten im Gesamtkonzeptvergleich - Betrachtungszeitraum 2021	75
Abbildung 59: Energieversorgungskosten im Gesamtkonzeptvergleich - Betrachtungszeitraum 2022	76
Abbildung 60: CO ₂ -Emissionen im Gesamtkonzeptvergleich - Betrachtungszeitraum 2020 .	77
Abbildung 61: CO ₂ -Emissionen im Gesamtkonzeptvergleich - Betrachtungszeitraum 2021 .	78
Abbildung 62: CO ₂ -Emissionen im Gesamtkonzeptvergleich - Betrachtungszeitraum 2022 .	78
Abbildung 63: Schematische Darstellung der Kühlkette Variante 1	81
Abbildung 64: Schematische Darstellung der Kühlkette Variante 2	81
Abbildung 65: Verlauf der Palettentemperatur über die Zeit/Länge des Kühltunnels.....	83
Abbildung 66: Gesamtkühlbedarf der Vorkühlung für den Monat Mai 2021.....	85
Abbildung 67: Im Modell des Lkw-Transports berücksichtigte Wärmeströme (eigene Anpassungen; Original: (Idda 2023))	88
Abbildung 68: Palette mit Joghurtbechern innerhalb von Verpackungskartonagen.....	91
Abbildung 69: Darstellung der Temperaturverteilung innerhalb der Palette.....	92
Abbildung 70: Lufteintrittstemperaturen bei hohen und niedrigen spezifischen Emissionen für verschiedene Flexibilisierungsstrategien.....	94
Abbildung 71: Flexibilisierung des Kühlhauses	95
Abbildung 72: Gegenüberstellung der Variation der Lufttemperatur im Kühlhaus und der Variation der Produktgrenztemperaturen	97
Abbildung 73: Drei verschiedene Kombinationen aus Palettentemperatur bei Auslagerung und Lkw-Laderaumtemperatur zur Erreichung der gleichen Palettentemperatur bei Ende der Auslieferung	98
Abbildung 74: Relative CO ₂ -Emissionsänderung gegenüber Ref in % für den Monat Mai 2021	99
Abbildung 75: Relative Strombedarfsänderung gegenüber Ref in % für den Monat Mai 2021	99
Abbildung 76: Ergebnisse für Flexibilisierung des Kühlhauses zur Temperaturhaltung für Mai 2021	100

Abbildung 77: Ergebnisse für Flexibilisierung des Kühlhauses zur Abkühlung für Mai 2022	101
Abbildung 78: Relative CO ₂ -Emissionsänderung gegenüber der Referenz in % für den Testdatensatz Mai	102
Abbildung 79: Ergebnisse der relativen Änderung der kühlungsbedingten Emissionen der Kühlkette in % für eine Endtemperatur bei Auslieferung von 4,3 °C für den Untersuchungszeitraum Mai 2021	103
Abbildung 80: Gegenüberstellung der Aufteilung der Emissionen auf die einzelnen Glieder der Kühlkette mit Vorkühlung für normale Betriebsweise und eine mögliche Flexibilisierung für den Untersuchungszeitraum Mai 2021	104
Abbildung 81: Ergebnisse der relativen Änderung der kühlungsbedingten Kosten der Kühlkette in % für eine Endtemperatur bei Auslieferung von 4,3 °C für den Untersuchungszeitraum Mai 2021	105
Abbildung 82: Gegenüberstellung der Aufteilung der Emissionen auf die einzelnen Glieder der Kühlkette ohne Vorkühlung für normale Betriebsweise und eine mögliche Flexibilisierung für den Untersuchungszeitraum Mai 2022	106
Abbildung 83: Zusammenfassung der Ergebnisse	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anteile bestimmter Reinigungslinien an der gesamten Reinigungszeit der Anlage CIP CC im Monat August 2019	24
Tabelle 2: Kennzahlen für Lastverschiebung von Reinigungen für ausgewählte Szenarien..	43
Tabelle 3: Korrelationskoeffizient für verschiedene Szenarien	44
Tabelle 4: Ergebnisse der Lastverschiebung für verschiedene Szenarien	45
Tabelle 5: Modellkomponenten und deren Parametrierung sowie weiterer Modellumsetzungen	51
Tabelle 6: Dem Modell zugrundeliegende Energiebedarfsdaten	51
Tabelle 7: Im Modell integrierte wirtschaftliche Parameter.....	52
Tabelle 8: Datenlücken und Lösungsansätze zur Behebung	57
Tabelle 9: Messstellenliste der Wärmeverbraucher	58
Tabelle 10: Beschreibung der entwickelten Wärmenutzungskonzepte	63
Tabelle 11: Positionsaufstellung und -beschreibung der Investitionskostenrechnung	67
Tabelle 12: Kriterien zur Festlegung der rahmenbedingten ökonomischen Parameter für Jahresszenarien der Gesamtkonzepte.....	72
Tabelle 13: Grundparameter und -annahmen zu den ausgewählten Konzepten.....	74
Tabelle 14: Anlagenkonfiguration und Wärmenutzung der ausgewählten Konzepte.....	75
Tabelle 15: Investitionskosten und Ersparnisse beim Betrieb im Gesamtkonzeptvergleich ..	76
Tabelle 16: dynamische Investitionskennzahlen im Gesamtkonzeptvergleich.....	76
Tabelle 17: jährliche Vollbenutzungsstunden des BHKW im Gesamtkonzeptvergleich.....	78
Tabelle 18: Bewertungsmatrix der Gesamtkonzepte nach verschiedenen Kriterien und Jahren	79
Tabelle 19: Auflistung der verschiedenen Flexibilisierungen des Kühltunnels.....	94
Tabelle 20: Temperatur der Palette nach dem Kühltunnel für bestimmte Luft Eintrittstemperaturen	95
Tabelle 21: Betriebsweise der Flexibilisierung des Kühlhauses.....	96
Tabelle 22: Zusammenfassung der Ergebnisse für Reinigungsanlagen	108
Tabelle 23: Zusammenfassung der Ergebnisse für Energiebereitstellung AMS	108
Tabelle 24: Zusammenfassung der Ergebnisse für Kühlhaus / Hochregallager	109

Abkürzungsverzeichnis

AK-Anlage	Absorptionskälteanlage
AKM	Absorptionskältemaschine
AMS	Andechser Molkerei Scheitz
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BHKW	Blockheizkraftwerk
CIP	Cleaning-in-Place
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbaren-Energien-Gesetz
FMD	Finite-Differenzen-Methode
GEF	Grid-Emission-Factor
HRL	Hochregallager
KK-Anlage	Kompressionskälteanlage
KKM	Kompressionskältemaschine
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KTL	Kühltunnel
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LET	Luft Eintrittstemperatur
Lkw-T.	Lkw-Laderaumtemperatur
MS	Messstelle
PGT	Produktgrenztemperaturen
Prod.-T.	Produkttemperatur
SE	Systemeffizienz
uPGT	untere Produktgrenztemperatur
uZieltemp	untere Zieltemperatur der Luft
Vbh	Vollbenutzungsstunden
WGK	Wärmegestehungskosten
WP	Wärmepumpe

Vorbemerkung

Die vorliegende Dokumentation zum Verbundvorhaben „*BlueMilk*“ dient als Ergänzung zu den Sachberichten der Schlussberichte der jeweiligen Teilprojekte. Dieser vorliegende Bericht geht sowohl näher auf die angewendeten Methoden als auch auf eine ausführlichere Beschreibung der Ergebnisse des Projekts ein.

Weitere Informationen zum Projekt sind dem Schlussbericht zu entnehmen. Sobald dieser Bericht veröffentlicht wird, ist dieser mit dem Suchbegriff „281A103616“ in der Projektdatenbank des Projektträgers (ptble) zu finden:

https://www.ble.de/DE/Projektfoerderung/Projektsuche/Suche_node.html

Die Förderung des Vorhabens erfolgte aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgte über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programmes zur Innovationsförderung.

Projektübersicht

Titel:	BlueMilk: Kaskadierte und flexible Nutzung von thermischer Energie in milchverarbeitenden Betrieben mit Schwerpunkt auf die Steigerung der Energieeffizienz von Reinigungssystemen
Laufzeit:	01.07.2018 bis 31.12.2022
Gefördert durch:	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
Projektträger:	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (ptble)
Projektverbund:	Technische Hochschule Ingolstadt Zott SE & Co. KG Andechser Molkerei Scheitz GmbH Lemmermeyer GmbH & Co. KG AGO GmbH Energie + Anlagen
Medienpartner:	Deutsche Molkerei Zeitung Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V.

1 Motivation

Die Energiewende stellt ein Ziel der 17 globalen Ziele für eine bessere Zukunft dar, zu denen sich die Weltgemeinschaft völkerrechtlich verpflichtet hat. Diese Transformation zu einer nachhaltigen Weltgemeinschaft gilt als die größte gesellschaftliche Veränderung seit der Industrialisierung und der Sesshaftwerdung der Menschheit. Entsprechend einschneidend werden die nächsten Jahre auch die Veränderungen im Bereich der Energieversorgung als auch im Bereich der Energienutzung sein. Aus wissenschaftlicher Perspektive ergeben sich klare Handlungsfelder, um die CO₂-Emissionen massiv zu reduzieren (zusätzlich zu weiteren nicht benannten Handlungsfeldern):

- relevante Steigerung der Energieeffizienz,
- umfangreicher Ausbau von EE-Erzeugung,
- intelligente Eigenenergiebereitstellung und
- flexible Energienutzung.

Das Forschungsprojekt um BlueMilk untersuchte Konzepte in diesen eben benannten Handlungsfeldern, damit die Unternehmen einen Beitrag zur Treibhausgasminderung im Gesamtenergiesystem erreichen, umso ein aktiver Teil der Energiewende zu werden (siehe auch Abbildung 1).

Treibhausgasminderung im Gesamtenergiesystem durch **systemeffiziente Konzepte** in Molkereien als ein Beitrag zur Energiewende

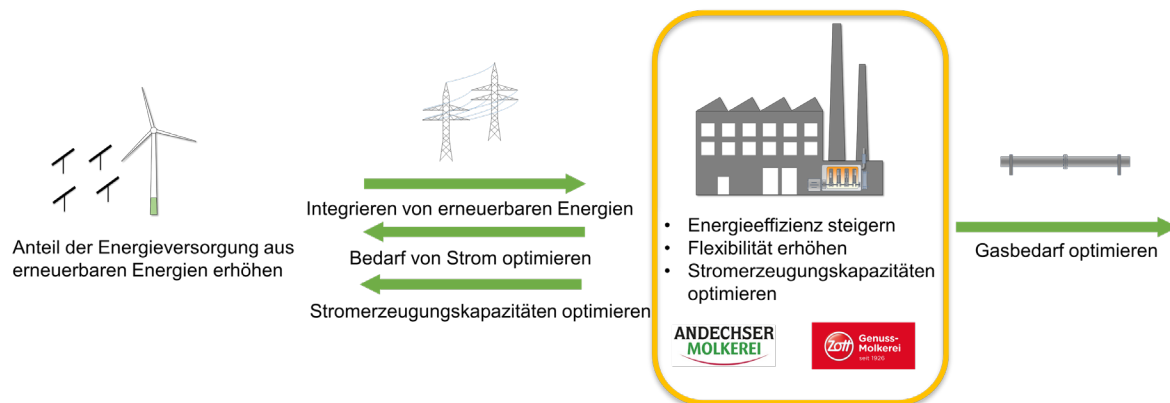


Abbildung 1: Darstellung der in BlueMilk untersuchten Handlungsfelder in Molkereien zur Erreichung der Klimaziele

2 Grundlagen

Im Folgenden werden die Grundlagen zu Systemeffizienz, Flexibilität und dem GEF und dessen Korrelation mit dem Strombörsenpreis beschrieben.

2.1 Systemeffizienz

Die Systemeffizienz beschreibt die Wechselwirkung zwischen Energieeffizienz und Flexibilität (siehe Abbildung 2).

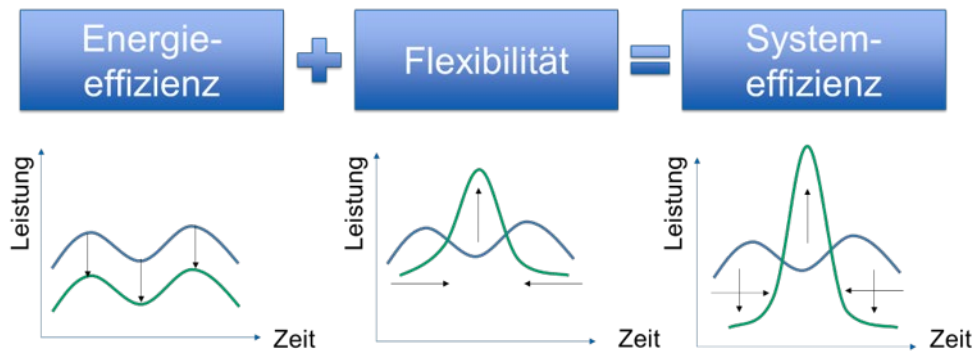


Abbildung 2: Systemeffizienz besteht auf Energieeffizienz und Flexibilität

Systemeffiziente Konzepte bestehen aus Steigerung der Energieeffizienz und Flexibilität, damit Energiewandlungsanlagen/Prozesse insgesamt weniger Emissionen und Energiekosten verursachen. Dabei steht nicht allein die absolute Energiemenge im Vordergrund, sondern wie viele Emissionen dabei verursacht werden (siehe auch 2.2 Berechnung des GEF).

Ein weiterer Ansatzpunkt ist die gezielte Nutzung von Eigenstromerzeugungskapazitäten in Situationen, in denen der Energiebezug aus dem öffentlichen Stromnetz besonders emissionsreich ist. Dies kann sowohl zur Einspeisung in die öffentliche Versorgung als auch zur Deckung des eigenen Bedarfs genutzt werden. Der Wechsel des Energieträgers spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle. Durch die Erhöhung der Sektorenkopplung, also der Integration von EE-Strom in andere Energiesektoren, können Synergien geschaffen und die Energieeffizienz weiter gesteigert werden. Abschließend ist es unerlässlich, die Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Effizienz zu bewerten. Beide Aspekte sind miteinander verknüpft und können, wenn sie in einem ausgewogenen Verhältnis stehen, zu einer erheblichen Steigerung der Gesamteffizienz des Energiesystems beitragen. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, sowohl Flexibilität als auch Effizienz in künftigen Energiestrategien zu berücksichtigen.

Um Flexibilität auf technischer Ebene vollumfänglich zu beschreiben, ist die Berücksichtigung von drei Aspekten notwendig. Sobald einer dieser Aspekte nicht berücksichtigt wird, ist die Beschreibung der Flexibilität weniger präzise.

Aus der Sicht des Energiesystems bestehen die drei Aspekte der Flexibilität in den Anforderungen, die das System an eine Energiewandlungsanlage stellt.

Die Beschreibung der Flexibilität von Konversionsanlagen kann aus diesen systemischen Anforderungen abgeleitet werden. So bestehen für die Konversionsanlage die drei Aspekte in den Fähigkeiten der Anlage, die Anforderungen des Energiesystems erfüllen zu können.

Die Abbildung 3 zeigt die vier Aspekte der Systemeffizienz.

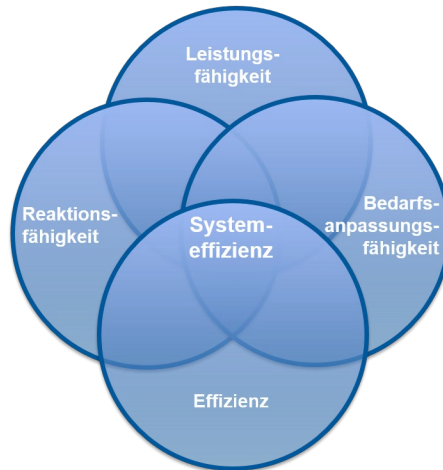


Abbildung 3: Vier Aspekte der Systemeffizienz

Die drei Aspekte der Flexibilität (Leistungsfähigkeit, Reaktionsfähigkeit und Bedarfsanpassungsfähigkeit) können dabei wie folgt beschrieben werden:

- Die **Leistungsfähigkeit** beschreibt die Fähigkeit eine bestimmte Leistung zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. über einen bestimmten Zeitraum dem Energiesystem zur Verfügung zu stellen.
- Der Aspekt der zeitlichen Änderung der Leistungsbereitstellung wird im Wesentlichen durch die Änderungsraten der Leistung definiert und spiegelt sich in der **Reaktionsfähigkeit** wider.
- Vervollständigt wird die Beschreibung der Flexibilität durch den Aspekt der **Bedarfsanpassungsfähigkeit**, da die Leistungsfähigkeit noch keine Aussage darübermacht, über welchen Zeitraum am Stück die Leistung bereitgestellt werden kann. Die Bedarfsanpassungsfähigkeit beschreibt die Dauer einer Leistungsbereitstellung ohne Unterbrechung.

Die drei Aspekte können weiter in Übergeordnete, spezifische und abgeleitete Indikatoren unterteilt werden (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5).

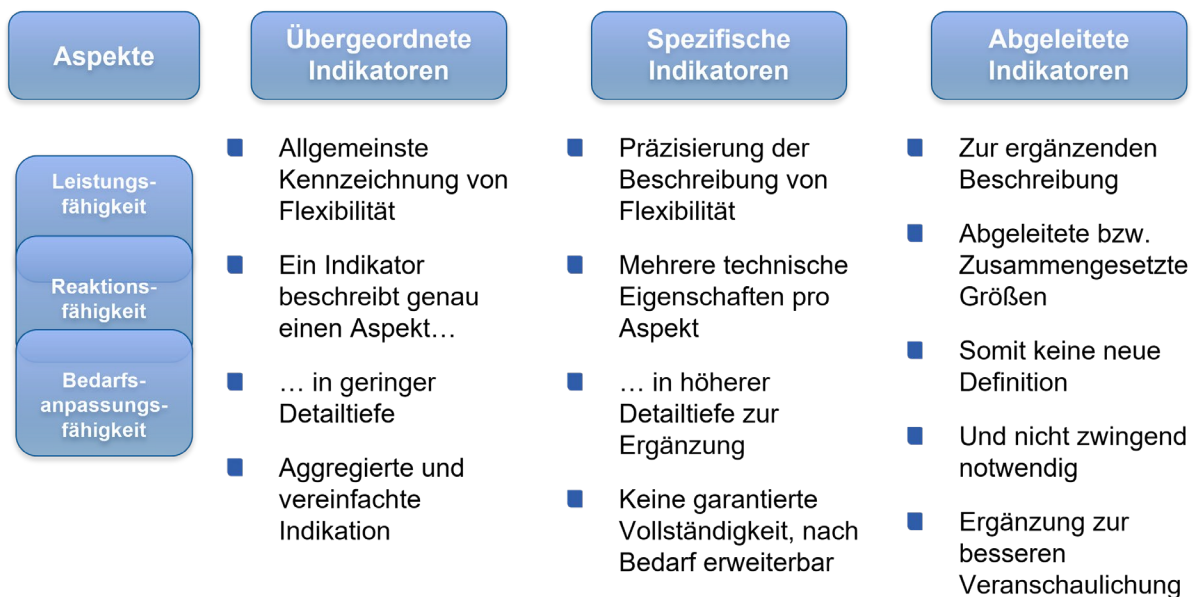


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Aspekten und den unterschiedlichen Indikatoren

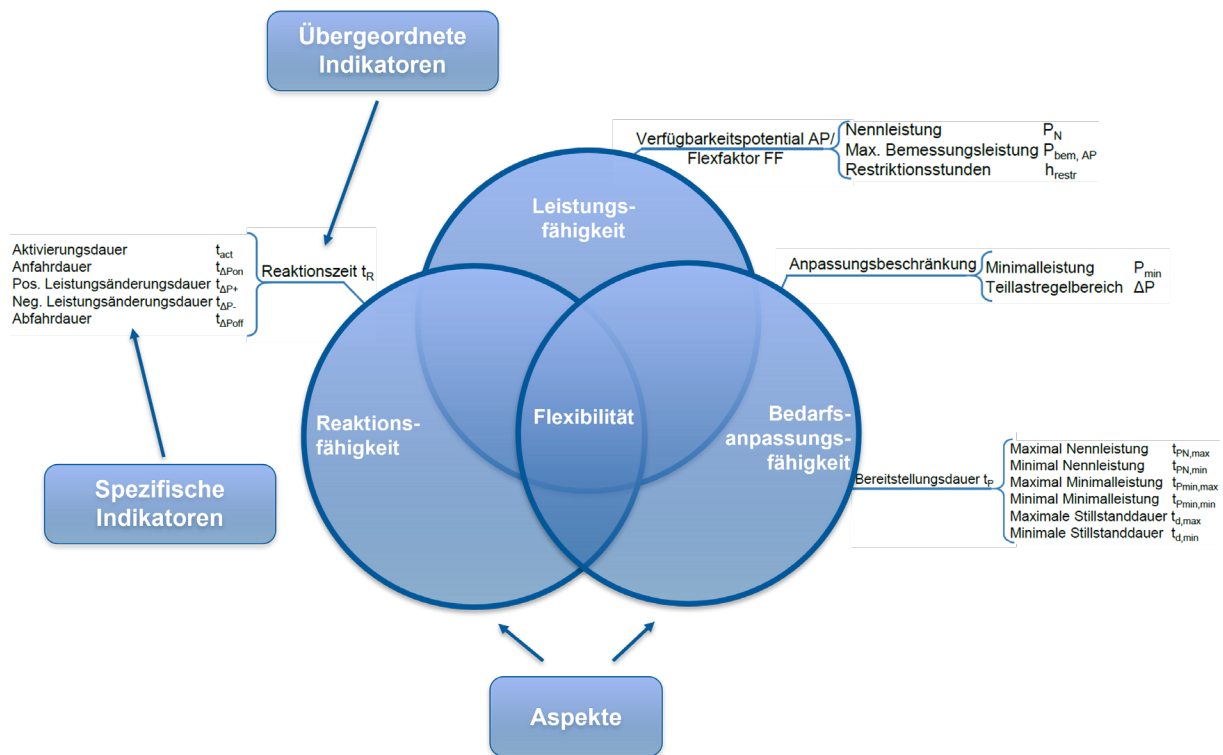


Abbildung 5: Auflistung der übergeordneten und bestimmten spezifischen Indikatoren für die Aspekte der Flexibilität

Weitere Informationen zu Flexibilität und Systemeffizienz sind in den Veröffentlichungen (Selleneit et al. 2020e) und (Selleneit et al. 2020a) zu finden.

2.2 Berechnung des GEF

Die Stromerzeugung für Ende Januar 2023 (siehe Abbildung 6) zeigt beispielhaft, dass unterschiedliche Erzeuger (Energieträger) die Stromnachfrage decken: Konventionelle Erzeuger ebenso wie erneuerbare Energien. Daraus resultiert ein schwankender CO_2 -Emissionsfaktor des Strombezugs aus dem öffentlichen Netz (lila Kurve in Abbildung 6).

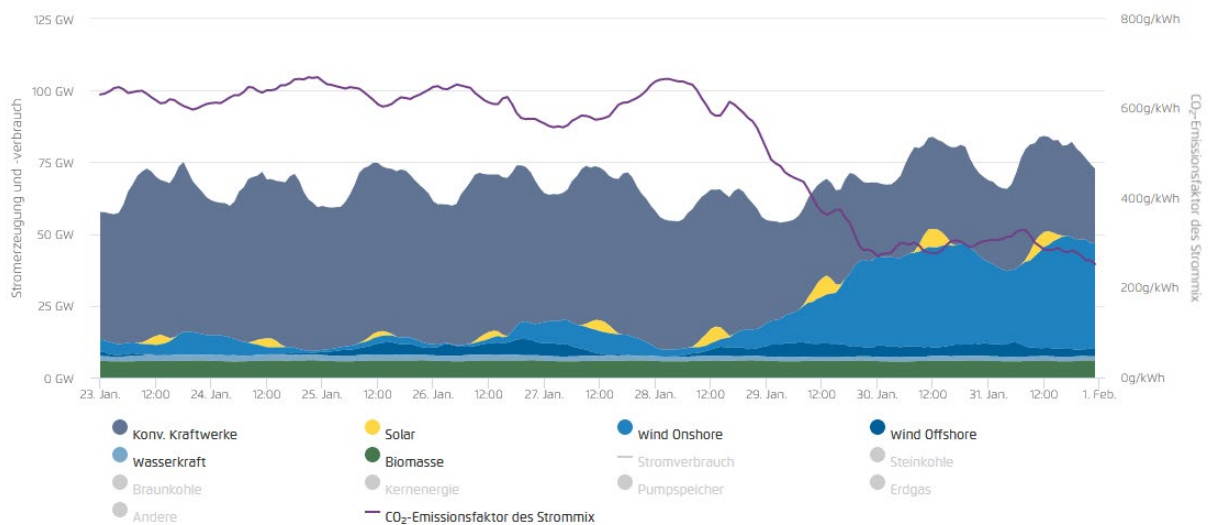


Abbildung 6: Energieträger und CO_2 -Emissionsfaktor des Strommix (GEF) für Ende Januar 2023 (Agora Energiewende 2022)

Jeder Energieträger weist unterschiedliche Emissionsfaktoren (Emissionen für erzeugten Strom in g / kWh). Beispiele für einige Emissionsfaktoren (Rembold 2020):

- Erdgas: 352,24 g/kWh
- Steinkohle: 733,51 g/kWh
- Braunkohle: 1.037,72 g/kWh
- EE: 0 g/kWh

In jeder Stunde setzt sich die Stromerzeugung aus unterschiedlichen Mengen an Energieträgern zusammen. Je nach dieser Zusammensetzung schwankt der Grid-Emissions-Factor (GEF) für den Strombezug in einem bestimmten Zeitraum. Die Berechnung des GEF für einen bestimmten Zeitraum basiert grundsätzlich auf der Gleichung (1), d. h. auf der nach Erzeugung gewichteten Berechnung des mittleren Emissionsfaktoren:

$$GEF = \frac{\sum \text{Energienmenge Energieträger} \cdot \text{Emissionsfaktor Energieträger}}{\sum \text{Energienmenge Energieträger}} \quad (1)$$

Unterschiede in der Berechnung des GEF bestehen in der Verwendung, welche Bilanzgrenze die Emissionsfaktoren umfassen (direkte, indirekte Emissionen oder der gesamte Lebenszyklus; CO₂ oder CO₂-Äquivalente) sowie in der Gesamtenergiemenge (z. B. ob Leitungsverluste, Pumparbeit, usw. herausgerechnet werden oder nicht).

2.3 Korrelation zwischen Day-Ahead-Börsenpreisen und GEF

Abbildung 7 zeigt den Day-Ahead-Börsenpreis (blau, rechte Achse) in EUR/MWh vom 01.10.2023 bis 09.10.2023 und den CO₂-Emissionsfaktor (GEF) für den gleichen Zeitraum (rot, rechte Achse). Es ist zu sehen, dass beide Kurven dynamisch sind und sich über den Stunden- und Wochenverlauf ändern.

Der schwankende Börsenpreis, wie aus der Abbildung 7 ersichtlich, besitzt eine erhebliche Relevanz für wirtschaftliche Anreize. Bei niedrigen Preisen besteht für Verbraucher die Möglichkeit, ihre Leistungsaufnahme zu erhöhen, um von den günstigeren Konditionen zu profitieren und bei hohen Preisen ihre Leistungsaufnahme wieder zu reduzieren.

Im Gegensatz dazu bieten hohe Strompreise Erzeugungsanlagen die Chance, durch Einspeisung in das öffentliche Stromnetz hohe wirtschaftliche Erlöse zu erzielen.

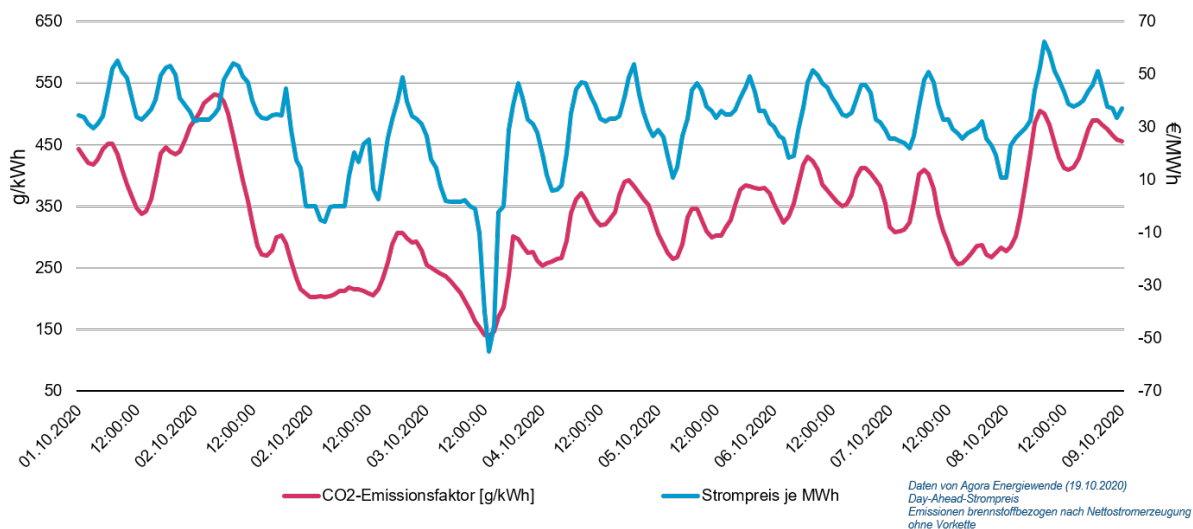


Abbildung 7: GEF (CO₂-Emissionsfaktor) und Strompreis (Agora Energiewende 2022)

Analog zu den wirtschaftlichen Anreizen durch Börsenpreisschwankungen können Verbraucher und Erzeuger die Schwankungen der spezifischen Emissionen gezielt ausnutzen. Bei niedrigen spezifischen Emissionen können Verbraucher ihre Leistungsaufnahme aus dem öffentlichen Stromnetz erhöhen, damit später – bei höheren spezifischen Emissionen – die Leistungsaufnahme wieder reduziert werden kann. Die Energiebereitstellung ist insgesamt sichergestellt, jedoch bei insgesamt weniger absoluten Emissionen. Andererseits, wenn hohe spezifische Emissionen vorherrschen, bietet dies Erzeugungsanlagen mit relativ gesehen niedrigen Emissionswerten, wie zum Beispiel Erdgas-BHKW (Blockheizkraftwerke), die Möglichkeit, ins Netz einzuspeisen. Solche Anlagen können aufgrund ihrer vergleichsweise geringeren Emissionen bevorzugt werden, um das Gesamtemissionsprofil des Stromnetzes zu verbessern. Dies betont die Relevanz von flexiblen und adaptiven Strategien im Energiemanagement, die sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Faktoren berücksichtigen.

Die schwankenden Strombörsenpreise bieten wirtschaftliche Anreize, die schwankenden spezifischen Emissionen des Strombezugs aus dem öffentlichen Stromnetz bieten einen ökologischen Anreiz. Wie in Abbildung 7 bereits zu erkennen ist, verlaufen beide Kurven vereinfacht dargestellt „synchron“. Dies bedeutet, dass niedrige Strombörsenpreise meist mit niedrigen spezifischen Emissionen einhergehen.

Die Pearson-Korrelation (Fahrmeir et al. 2016) zwischen den spezifischen Emissionen (GEF) und dem Börsenpreis ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Korrelation ist im Laufe der Jahre angestiegen (Untersuchungszeitraum bis Ende 2020).

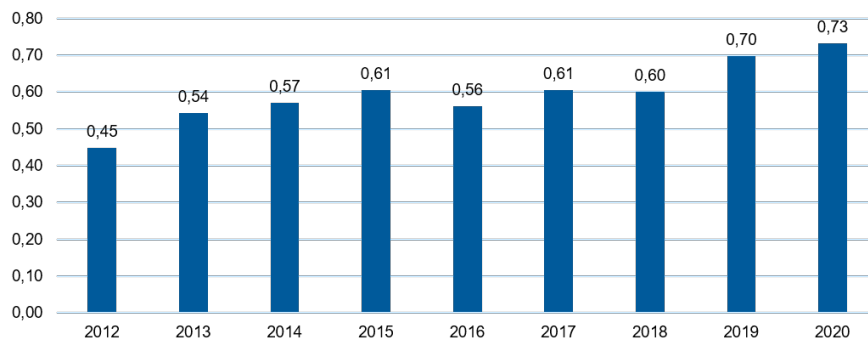


Abbildung 8: Korrelationskoeffizient für die vergangenen Jahre zwischen Day-Ahead-Börsenpreis und GEF (Fuchs 2021)

Der Grund für die positive Korrelation ist der europäische Emissionshandel (EU-ETS). Abbildung 9 zeigt den EUA December Future Price für die vergangenen Jahre (Untersuchungszeitraum bis Ende 2020).



Abbildung 9: EUA December Future Prices für die vergangenen Jahre (Fotina 2021) basierend auf Daten von (EEX 2023)

Durch Zeitreihenanalyse (Fotina 2021) kann eine langfristige positive Beziehung zwischen Strombörsenpreise und Zertifikatspreisen, sowie eine langfristig negative Beziehung zwischen Strombörsenpreise und EE-Anteil im Strommix gezeigt werden. Dies bedeutet, dass der Emissionshandel (Zertifikatspreise) für einen Preisanstieg bei den Strombörsenpreisen verantwortlich ist, aber auch, dass die Erneuerbaren Energien (EE-Anteil im Strommix) für niedrigere Strombörsenpreise verantwortlich sind.

Die Analyse zeigt, dass eine Ausrichtung des Strombezugs nach dem Börsenpreis nicht nur finanzielle Vorteile durch geringere Energiekosten mit sich bringt (sofern dies Teil der Energiebeschaffungsstrategie ist), sondern auch zu einer Verringerung der verursachten Emissionen führt. Dies liegt daran, dass Zeiten mit niedrigen Börsenstrompreisen oft mit einer hohen Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien korrelieren. Somit können Unternehmen, die ihren Strombezug an den Börsenpreisen ausrichten, von einem günstigeren und gleichzeitig umweltfreundlicheren Energiemix profitieren. Parallel dazu zeigt sich, dass bei einer Ausrichtung des Strombezugs nach dem GEF die Kosten des Strombezugs deutlich gesenkt werden können. Dieser Ansatz konzentriert sich auf den finanziellen Aspekt und ermöglicht Unternehmen, ihre Strombezugskosten effektiv zu optimieren.

Das Fazit dieser Untersuchung der Korrelation zwischen GEF und Strombörsenpreis: Eine Optimierung nach dem Börsenstrompreis, der transparent zur Verfügung steht, führt in ausreichendem Maße zur Optimierung der THG-Emissionen (Treibhausgas-Emissionen) im Strombezug. Gleichzeitig bietet diese Strategie den Vorteil einer Betriebskostenoptimierung. Für milchverarbeitende Unternehmen bedeutet dies, dass sie durch eine geschickte Energiebeschaffungsstrategie sowohl ihre ökologische Bilanz als auch ihre Energiekosten reduzieren können. Es empfiehlt sich daher, den Börsenstrompreis als einen Faktor bei der Planung und Umsetzung von Energiebeschaffungsmaßnahmen zu berücksichtigen.

3 Gemeinsamer Forschungsansatz

Der gemeinsame Forschungsansatz mit den Verbundpartnern in BlueMilk ist die Erarbeitung von systemeffizienten Konzepten (siehe auch Abschnitte 1 und 2.1).

Molkereien sind heutzutage hochmoderne Unternehmen, deren Produkte den höchsten Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen entsprechen müssen. Für einen außenstehenden Wissenschaftler stellt sich bei der Betrachtung solcher Unternehmen eine Vielzahl von komplexen Produktionsprozessen dar. Diese Prozesse sind oft miteinander verknüpft und interagieren in vielfältiger Weise, was die Analyse und Optimierung herausfordernd macht.

Aufgrund der vorhandenen Datenlage und der bereits durchgeführten Energiemodernisierungsmaßnahmen in den Molkereien muss eine gezielte Auswahl von Prozessen getroffen werden. Dies dient nicht nur der Reduktion der Komplexität, sondern auch der Fokussierung auf Bereiche mit hohem Potenzial zur Steigerung der Systemeffizienz.

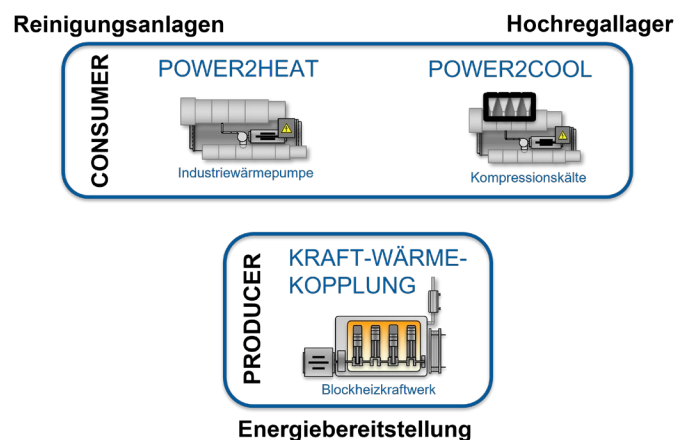


Abbildung 10: Fokussierte Teilbereiche in BlueMilk

Das Forscherteam von „BlueMilk“ hat nach gründlicher Analyse und Bewertung entschieden, den Fokus auf drei spezifische Teilbereiche zu legen:

1. Reinigungsanlagen
2. Hochregallager (Kühlhaus)
3. Energiebereitstellung mit BHKW (Blockheizkraftwerk)

Diese Auswahl ermöglicht es, gezielt systemeffiziente Konzepte zu entwickeln und zu untersuchen, die sowohl zu einer Steigerung der Energieeffizienz als auch zu einer Erhöhung der Flexibilität beitragen. Durch die Konzentration auf diese Teilbereiche kann das Team in „BlueMilk“ tieferegehende Analysen durchführen und systemeffiziente Lösungen für die spezifischen Herausforderungen und Anforderungen in modernen Molkereien entwickeln.

Folgende Fragen sollen beantwortet werden:

- Gibt es in den ausgewählten Bereichen Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz?
- Wie kann der Bezug und/oder die Bereitstellung von Energie flexibel und somit CO₂-arm gestaltet werden?
- An welcher Stelle liegt das Optimum aus Effizienz und Flexibilität hinsichtlich der Emissionen (Reduktion der CO₂-Emissionen) und der Energiekosten (Senkung der Betriebskosten)?
- Kann in den adressierten Bereichen durch Sektorenkopplung eine Steigerung der Flexibilität (Ausrichtung nach CO₂ bzw. Energiepreise) und der Effizienz (Minderung des Energiebedarfs) erreicht werden?

4 Systemeffizienzpotenziale der Reinigungsanlagen (CIP)

Im Forschungsprojekt wurden die Reinigungsanlagen der Molkerei „Zott“ untersucht. Diese bestimmten vor Ort eingesetzten Reinigungsanlagen werden auch als Cleaning-in-Place (CIP) bezeichnet. Die Molkerei besitzt mehrere Reinigungsanlagen. In „BlueMilk“ wurden die beiden CIP-Anlagen CC und CD untersucht, hierbei insbesondere CIP CC.

4.1 Funktionsbeschreibung

Die Reinigungsanlagen CIP CC und CIP CD werden im Umlaufsystem betrieben. Umlaufsystem bedeutet, dass Reinigungsmedien mit einer geringen Verschmutzung wieder in den dazugehörigen Tank zurückgeleitet werden. Sind die Reinigungsmedien zu stark verschmutzt, werden diese in den Abfluss geleitet (auch als Gully bezeichnet). Der Verschmutzungsgrad wird mittels einer Leitwertmessung bestimmt. Arbeiten in Zusammenhang mit dem Verschmutzungsgrad waren nicht Bestandteil des Forschungsprojekts.

CIP CD besteht aus fünf Tanks (Lauge, Einphasensäure, Säure, Stapelwasser, Frischwasser) und zehn Reinigungslinien (L1 bis L10). Von den zehn Reinigungslinien sind neun im Betrieb, L10 dient als Reserve. Das Reinigungsmedium Lauge wird mit Dampf nachgeheizt. Säure wird mit Warmwasser (65 °C) nachgeheizt.

CIP CC (siehe Abbildung 11) besteht aus sechs Tanks (2x Lauge, Einphasensäure, Säure, Stapelwasser, Frischwasser) und zehn Reinigungslinien (L1 bis L10). Von den zehn Reinigungslinien sind acht im Betrieb, L8 und L10 dienen als Reserve.

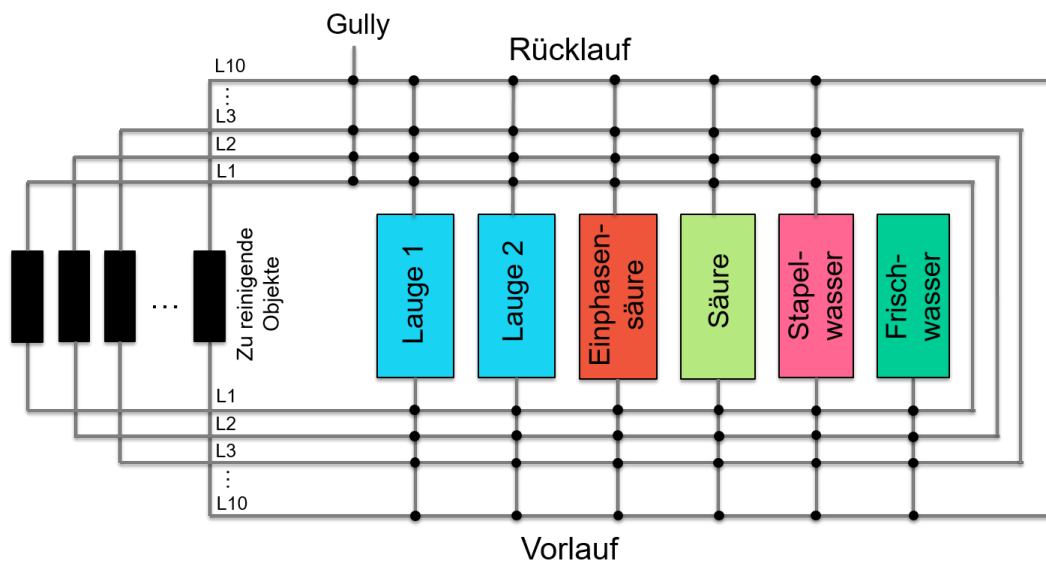


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Reinigungsanlage CIP CC

Die Reinigungsmedien Lauge und Einphasensäure werden mit Dampf nachgeheizt. Säure wird mit Warmwasser (65 °C) nachgeheizt. Die Reinigungsmedien besitzen folgende Solltemperaturen:

- Lauge: 80 °C
- Einphasensäure: 65 °C
- Säure: 55 °C

Weiterhin besitzen die anderen Tanks üblicherweise folgende Temperaturen (diese Tanks werden nicht aufgeheizt):

- Stapelwasser: ca. 30 °C
- Frischwasser: 12,5 °C bis 15 °C

Ein einzelner Reinigungsprozess (eine Reinigung eines Objekts, z. B. Reinigung eines Tanks) besteht aus mehreren aufeinanderfolgenden Phasen/Schritten. Diese Phasen sind in Abbildung 12 dargestellt. Für den Vorlauf ist die Phase so charakterisiert, dass innerhalb einer Phase die Befüllung mit einem Medium konstant ist, d. h. in der Lauge-Phase wird der Vorlauf mit Lauge befüllt. Im Beispiel der Reinigung aus Abbildung 12 wird der Vorlauf nach der beschrifteten Lauge-Phase mit Frischwasser befüllt. Für den Rücklauf ist die Phase so charakterisiert, dass innerhalb einer Phase das Ziel konstant ist, d. h. in der Gully-Phase wird für diese Phase das Reinigungsmedium im Rücklauf in den Abfluss (= Gully) geleitet. In der darauffolgenden Phase, wird das Reinigungsmedium in den Säure-Tank geleitet.

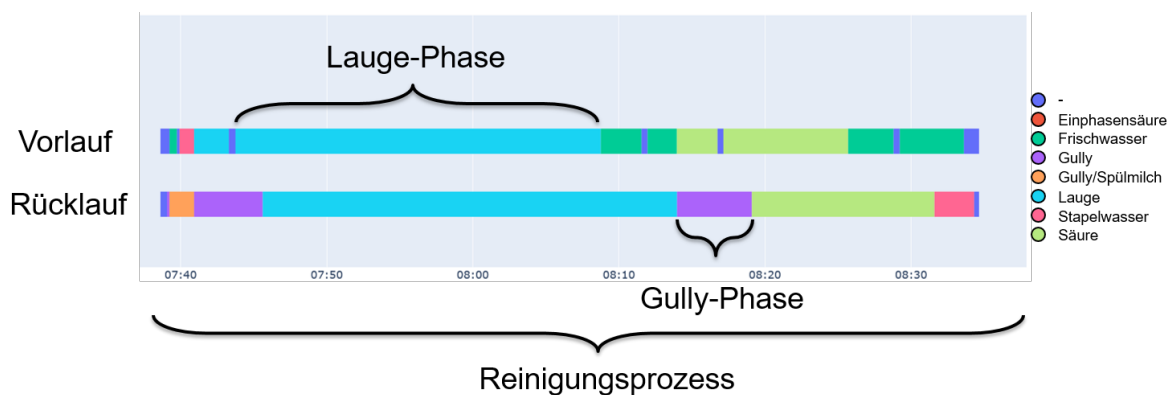


Abbildung 12: Darstellung der einzelnen Phasen/Schritte eines gesamten Reinigungsprozesses

Abbildung 13 zeigt alle durchgeführten Reinigungen der Reinigungsanlage CIP CC für den Zeitraum 13.07.2020 bis 20.07.2020 aufgeteilt nach den acht aktiven Reinigungslinien. Die farbliche Unterscheidung folgt hierbei nach den unterschiedlichen Linien und nicht nach der Phase einer Reinigung. Ein farbiger Balken zeigt an, dass eine Reinigung stattfindet, unabhängig vom Schritt der Reinigung.



Abbildung 13: Durchgeführte Reinigungen der Reinigungsanlage CIP CC für den Zeitraum 13.07.2020 bis 20.07.2020

Es ist zu erkennen, dass Reinigungsdauer und Auslastung der einzelnen Linien unterschiedlich sind.

4.2 Prämisse vor Projektbeginn

Bereits vor Projektbeginn wurden viele Messwerte und Daten in der Anlage CIP CC erfasst. Diese betreffen Vor- und Rücklauf, sowie die Tanks mit den Reinigungsmedien. Die erfassten Messwerte beinhalten u. a.:

- Linienvorlauf:
 - Volumenstrom
 - Sollwert Volumenstrom
 - Druck
 - Pumpenansteuerung
- Linienrücklauf:
 - Leitwert
 - Druck
 - Temperatur
- Tanks:
 - Temperaturen
- Schrittprotokolle

4.3 Durchgeführte Arbeiten/Untersuchungen

4.3.1 Auswahl der Linien für Rücklaufvolumenstrommessung

Zur Erweiterung der Datenaufnahme wurden Messgeräte zur Bestimmung des Volumenstroms im Rücklauf von zwei Linien der Reinigungsanlage CIP CC eingebaut. Die Erweiterung besteht aus dem Einbau einer Rücklaufvolumenstrommessung im Rücklauf, damit Energie- und Leistungsbilanzen des Rücklaufs gebildet werden können. Die Auswahl der Linien fiel dabei auf diejenigen Linien, welchen den größten Anteil an der gesamten Reinigungszeit haben.

Hierzu wurden Daten der durchgeführten Reinigungen für August 2019 ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Anteile bestimmter Reinigungslinien an der gesamten Reinigungszeit der Anlage CIP CC im Monat August 2019

Linie	Anteil Dauer	Rangfolge Dauer
CCL1	6 %	#5
CCL2	36 %	#1
CCL3	15 %	#3
CCL4	21 %	#2
CCL5	2 %	#8
CCL6	3 %	#7
CCL7	6 %	#6
CCL9	11 %	#4

Abbildung 14 zeigt die kumulierte Reinigungsdauer der verschiedenen Reinigungslinien.

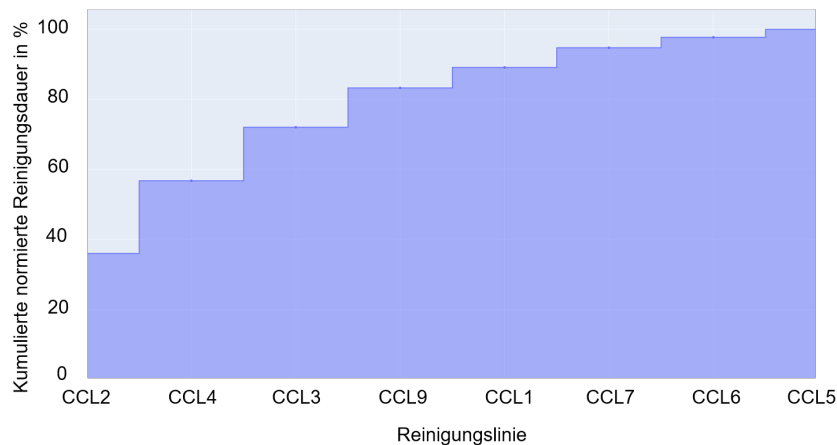


Abbildung 14: Kumulierte normierte Reinigungsdauer der sortierten Reinigungsdauern der Reinigungsanlage CIP CC im Monat August 2019

Die Ergebnisse zeigen, dass die Linien CCL2 (36 %) und CCL4 (21 %) die höchsten Anteile an der gesamten Reinigungsdauer für den untersuchten Zeitraum ausmachen. Zusammen haben diese einen Anteil über 50 % (57 %).

Alternativ könnte eine Auswahl auch über die Anzahl der durchgeführten Reinigungen stattfinden. In dieser Auswertung besitzen die Linien CCL2 und CCL4 einen Anteil von 40 % (Rangfolge #1, siehe Tabelle 1) bzw. 9 % (Rangfolge 3, siehe Tabelle 1).

Die ausgewählten Linien besitzen somit sowohl einen hohen Anteil an der Reinigungsdauer als auch an den durchgeführten Reinigungen. Siehe hierzu auch Abbildung 13 zur Visualisierung des Unterschieds zwischen Reinigungsdauer und –anzahl, die Linie CCL9 besitzt viele kurze graue Balken in der Abbildung, d. h. viele kurze Reinigungen, wohingegen die Linie CCL4 wenige lange rote Balken besitzt (wenige, aber lange Reinigungen).

Ergebnis: Auswahl der Linien CCL2 und CCL4 für den Einbau der Messgeräte zur Volumenstrommessung im Rücklauf

4.3.2 Erstellung der Vorlauftemperaturen aus den Schrittprotokollen

Wie in Abschnitt 4.2 erläutert, gibt es kein Messgerät, welches die Vorlauftemperatur des Reinigungsfluids misst. Eine Temperaturmessung im Vorlauf kann jedoch durch die Kombination von Schrittprotokollen und Tanktemperaturmessungen umgesetzt werden. So kann eine synthetische Vorlauftemperaturzeitreihe erstellt werden.

Gemessene Tanktemperaturen liegen fast durchgängig vor, jedoch immer, wenn ein aktiver Schritt in der Reinigung besteht (siehe „*gemessene Tanktemperaturen*“ in Abbildung 15). Das Schrittprotokoll gibt für den Vorlauf das Reinigungsmedium zur Befüllung an („*Schrittprotokoll*“ in Abbildung 15). Anhand der dadurch vorhandenen Zeitstempel, wann die Befüllung mit einem Reinigungsmedium startet und endet, können die dazugehörigen Temperaturzeitreihenabschnitte aus „*gemessene Tanktemperaturen*“ (Abbildung 15) extrahiert werden und zu einer synthetischen Vorlauftemperatur zusammengefügt werden (siehe „*Vorlauftemperatur*“ in Abbildung 15).

Gemessene Tanktemperaturen:

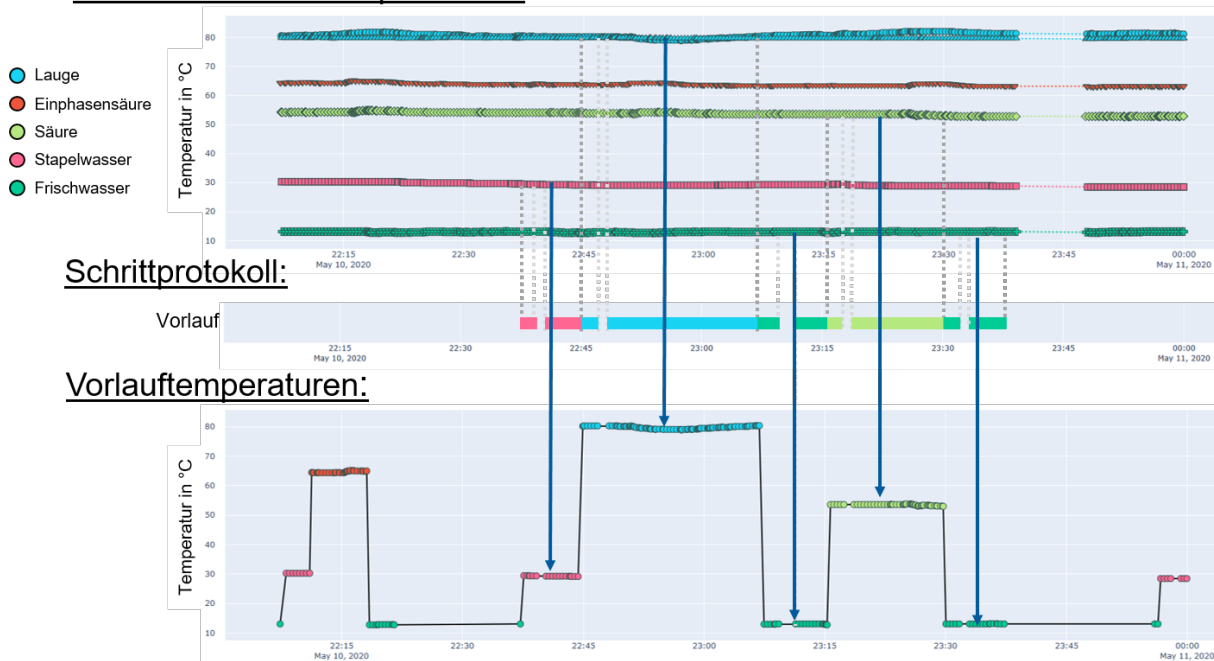


Abbildung 15: Erstellung einer synthetischen Vorlaufftemperatur aus gemessenen Tanktemperaturen und Schrittprotokoll

Die Reinigungsanlage CIP CC besitzt zwei Lauge-Tanks, welche jedoch nie beide gleichzeitig zur Befüllung des Vorlaufs (= aktiver Tank) verwendet werden. Der inaktive Tank befindet sich in der Entschlammungs-Phase. Dies wird in einem Protokoll festgehalten. Darüber kann ermittelt werden, welcher der beiden Tanks aktiv (d. h. für die Reinigung) genutzt wird.

Mittels dieser Methodik kann für jede Reinigung, wenn die Tanktemperaturen und ein Schrittprotokoll vorliegen, eine synthetische Vorlaufftemperatur generiert werden.

4.3.3 Berechnung Energiebedarf

Die Bestimmung des Energiebedarfs besteht aus der Berechnung der Summe des Energiebedarfs des Vorlaufs und des Energieinhalts des Rücklaufs. Der Energieinhalt im Vor- und Rücklauf wird über den Temperaturunterschied gegenüber der Referenztemperatur von 10 °C berechnet. Energiebedarf und Energieinhalt beziehen sich hierbei auf die Reinigungsmedien, welche auf- und nachgeheizt werden (Säure, Lauge, Einphasensäure).

Der Leistungsbedarf für den Vorlauf berechnet sich im ersten Schritt aus (Gleichung (1)):

$$\dot{Q}_{\text{Vorlauf}}(t) = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (10 \text{ °C} - \vartheta(t)) \quad (2)$$

$\dot{Q}_{\text{Vorlauf}}(t)$	Leistung des Vorlaufs gegenüber der Referenz zum Zeitpunkt t
\dot{V}	Volumenstrom in m^3/s
ρ	Dichte von Wasser in kg
c_p	Spezifische Wärmekapazität von Wasser in J/kgK
$\vartheta(t)$	Temperatur im Vorlauf zum Zeitpunkt t in °C

Der Energiebedarf für den Vorlauf berechnet sich aus (Gleichung (3)):

$$Q_{\text{Vorlauf}} = \sum \dot{Q}_{\text{Vorlauf}}(t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

Q_{Vorlauf}	Energiebedarf des Vorlaufs in J
$\dot{Q}_{\text{Vorlauf}}(t)$	Leistung des Vorlaufs gegenüber der Referenz zum Zeitpunkt t
Δt	Zeitschrittweite t in s

Es sind für \dot{Q}_{Vorlauf} und Q_{Vorlauf} Werte < 0 zu erwarten, da $\vartheta(t)$ größer als 10 °C beträgt (Frischwasser mit 12 °C stellt die geringste Temperatur dar).

Der Energieinhalt für den Rücklauf berechnet sich im ersten Schritt aus der Berechnung der Leistung (Gleichung (4)):

$$\dot{Q}_{\text{Rücklauf}}(t) = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (\vartheta(t) - 10\text{ °C}) \quad (4)$$

$\dot{Q}_{\text{Rücklauf}}$	Leistung des Rücklaufs gegenüber der Referenz zum Zeitpunkt t
\dot{V}	Volumenstrom in m^3/s
ρ	Dichte von Wasser in kg
c_p	Spezifische Wärmekapazität von Wasser in J/kgK
$\vartheta(t)$	Temperatur im Vorlauf zum Zeitpunkt t in °C

Der Energieinhalt für den Vorlauf berechnet sich aus (Gleichung (5)):

$$Q_{\text{Rücklauf}} = \sum \dot{Q}_{\text{Rücklauf}}(t) \cdot \Delta t \quad (5)$$

$Q_{\text{Rücklauf}}$	Energieinhalt des Rücklaufs in J
$\dot{Q}_{\text{Rücklauf}}(t)$	Leistung des Rücklaufs gegenüber der Referenz zum Zeitpunkt t
Δt	Zeitschrittweite t in s

Es sind für $\dot{Q}_{\text{Rücklauf}}$ und $Q_{\text{Rücklauf}}$ Werte > 0 zu erwarten, da $\vartheta(t)$ größer als 10 °C beträgt (Stapelwasser besitzt eine größere Temperatur als Frischwasser, welches mit 12 °C die geringste Temperatur darstellt.).

Der Energiebedarf für eine Reinigung berechnet sich aus (Gleichung (6)):

$$Q_{\text{Reinigung}} = Q_{\text{Vorlauf}} + Q_{\text{Rücklauf}} \quad (6)$$

$Q_{\text{Reinigung}}$	Energiebedarf einer Reinigung in J
Q_{Vorlauf}	Energiebedarf des Vorlaufs in J
$Q_{\text{Rücklauf}}$	Energieinhalt des Rücklaufs in J

Wenn $Q_{\text{Reinigung}}$ Werte < 0 annimmt, besitzen die Reinigungsmedien nach der Reinigung einen geringeren Energieinhalt als gegenüber vor der Reinigung. Diese Energiemenge muss wieder aufgebracht werden, um die Reinigungsmedien auf die ursprünglichen Temperaturen zu erwärmen. Daher entspricht dies dem Energiebedarf für eine Reinigung.

In wenigen Fällen können für $Q_{\text{Reinigung}}$ Werte > 0 auftreten. Dies passiert, wenn das Reinigungsobjekt eine höhere Temperatur als das Reinigungsmedium besitzt (z. B. Erhitzer). In diesem Fall wird dann Wärme vom Erhitzer an das Reinigungsmedium abgegeben. Es wird Energie von außerhalb des Systems Reinigungsanlage eingebracht. Diese Energie muss nicht

wieder aufgebracht werden, wenn das Reinigungsfluid wieder in den Tank eingebracht wird (ist der Fall, wenn das Reinigungsfluid nicht zu stark verschmutzt ist).

Wie bereits erwähnt, bezieht sich $Q_{\text{Reinigung}}$ hierbei auf den Energiebedarf für die Reinigungsmedien Säure, Lauge und Einphasensäure.

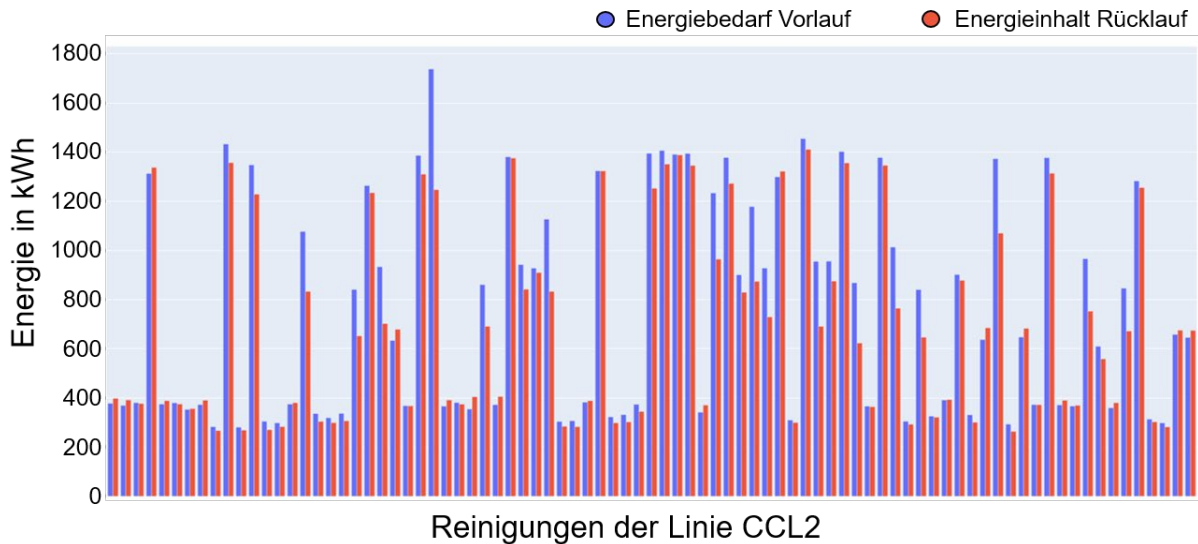


Abbildung 16: Energiebedarf Vorlauf und Energieinhalt Rücklauf für Reinigungen der Linie CCL2

Abbildung 16 zeigt den Energiebedarf für den Vorlauf (blau) und den Energieinhalt für den Rücklauf (rot) für Reinigungen der Linie CCL2. Der daraus resultierende Energiebedarf pro Reinigung ist in Abbildung 17 dargestellt. Es ist zu beachten, dass der Energiebedarf pro Reinigung sehr unterschiedlich ist, da sich die Reinigungsdauer stark unterscheiden kann (siehe Balken für CCL2 in Abbildung 13).

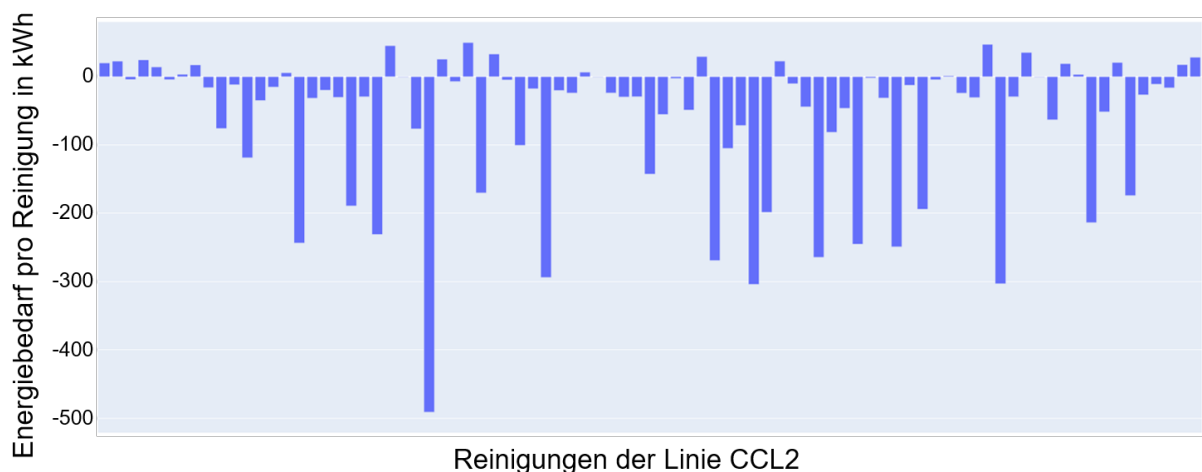


Abbildung 17: Energiebedarf für Reinigungen der Linie CCL2

4.3.4 Numerische Simulation der Temperaturänderungen in Leitungsreinigungen

Die Erwärmung und die Abkühlung von Leitungen (und Tanks) durch warme bzw. kalte Reinigungsmedien stellt einen Verlust bei Reinigungen dar. Damit dies genauer untersucht werden kann, wurde ein numerisches Modell zur Berechnung der Temperaturen in Leitungen entwickelt.

Zur Berechnung der Temperaturänderung wird eine eindimensionale Wärmeleitung entlang der Wanddicke berechnet (siehe Abbildung 18).

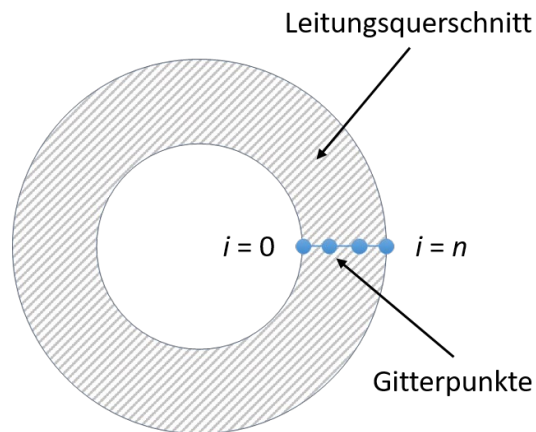


Abbildung 18: Leitungsquerschnitt mit angedeuteten Gitterpunkten für eine 1-D-Wärmeleitung

Die Reinigungsmedien innerhalb einer gesamten Reinigung sind nicht konstant. In Abhängigkeit des Reinigungsschritts werden unterschiedliche Reinigungsmedien durch die Leitungen gepumpt. Für die Berechnung der Temperaturänderungen in Leitungen ist hierbei entscheidend, dass jedes Reinigungsmedium im Vorlauf eine unterschiedliche Vorlauftemperatur besitzt. Die Dauer eines Reinigungsschritts kann nur wenige Minuten andauern. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass sich zwischen Reinigungsmedium und Umgebung (mit Wärmeübertragung durch die Wand der Leitung) ein Gleichgewicht einstellt. Daher wird eine instationäre Wärmeleitungsgleichung verwendet. Sie beschreibt die zeitliche Änderung der Temperatur in Abhängigkeit der örtlichen Änderung der Temperatur (Baehr und Stephan 2011). Für den eindimensionalen Fall in einem Material mit konstanten Parametern kann diese wie folgt dargestellt werden:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \quad (7)$$

ϑ Temperatur in der Rohrleitung in °C

t Zeit in s

a Temperaturleitfähigkeit in m^2/s

x Ortskoordinate im Leitungsquerschnitt in m

Am inneren Rand ($i = 0$) und am äußeren Rand der Rohrleitung ($i = N$) treten Konvektion auf. Am inneren Rand der Leitung vom Reinigungsmedium auf die Leitung, außerhalb von Leitung auf Umgebungsluft. Außerhalb der Leitung tritt zusätzlich Wärmestrahlung auf.

Randbedingung für Rohrleitung auf der Innenseite:

$$-\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \alpha(\vartheta - \vartheta_i) \quad (8)$$

λ	Wärmeleitfähigkeit der Rohrleitung in W/(m K)
ϑ	Temperatur in der Rohrleitung in °C
t	Zeit in s
α	Wärmeübergangskoeffizient in W/(m ² K)
ϑ_i	Temperatur des Reinigungsfluids in °C

Randbedingung für Rohrleitung auf der Außenseite (mit der Vereinfachung, dass die Fläche der Leitung sehr viel kleiner ist als die der Umgebung (Böckh und Wetzel 2015))

$$-\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \alpha(\vartheta - \vartheta_u) + \epsilon_1 \sigma (T^4 - T_u^4) \quad (9)$$

λ	Wärmeleitfähigkeit der Rohrleitung in W/(m K)
ϑ	Temperatur in der Rohrleitung in °C
t	Zeit in s
α	Wärmeübergangskoeffizient in W/(m ² K)
ϵ	Emissionsgrad der Rohrleitung
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante
T	absolute Temperatur in der Rohrleitung in K
T_u	absolute Temperatur der Umgebung in K

Die partielle Differentialgleichung aus Gleichung (7) wird mittels der Finiten-Differenzen-Methode (FDM) gelöst werden. Hierzu werden die Ableitungen der linken und rechten Seite der Gleichung diskretisiert.

Der Leitungsquerschnitt wird in Gitterpunkte $i = 1, 2, \dots, N$ unterteilt. Die Zeit t wird mittels l diskretisiert.

Für den Leitungsquerschnitt ($0 < i < N$) ohne die Randpunkte ($i = 0$) und ($i = N$) gilt zur Berechnung:

$$\vartheta_i^{l+1} = (1 - 2Fo)\vartheta_i^l + Fo(\vartheta_{i+1}^l + \vartheta_{i-1}^l) + O(\Delta x^2, \Delta t) \quad (10)$$

ϑ	Temperatur in der Wand der Leitung in °C
l	Diskretisierte Zeit
i	Diskretisierter Ort
Fo	Fourier-Zahl

mit

$$Fo = \frac{a \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \quad (11)$$

Fo	Fourier-Zahl
a	Temperaturleitfähigkeit in m ² /s
Δt	Zeitschrittweite in s
Δx	Ortsschrittweite in m

und

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (12)$$

- a Temperaturleitfähigkeit in m^2/s
- λ Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{m K})$
- ρ Dichte in kg/m^3
- c_p spezifische Wärmekapazität in $\text{J}/(\text{kg K})$

Die notwendigen Stabilitätsbedingungen werden berücksichtigt und überprüft.

Berechnungsablauf

Die gesamte Rohrleitungslänge wird in mehrere Segmente unterteilt. Für jedes Rohrsegment wird die Temperaturverteilung entlang der Rohrleitungslänge in der Rohrwand als konstant angenommen. Die Temperaturverteilung entlang der Dicke des Rohres wird wie oben numerisch bestimmt.

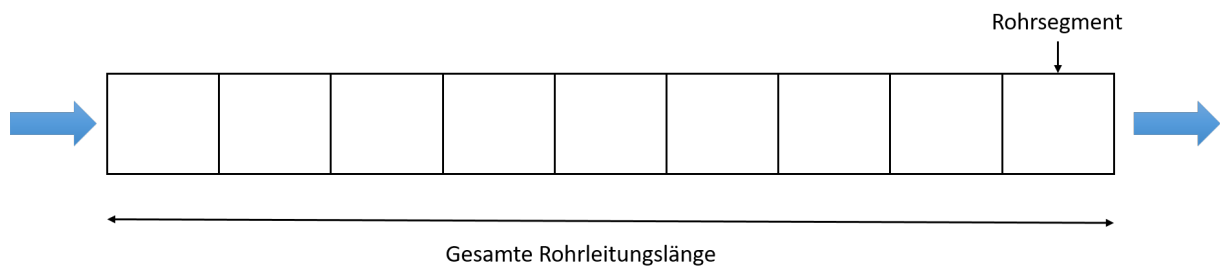


Abbildung 19: Prinzipdarstellung der Aufteilung der gesamten Rohrleitungslänge

Mit der Hilfe der Rohrsegmente kann die jeweilige Differenz zwischen der Eintritts- und Austrittstemperatur bestimmt werden.

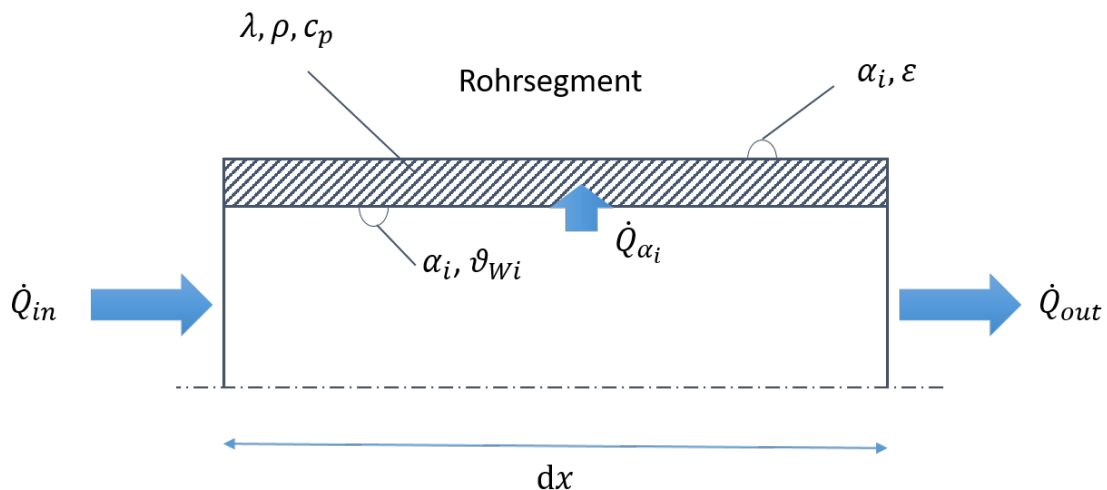


Abbildung 20: Rohrsegment mit auftretenden Wärmeströme

Es kann folgende Wärmestrombilanz aufgestellt werden:

$$\dot{Q}_{\text{out}} - \dot{Q}_{\text{in}} = \dot{Q}_{\alpha_i} \quad (13)$$

- \dot{Q}_{out} Wärmestrom des ausgehenden Reinigungsmediums in W
 \dot{Q}_{in} Wärmestrom des eingehenden Reinigungsmediums in W
 \dot{Q}_{α_i} Wärmestrom, welcher über Konvektion an die Rohrleitungswand abgegeben wird, in W

Für Wärmestrom \dot{Q}_{in} gilt:

$$\dot{Q}_{\text{in}} = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{\text{in}} - \vartheta_{\text{ref}}) \quad (14)$$

- \dot{Q}_{in} Wärmestrom des eingehenden Reinigungsmediums in W
 ρ Dichte des Reinigungsmediums in kg/m³
 \dot{V} Volumenstrom des eingehenden Reinigungsmediums in m³/s
 c_p spezifische Wärmekapazität des eingehenden Reinigungsmediums in J/kgK
 ϑ_{in} Temperatur des eingehenden Reinigungsmediums in °C
 ϑ_{ref} Referenztemperatur (zur Bestimmung einer Temperaturdifferenz) in °C

Für Wärmestrom \dot{Q}_{out} gilt:

$$\dot{Q}_{\text{out}} = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{\text{out}} - \vartheta_{\text{ref}}) \quad (15)$$

- \dot{Q}_{out} Wärmestrom des ausgehenden Reinigungsmediums in W
 ρ Dichte des Reinigungsmediums in kg/m³
 \dot{V} Volumenstrom des eingehenden Reinigungsmediums in m³/s
 c_p spezifische Wärmekapazität des eingehenden Reinigungsmediums in J/kgK
 ϑ_{out} Temperatur des ausgehenden Reinigungsmediums in °C
 ϑ_{ref} Referenztemperatur (zur Bestimmung einer Temperaturdifferenz) in °C

Für Wärmestrom \dot{Q}_{α_i} gilt:

$$\dot{Q}_{\alpha_i} = \alpha_i \cdot A \cdot (\vartheta_{W,i} - \vartheta_{\text{in}}) = \alpha_i \cdot d \cdot \pi \cdot dx \cdot (\vartheta_{W,i} - \vartheta_{\text{in}}) \quad (16)$$

- \dot{Q}_{α_i} Wärmestrom zwischen Reinigungsmedium und Rohrrinnenseite in W
 α_i Wärmeübergangskoeffizient auf der Rohrrinnenseite in W/(m² K)
 A Mantelfläche des Rohrsegments in m²
 $\vartheta_{W,i}$ Temperatur der Rohrrinnenwand in °C
 ϑ_{in} Temperatur des eingehenden Reinigungsmediums in °C
 d Rohrdurchmesser in m
 dx Rohrsegmentlänge in m

Die Gleichungen (14), (15) und (16) werden in Gleichung (13) eingesetzt und nach ϑ_{out} umgestellt:

$$\vartheta_{\text{out}} = \frac{\alpha_i \cdot d \cdot \pi \cdot dx \cdot (\vartheta_{W,i} - \vartheta_{\text{in}})}{\rho \cdot \dot{V} \cdot c_p} + \vartheta_{\text{in}} \quad (17)$$

ϑ_{out}	Temperatur des ausgehenden Reinigungsmediums in °C
α_i	Wärmeübergangskoeffizient auf der Rohrinneenseite in W/(m ² K)
d	Rohrdurchmesser in m
dx	Rohrsegmentlänge in m
$\vartheta_{W,i}$	Temperatur der Rohrinne wand in °C
ϑ_{in}	Temperatur des eingehenden Reinigungsmediums in °C
ρ	Dichte von Wasser in kg/m ³
\dot{V}	Volumenstrom in m ³ /s
c_p	Spezifische Wärmekapazität von Wasser in J/kgK

Die Temperatur ϑ_{out} ist die Eingangstemperatur für das nachfolgende Rohrsegment. Die Berechnung wird für alle Rohrsegmente gelöst. Danach wird die Berechnung für alle Rohrsegmente im nächsten Zeitschritt erneut gelöst.

Damit kann eine Temperaturzeitreihe für den Rücklauf generiert werden. Aus dieser Zeitreihe kann mittels der Gleichungen (1)-(6) der Energiebedarf berechnet werden.

4.3.5 Zeitreihenerstellung Bedarf

Mittels den Temperaturmessungen aus dem Rücklauf, welche für alle Linien vorhanden ist, kann über folgende Gleichungen eine Zeitreihe zur Nachheizung erstellt werden:

$$\dot{Q}_{L,i}(t) = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (\vartheta(t) - \vartheta_{\text{soll},m}) \quad (18)$$

$\dot{Q}_i(t)$	Leistungsbedarf für Linie I in W
\dot{V}	Volumenstrom in m ³ /s
ρ	Dichte von Wasser in kg
c_p	Spezifische Wärmekapazität von Wasser in J/kgK
$\vartheta(t)$	Temperatur im Vorlauf zum Zeitpunkt t in °C
$\vartheta_{\text{soll},m}$	Solltemperatur für Reinigungsmedium m in °C

Hierfür werden die Reinigungsmedien mit folgender Solltemperatur berücksichtigt:

- Lauge: 80 °C
- Einphasensäure: 65 °C
- Säure: 55 °C

Abbildung 21 zeigt den Leistungsbedarf für das Nachheizen der Reinigungsanlage CIP CC für den gesamten Monat Juli 2021 in minütlicher Auflösung. Die negativen Werte kommen, wie in Abschnitt 4.3.3 erwähnt, dadurch zu Stande, dass von außerhalb der Systemgrenze Reinigungsanlage Wärme eingebracht wird (durch Reinigungsobjekte mit höheren Temperaturen als die Reinigungsmedien).

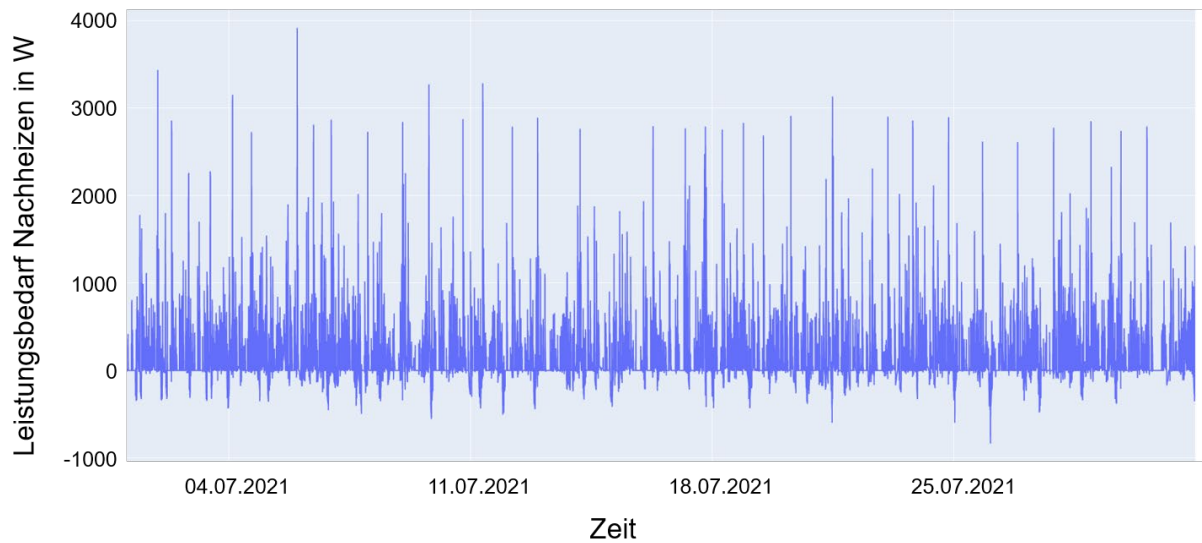


Abbildung 21: Leistungsbedarf Nachheizen für CIP CC im Monat Juli 2021

Abbildung 22 zeigt den Ausschnitt für die Woche KW 2021 in minütlicher Auflösung.

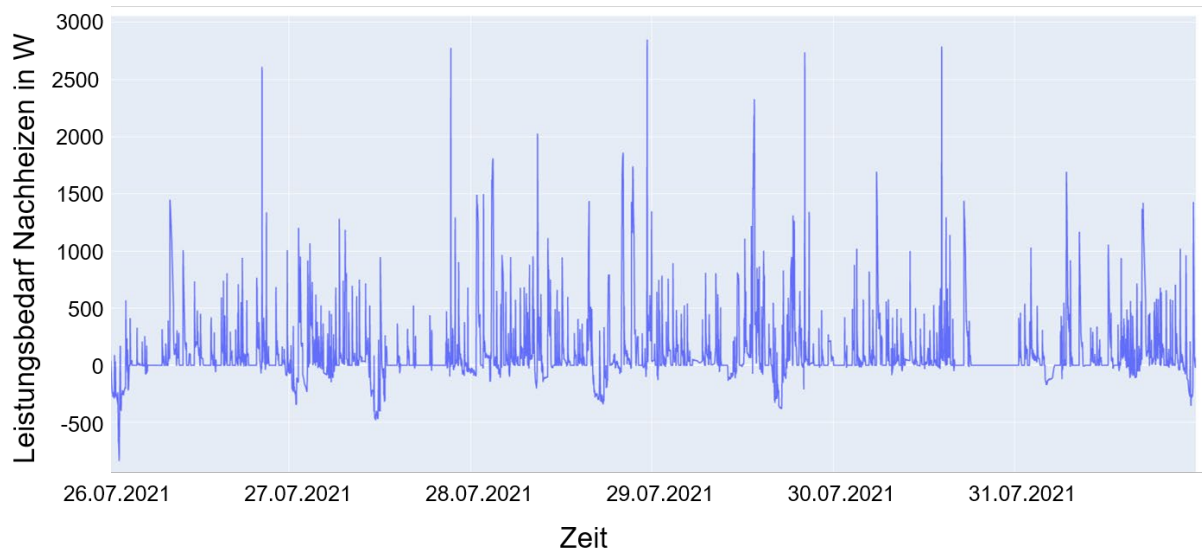


Abbildung 22: Leistungsbedarf Nachheizen für CIP CC in der Woche KW30 2021

4.4 Effizienzpotenziale

Im Folgenden werden drei Möglichkeiten vorgestellt, wie die Effizienz der Reinigungen erhöht werden kann.

4.4.1 Einfluss von Vorwärmen der Rohre auf die Effizienz

Durch eine Frischwassererwärmung sollen sich Leitungen/Tanks durch den Schritt der Zwischenspülung mit normalerweise kaltem Frischwasser nicht so stark auskühlen. Dies ist in Abbildung 23 dargestellt. Der Schritt (1., 8:10 auf Zeitachse) der Zwischenspülung (grüne Kreise) findet mit ca. 12 – 15 °C statt. Es ist zu sehen, dass die Gully-Phase im Rücklauf danach (lila Dreiecke, zwischen 8:10 und 8:20 auf der Zeitachse) zu Beginn noch eine hohe Temperatur von etwa 70 °C besitzt und dann immer kälter wird, bis etwa die Temperatur von Frischwasser selbst erreicht wird. Die Rohrleitungen haben zu Beginn der Frischwasser-Phase noch eine hohe Temperatur. Das kalte Frischwasser kühlt jedoch die Rohre stark ab. Die

darauffolgende Säure-Phase (hellgrüne Kreise im Vorlauf; hellgrüne Dreiecke im Rücklauf) kühlt sich daraufhin stark ab. Im Vorlauf besitzt die Säure eine Temperatur von etwa 55 °C. Zum Messzeitpunkt im Rücklauf besitzt die Säure eine Temperatur von etwa 15 °C auf Niveau von Frischwasser. Die Rohrleitungen sind sehr stark abgekühlt und die Säure gibt aufgrund der hohen Temperaturdifferenz viel Wärme an die Rohre ab.

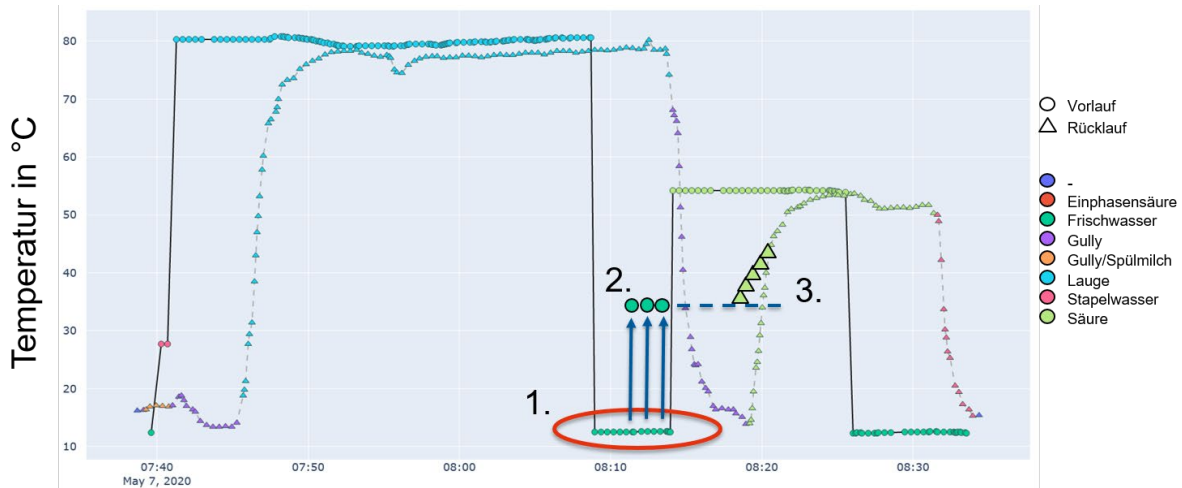


Abbildung 23: Temperatur im Vor- und Rücklauf mit angedeuteten Änderungen durch Frischwassererwärmung aus Abwärme

Durch die Frischwassererwärmung (2. in Abbildung 23) auf 30 °C soll die Wärmeabgabe von Säure an die Rohrleitungen verringert werden. Findet das Zwischenspülen mit 30 °C statt, verringert sich die Temperatur der Rohrleitungen auf höchstens 30 °C. Die Säure aus dem Vorlauf mit 55 °C gibt weniger Wärme an die Rohrleitungen ab, da die Temperaturdifferenz zwischen Rohrleitungen und Säure gesunken ist (2. in Abbildung 23). Diese geringere Wärmeabgabe muss beim Nachheizen nicht aufgebracht werden.

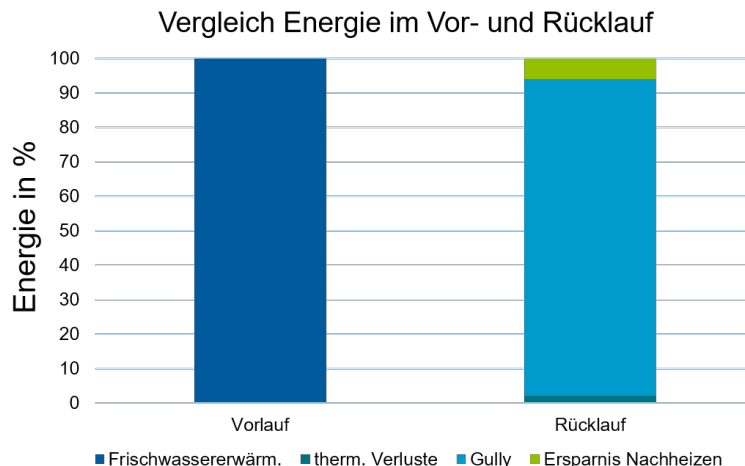


Abbildung 24: Vergleich der Energieaufteilung im Vor- und Rücklauf bei einer Frischwassererwärmung

Zur Frischwassererwärmung muss eine bestimmte Energiemenge aufgebracht werden (100 %, dunkelblauer Balken links bei Vorlauf in Abbildung 24). Von diesen 100 % können ca. 6 % genutzt werden, damit im Nachgang die Säure weniger nachgeheizt werden muss. Der mit Abstand größte Teil der Energie, die aufgebracht werden musste, verbleibt im Frischwasser und landet dann somit im Gully oder im Stapelwasser (92 %). Ein geringer Teil wird zu höheren thermischen Verlusten, da die Rohrleitungen wärmer sind (2 %).

Aufgrund des hohen Anteils, welcher im Frischwasser verbleibt, wird deutlich, wieso die Erwärmung mit Abwärme geschehen muss, da dies ineffizient ist und viel Energie für einen

prozentualen geringen Nutzen darstellt. Es stellt jedoch eine Möglichkeit zur Abwärmenutzung dar. Wird Erdgas oder Strom eingesetzt, muss dies direkt für die Nachheizung verwendet werden.

Zur Veranschaulichung: durch die Vorwärmung mit 35°% entsteht 17 % weniger Energieaufwand für die Säure-Nachheizung. Dies entspricht bei der Leitungsreinigung aus Abbildung 24 eine Ersparnis von 1,5 kWh.

4.4.2 Einfluss von Isolierung auf die Effizienz

Der Vor- und Rücklauf von/zu den Tanks besteht aus Rohrleitungen. Diese sind im oftmals unisoliert. Dadurch entsteht ein hoher Wärmeverlust, da sich die Rohrleitungen stark erwärmen.

Am Beispiel einer Leitungsreinigung soll der Einfluss einer Isolierung gezeigt werden. Die Randbedingungen hierfür sind eine Umgebungstemperatur von 15 °C und ein angenommener Wärmeübergangskoeffizient von 5 W/(m² K).

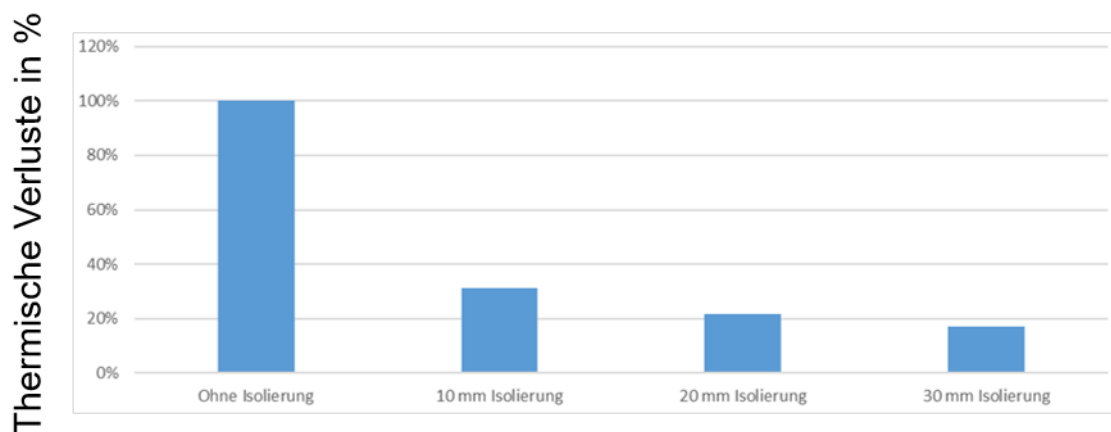


Abbildung 25: Thermische Verluste in % für unisolierte Rohre und drei verschiedene Isolierungsdicken

Für eine 10 mm dicke Isolierung mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,04 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$ (Isolierung aus Polyethylenschaum) können die thermischen Verluste (Temperaturstrahlung und Konvektion) bereits auf 31,4 % reduziert werden (siehe Abbildung 25). Eine Erhöhung der Isolierung auf 20 mm oder 30 mm bewirkt eine Reduzierung auf ca. 21,8 % bzw. 17,0 %.

Zur Veranschaulichung: Bei einer Gesamtleitungslänge von 150 m und einem Rohrdurchmesser von 65 mm ergibt sich absolut ein Verlust durch Strahlung und Konvektion von 22,9 kWh für diesen Reinigungsprozess. Der Verlust kann somit bei der 10-mm-Isolierung auf 7,2 kWh reduziert werden.

4.4.3 Einfluss von Wärmerückgewinnung (Gully) auf die Effizienz

Im Folgenden soll untersucht werden, wie das energetische Potenzial der Fluide, die in den Gully eingeleitet werden, nutzbar gemacht werden können. Ein energetisches Potenzial der Fluide ergibt sich dadurch, dass die Temperatur der Fluide über der Temperatur von Frischwasser liegt. Eine Untersuchung, wie generell der Fluidverlust reduziert werden kann, wurde nicht durchgeführt.

Die rote Hervorhebung in Abbildung 26 zeigt die Gully-Phase, welche im Folgenden näher untersucht werden soll.

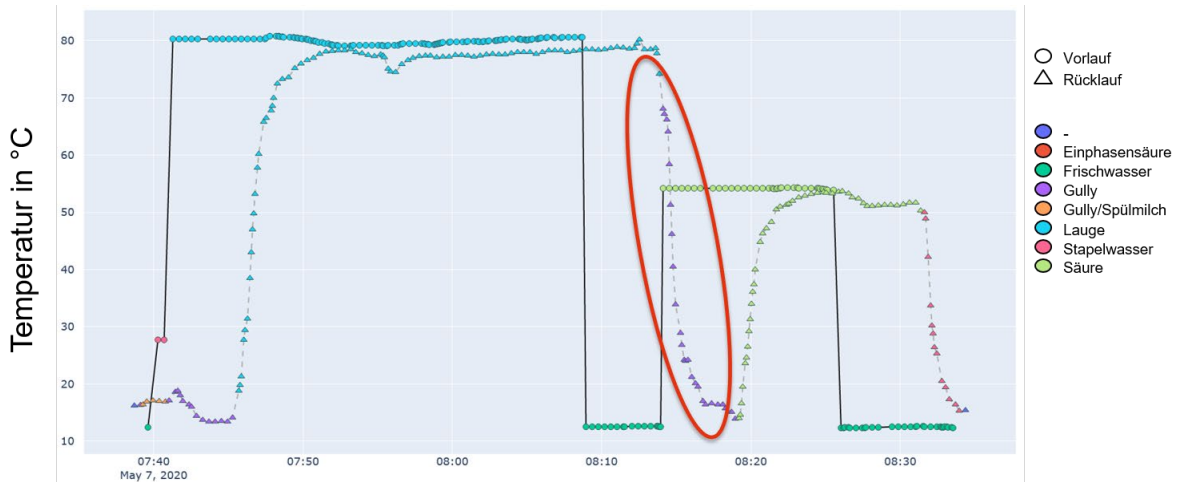


Abbildung 26: Temperaturen des Vor- und Rücklaufs mit Hervorhebung (rot) der Gully-Phase im Rücklauf

Abbildung 27 zeigt oben die Phasen aller Reinigungen, welche im Juli 2021 durchgeführt wurden. Unten in der Abbildung sind ausschließlich die Gully-Phasen zu sehen.

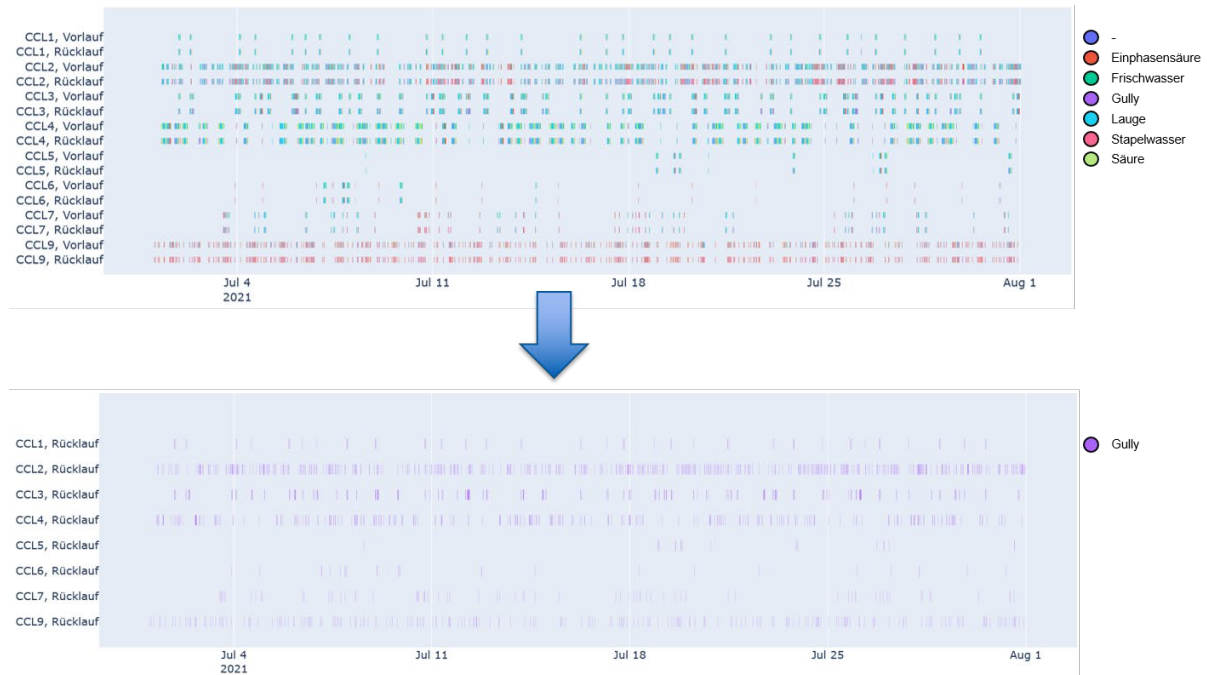


Abbildung 27: Übersicht der aller verschiedenen Phasen der Reinigungen im Monat Juli 2021 und Hervorhebung der Gully-Phasen

Die Phase Gully taucht in jeder Reinigung auf. Im Monat Juli 2021 belief sich die Gesamtzeit der Gully-Phasen auf 11.371 Minuten (zum Vergleich: 63.360 Minuten für die gesamte Reinigungszeit der Anlage CIP CC). Die Gesamtzeit setzt sich jedoch aus vielen kurzen Phasen zusammen. Reinigungen können parallel stattfinden: Gully-Phasen zwei oder mehrerer Reinigungen können sich überschneiden und verlängern. Wird dies berücksichtigt, so finden zu 9.940 Minuten im Monat Juli 2021 eine Gully-Phase statt. Dies entspricht etwa fünf Stunden pro Tag.

Die Gully-Phase soll anhand der Daten aus dem Monat Juli 2021 genauer analysiert werden.

Die relative Häufigkeitsverteilung der Gully-Phasen ist in Abbildung 28 dargestellt. Das Maximum mit etwa 30 % Anteil ist bei einer Länge der Gully-Phasen zwischen zwei und drei Minuten.

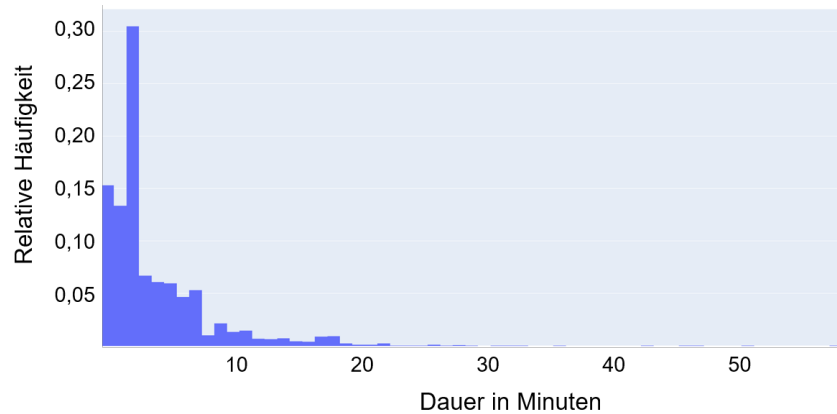


Abbildung 28: Relative Häufigkeitsverteilung der Dauer der einzelnen Gully-Phasen im Monat Juli 2021

Neben der Verteilung der Dauer ist ebenso die Verteilung der Temperaturen von Bedeutung. Diese ist in Abbildung 29 zu sehen.

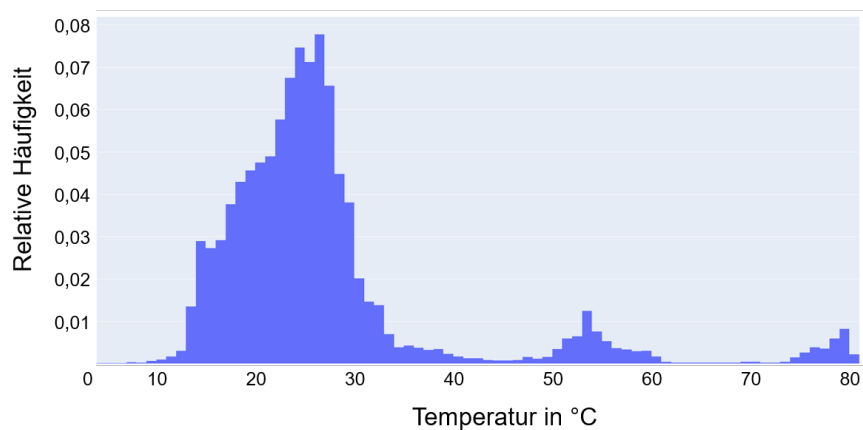


Abbildung 29: Relative Häufigkeitsverteilung der Temperaturen der einzelnen Gully-Phasen im Monat Juli 2021

In 80 % der Zeit liegt die Temperatur unter 30 °C. Lokale Maxima ergeben sich noch bei ca. 55 °C und bei ca. 80 °C aufgrund der Temperaturen von Lauge und Säure.

Aufgrund der kurzen Gully-Phasen mit stark schwankenden Temperaturen, bietet es sich an, die Flüssigkeit in einem Tank tagesweise zu sammeln um die Temperatur zu vergleichmäßigen (siehe Abbildung 30).

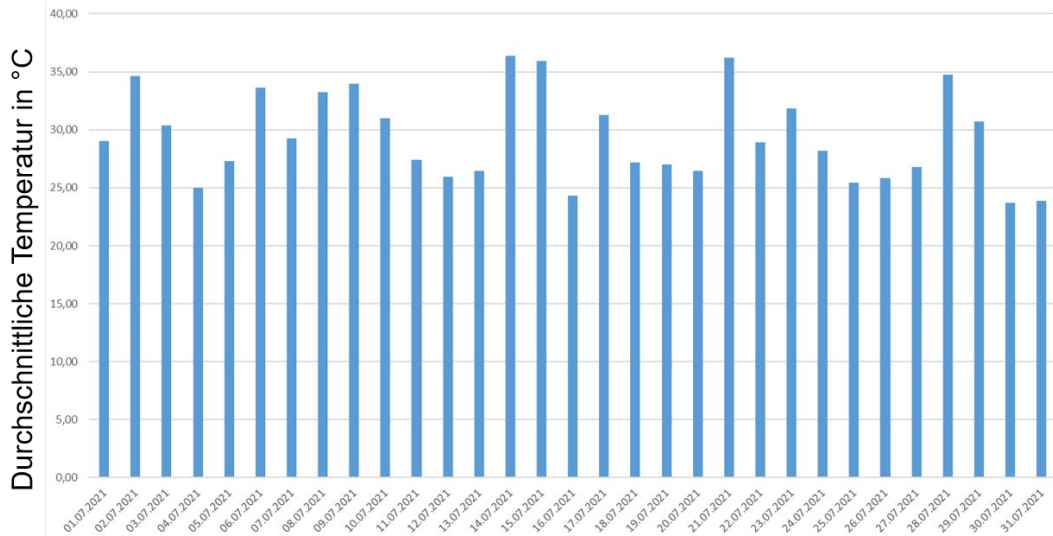


Abbildung 30: Durchschnittliche Temperatur, wenn Gully-Phasen täglich in Tank gesammelt werden

Um das energetische Potenzial zu bestimmen, muss neben der Temperatur das Volumen miteinbezogen werden, sowie eine Temperaturdifferenz angegeben werden. Die Temperaturdifferenz bezieht sich auf 17 °C, dies entspricht der Temperatur von Frischwasser + 2 °C. Das tägliche energetische Potenzial ist in Abbildung 31 dargestellt.

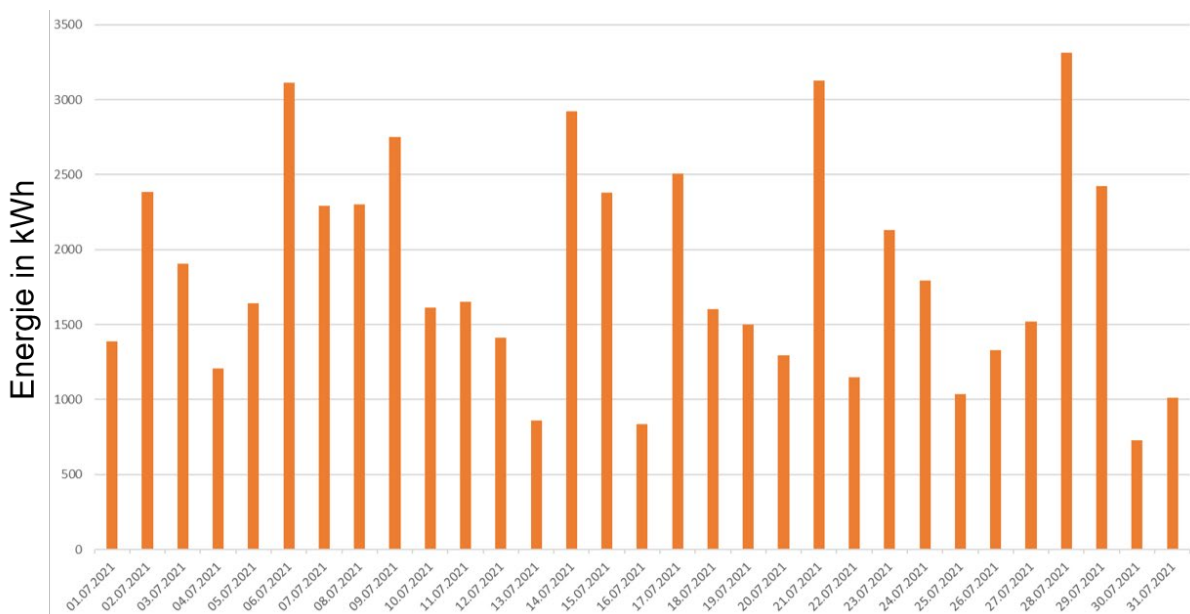


Abbildung 31: Tägliches energetisches Potenzial, wenn Gully-Phasen täglich in Tank gesammelt werden

Aufgrund der hohen Volumina ergeben sich trotz verhältnismäßig geringen Temperaturen von 25 °C bis 35 °C ein erstmal hohes theoretisches Potenzial. Dieses beträgt bis zu 57 MWh für den Betrachtungszeitraum Juli 2021. Zum Vergleich: der Energiebedarf der CIP CC in diesem Zeitraum beträgt 130 MWh, jedoch auf einem höheren Temperaturniveau.

Das Nachheizen beginnt bei ca. 45 °C (für Säure) und geht bis zu 80 °C (Lauge). Ohne den Einsatz einer Wärmepumpe um das Temperaturniveau anzuheben sind die Einsatzmöglichkeiten der Wärmerückgewinnung aus der Gully-Phase begrenzt. Bei einer Anhebung des Temperaturniveaus um 30 K bei einer Wärmepumpe beträgt der COP 4 (Schlosser et al. 2021). Wird eine tägliche Laufzeit von 6 h angenommen (damit eine Ausrichtung nach GEF und Day-Ahead möglich ist), ergibt sich eine elektrische Leistung der Wärmepumpe bis zu 234 kW. Bei einem durchschnittlichen GEF von 390 g/kWh (Juli 2021,

berechnet aus Daten von (Agora Energiewende 2022) ergibt sich eine Reduktion der Emissionen gegenüber einem Erdgaskessel um 70 % für die durch die Wärmepumpe bereitgestellte Wärmemenge.

4.5 Flexibilitätpotenziale

Im Folgenden soll untersucht werden,

- ob eine Lastverschiebung bei Reinigungsanlagen möglich ist,
- ob eine Lastverschiebung hinsichtlich bestimmter Gesichtspunkte (Ausrichtung nach Day-Ahead-Strombörsenpreis, Grid-Emission-Factor) möglich ist und
- ob eine Lastverschiebung eine Integration eines BHKWs in gesamtbetriebliche Energieversorgung fördert.

Dabei werden an die Flexibilitätsuntersuchung folgende Anforderungen gestellt:

1. Reinigungsqualität muss erhalten bleiben,
2. Reinigungsquantität muss erhalten bleiben und
3. Eingriff in die Verfahrenstechnik und in den Betriebsablauf soll überschaubar bleiben, Reinigungen werden nur als gesamte Reinigungsblöcke verschoben und nicht einzelne Schritte.

Diese genannten Anforderungen werden sicher gestellt durch:

- der Abstand von Reinigungen innerhalb einer Linie bleibt im Wochenverlauf gleich,
- der Energiebedarf innerhalb einer Woche ist identisch zur Ausgangssituation,
- Reinigungsprozesse werden nicht verändert und
- alle Reinigungen aus dem Status quo können weiterhin durchgeführt werden.

4.5.1 Optimierung Leistungsbedarf

Die Untersuchung wird mit Daten aus dem Zeitraum 29.06.2020 bis einschließlich 02.08.2020 durchgeführt. Dies entspricht dem gesamten Monat Juli 2020 einschließlich der Tage davor und danach zum Auffüllen von gesamten Kalenderwochen. Dadurch werden nun insgesamt fünf komplette Wochen gerechnet.

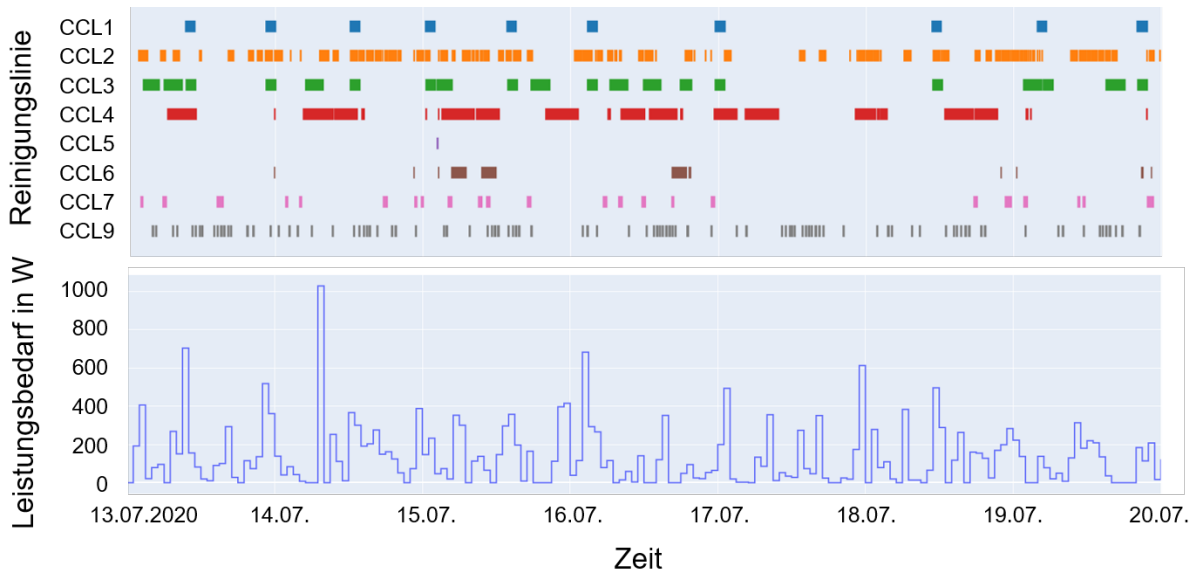


Abbildung 32: Reinigungsübersicht und dazugehöriger Leistungsbedarf für das Referenzszenario

Das Ziel der Optimierungen ist es, dass Reinigungen so verschoben werden, dass sich der Leistungsbedarf hinsichtlich bestimmter Kriterien ändert. Aufgrund der gestellten Anforderungen werden die Reinigungsabläufe wochenweise zueinander verschoben. Abbildung 33 zeigt schematisch, wie die Verschiebung stattfindet.

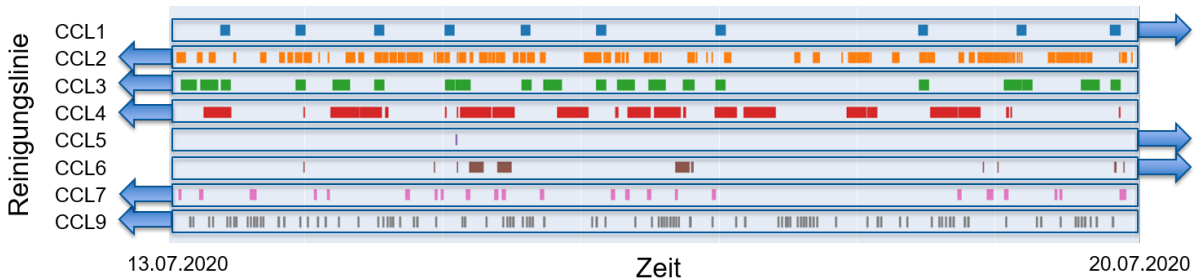


Abbildung 33: Schematische Darstellung der Verschiebung der Reinigungen

Im Vorgehen für alle Optimierungsvarianten werden die Reinigungslinien absteigend nach ihrer Gesamtreinigungsdauer sortiert. Die Verschiebung beginnt damit die Reinigungslinie mit dem höchsten Anteil zu wählen. Die Linie wird so verschoben, dass die Optimierungsgröße minimiert oder maximiert wird. Danach wird die nächste Linie und das bisherige Optimum gemeinsam optimiert. Dies wird für alle Linien wiederholt.

Im Folgenden werden die Optimierungsgrößen aufgelistet und beschrieben.

Optimierung anhand Spitzenlast

Ziel der Optimierung im Spitzenlast-Szenario ist es, die Reinigungen so zu verschieben, dass der Leistungsbedarf möglichst konzentriert stattfindet, d. h. wenige Stunden mit sehr hoher Leistung und viele Stunden mit wenig bis kaum Leistung.

Die Optimierung erfolgt hierbei danach, dass die nach der Leistung absteigend sortierte Kenndauerlinie in den ersten x Stunden einen möglichst hohen Wert aufweist.

Abbildung 34 zeigt die Reinigungen und den dazugehörigen Leistungsbedarf für eine Woche im Spitzenlastszenario.



Abbildung 34: Reinigungsübersicht und dazugehöriger Leistungsbedarf für das Spitzenlast-Szenario

Optimierung anhand gleichmäßigen Bedarf

Ziel der Optimierung im Szenario für gleichmäßigen Bedarf ist es, die Reinigungen so zu verschieben, dass der Leistungsbedarf möglichst gleichmäßig ist, d. h. es sollen möglichst wenige Spitzen auftreten.

Die Optimierung erfolgt hierbei danach, dass die nach der Leistung absteigend sortierte Kenndauerlinie eine gewisse Menge y an Energie nach möglichst vielen Stunden erreicht.

Die Abbildung 35 zeigt das Ergebnis der Optimierung für dieses Szenario.

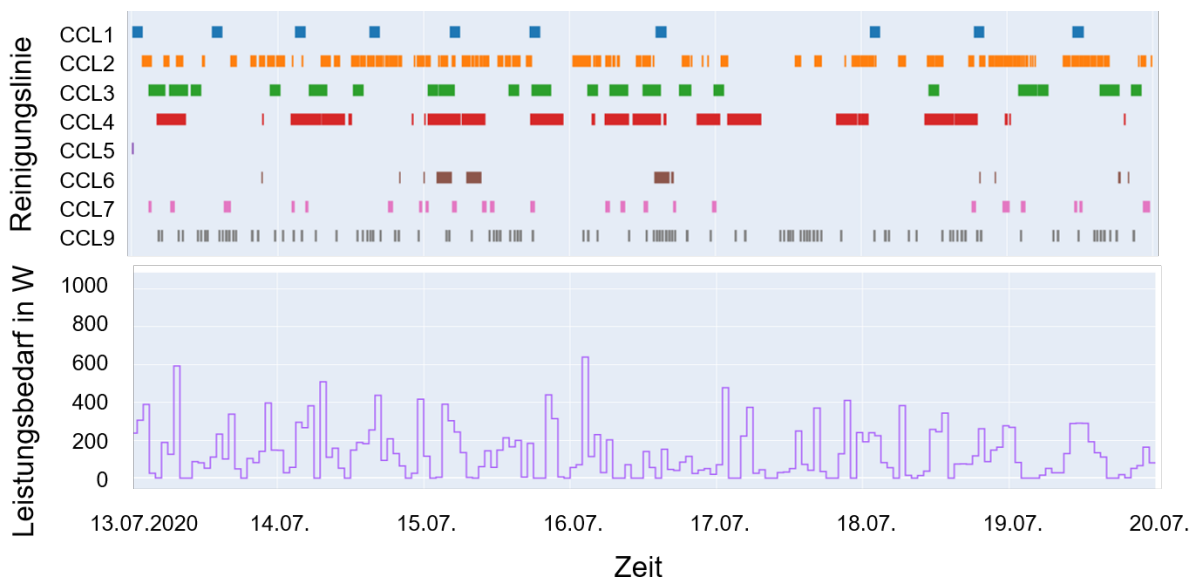


Abbildung 35: Reinigungsübersicht und dazugehöriger Leistungsbedarf für das gleichmäßiger-Bedarf-Szenario

Optimierung anhand Day-Ahead-Börsenpreis

Ziel der Optimierung im Szenario für Day-Ahead-Börsenpreis ist es, die Reinigungen so zu verschieben, dass eine Ausrichtung der Reinigungen zu günstigen Strompreisen stattfindet. Im Algorithmus wird dies so umgesetzt, dass die Gesamtstromkosten für den Leistungsbedarf möglichst niedrig sind (Annahme in diesem Fall, dass Leistung durch Strom gedeckt wird). (Niedrigpreis-Szenario).

Als Gegenbeweis dient eine Ausrichtung nach möglichst hohen Strompreisen (Hochpreis-Szenario).

Optimierung anhand GEF

Ziel der Optimierung im Szenario für GEF ist es, die Reinigungen so zu verschieben, dass eine Ausrichtung der Reinigungen zu geringen spezifischen Emissionen stattfindet. Im Algorithmus wird dies so umgesetzt, dass die Gesamtemissionen für den Leistungsbedarf möglichst niedrig sind (Annahme in diesem Fall, dass Leistung durch Strom gedeckt wird). (Niedrig-GEF-Szenario).

Als Gegenbeweis dient eine Ausrichtung nach möglichst hohen spezifischen Emissionen (Hoch-GEF-Szenario).

4.5.2 Überprüfung Verschiebung von Reinigungen

Die Tabelle 2 enthält für die Szenarien für die Spitzenlast und den gleichmäßigen Bedarf bestimmte Kennzahlen zur Überprüfung, ob eine Verschiebung stattgefunden hat (neben der optischen Kontrolle der Lastgänge aus Abbildung 32, Abbildung 34 und Abbildung 35) und ob die Verschiebung Einfluss auf energetische Kennzahlen hat. Die Daten beziehen sich wie die gesamte Flexibilitätsuntersuchung auf den Zeitraum 29.06.2020 bis 02.08.2020 (fünf Wochen).

Tabelle 2: Kennzahlen für Lastverschiebung von Reinigungen für ausgewählte Szenarien

Linie	Betriebsstunden in h	Maximale Leistung in kW	Teillastfaktor
Referenz	685	1.030	0,156
Gleichmäßig 1	711	640	0,238
Gleichmäßig 2	709	789	0,193
Spitzenlast 1	680	1.182	0,126
Spitzenlast 2	674	1.108	0,151

Der Teillastfaktor ist dabei wie folgt definiert:

$$\text{Teillastfaktor} = \frac{\text{Volllaststunden}}{\text{Betriebsstunden}} \quad (19)$$

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verschiebung mit Einfluss auf die Kennzahlen stattgefunden hat. Die Spitzenlast-Szenarien weisen niedrigere Betriebsstunden, eine höhere maximale Leistung und einen geringeren Teillastfaktor auf. Für das gleichmäßige Szenario ist jeweils das Gegenteil der Fall. Insbesondere die maximale Leistung hat sich im gleichmäßigen Szenario stark gegenüber der Referenz verändert.

Es ist somit möglich die Reinigungen zu verschieben und dies hat einen energetischen Einfluss, auch wenn dieser bei gewissen Kennzahlen gering ist.

Die weitere Anforderung, ob eine Ausrichtung nach Day-Ahead-Strombörsenpreisen oder GEF möglich ist, wird in Tabelle 3 dargestellt. Diese Tabelle enthält die Korrelationskoeffizienten der Pearson-Korrelation (Fahrmeir et al. 2016) zwischen den Szenarien und den Day-Ahead-Preisen und dem GEF für den ausgewählten Zeitraum.

Alle Werte liegen sehr nahe bei 0, d. h. es gibt keinen linearen Zusammenhang (Fahrmeir et al. 2016) zwischen dem Leistungsbedarf aus dem Szenario und den Werten von Day-Ahead oder GEF.

Die Anforderung, dass eine Ausrichtung nach Day-Ahead und GEF möglich ist, kann somit nicht erfüllt werden.

Tabelle 3: Korrelationskoeffizient für verschiedene Szenarien

Szenario	Korrelation vs. Day-Ahead	Korrelation vs. GEF
Referenz	-0,056	-0,043
Hochpreis-Szenario	0,072	0,049
Niedrigpreis-Szenario	-0,160	-0,063
Hoch-GEF-Szenario	0,019	0,066
Niedrig-GEF-Szenario	-0,097	-0,101
Gleichmäßig 1	-0,038	-0,006
Gleichmäßig 2	-0,028	0,014
Spitzenlast 1	-0,046	-0,026
Spitzenlast 2	-0,061	-0,028

4.5.3 Bewertung Verschiebung von Reinigungen

Eine Ausrichtung der Wärmebedarfsprofile der CIP CC nach Day-Ahead oder GEF ist nicht möglich, dennoch soll der Einfluss der veränderten Wärmebedarfsprofile auf die Energieerzeugung mit einem BHKW untersucht werden. Ein BHKW mit 18 MW elektrischer Leistung wurde in Voruntersuchungen als die „beste“ (Flexibilisierungsmöglichkeiten, Wirtschaftlichkeitsrechnungen) Option bestimmt. Für diese Untersuchung wurde das Simulationsmodell aus der Abschlussarbeit (Bartenstein 2022) im Literaturverweis herangezogen. Weite Teile der Methodik wurden dabei entsprechend Kapitel 5.2.3 angewendet.

Die Bewertung der Ergebnisse findet anhand der Einsparung von Energiekosten und Erhöhung der vermiedenen Emissionen durch die Stromeinspeisung in das öffentliche Versorgungssystem durch das BHKW.

Die Verschiebung von Reinigungen kann die Energiekosten des Unternehmens reduzieren. Dafür muss Wärmebedarf der Reinigung (in dieser Untersuchung CIP CC) in Zeiten verschoben werden, wo das BHKW in der Referenz keinen Strom erzeugt. So kann unterstützt werden, dass das BHKW ausreichend Wärmeabnahme besitzt. Wenn ausreichend hohe Strombörsenpreise vorliegen, kann CO₂-arme und kostengünstige Wärme bereitgestellt werden. Im Ergebnis erhöhen sich die Betriebsstunden des BHKWs. Für das aktuelle Energiesystem und die Berechnungsmethode der vermiedenen Emissionen (Verdrängungsmix, (Britta Kleinertz et al. 2018) entsteht eine Steigerung der vermiedenen Emissionen durch höhere Betriebsstunden.

Tabelle 4: Ergebnisse der Lastverschiebung für verschiedene Szenarien

Szenario	Änderung Betriebsstunden BHKW	Einsparung Energiekosten (ges. Unternehmen)	Erhöhung vermiedene Emissionen	Verbesserung?
Szenario 1	0,86 %	0,61 %	1,87 %	ja
Szenario 2	2,78 %	1,38 %	6,82 %	ja
Szenario 3	-0,86 %	-0,03 %	-1,00 %	nein
Szenario 4	-7,07 %	-0,24 %	-6,44 %	nein
Szenario 5	3,00 %	1,63 %	7,49 %	ja
Szenario 6	1,28 %	0,27 %	3,01 %	ja

4.6 Zwischenfazit

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden umfassende Untersuchungen im Bereich der Emissionsreduktion durchgeführt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass unterschiedliche Maßnahmen erheblich zur Senkung von Emissionen beitragen können. Insbesondere spielen Energieeffizienzmaßnahmen eine zentrale Rolle in dieser Hinsicht.

Darüber hinaus hat die Untersuchung ergeben, dass eine Lastverschiebung sowohl positive Auswirkungen auf die Emissionen als auch auf die Kosten haben kann. Es ist jedoch wichtig, bei der Implementierung solcher Maßnahmen mögliche Eingriffe in die Produktion zu berücksichtigen. Es muss sorgfältig geprüft werden, ob solche Eingriffe nicht ungewollte negative Rückwirkungen nach sich ziehen könnten.

Ein weiterer interessanter Aspekt der Forschung betrifft die Erwärmung von Frischwasser. Diese kann als eine Form der Systemeffizienz betrachtet werden. Obwohl insgesamt mehr Energie aufgewendet werden muss, kann in einem nachgelagerten Schritt mit Flexibilisierungsmaßnahmen Energie und damit auch Emissionen eingespart werden.

Bei der Untersuchung spezifischer Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz hat sich die Anbringung einer Isolierung als besonders vorteilhaft erwiesen. Der Hauptvorteil hierbei ist, dass diese Maßnahme keine Änderungen an der bestehenden Verfahrenstechnik erfordert. Andere Maßnahmen, wie die Vorwärmung von Frischwasser und die Sammlung von Gully-Phasen in einem Tank, erfordern zwar einen größeren initialen Aufwand, bieten jedoch erhebliche Vorteile. Insbesondere die Sammlung von Gully-Phasen in einem Tank zeigt ein hohes theoretisches Potenzial zur Emissionsreduktion.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Kombination der drei untersuchten Energieeffizienzmaßnahmen nicht nur möglich, sondern auch empfehlenswert ist, um maximale Emissionsreduktionen zu erzielen. Es empfiehlt sich jedoch, vor der Implementierung eine detaillierte Analyse der spezifischen Anforderungen und Bedingungen vor Ort durchzuführen.

5 Energiebereitstellung mit Blockheizkraftwerk

5.1 Prämisse vor Projektbeginn/Funktionsbeschreibung

Ziel der Sektorenkopplung ist die Dekarbonisierung der Volkswirtschaft durch eine möglichst vollständige Umstellung der Energieversorgung auf Strom („All Electric Society“) – in Deutschland aufgrund des beschlossenen Kernenergieausstiegs insbesondere auf Strom aus Erneuerbaren Energien. Eine Voraussetzung dafür ist die Nutzung aller Flexibilitätspotenziale von Erzeugern (Producer), Verbrauchern (Consumer) und Speichern (Prosumer) von Energie in den unterschiedlichen Formen.

Derzeitiges Hauptproblem der Sektorenkopplung ist, den Erfolg aus dem Stromsektor auf die energie- und emissionsintensiven Sektoren Verkehr, Wärmeversorgung, Landwirtschaft und Schwerindustrie auszudehnen. Wichtigstes volkswirtschaftliches Ziel aus der Perspektive des Klimaschutzes ist es daher, den Erfolg der Erneuerbaren Energien im Strommarkt durch eine Kopplung aller energieerzeugenden und -verbrauchenden sowie -speichernden Sektoren der Volkswirtschaft zu wiederholen. Diese Sektorenkopplung soll, primär basierend auf erneuerbar erzeugtem Strom, einen Netto-Null-CO₂-Ausstoß in Deutschland in bis 2045 erreichbar machen.

Die Sektorenkopplung verabschiedet sich von der Energiewirtschaft als eigenem ökonomischen Betrachtungsfeld und nimmt stattdessen die gesamte Volkswirtschaft als flexibles Wechselspiel von Prozessen der Stromerzeugung, des Stromverbrauchs sowie dessen Speicherung mit dem Ziel der Klimaneutralität in den Blick. Dieses Ziel lässt sich jedoch nur erreichen, wenn alle Energie, die in Deutschland benötigt wird, aus erneuerbaren Energieträgern erzeugt wird. Die bisherigen Primärenergieträger Öl, Kohle und Gas müssen daher nicht nur im bisherigen Stromsystem, sondern auch in allen anderen Verbrauchsprozessen – also eben auch im Verkehr, der Wärmeerzeugung, der Landwirtschaft, der Schwerindustrie und anderen Sektoren – abgelöst werden.

Während es im Stromnetz, bei auf Elektrizität basierenden industriellen Prozessen und in der Kälteerzeugung große Fortschritte gibt, sind die Sektoren Verkehr und Wärmeerzeugung noch sehr stark auf die Energieträger Erdöl und Erdgas angewiesen.

Flexibilitätspotentiale bieten sich in der Sektorenkopplung an unterschiedlichen Stellen: So kann ein Fuhrpark aus elektrischen Flurförderfahrzeugen Regelenergie abgeben, Elektrofahrzeugflotten lassen sich flexibel und kostenoptimiert laden, Kühlräume unter Ausnutzung der Trägheit von Wärmeprozessen kostenoptimiert kühlen und vieles mehr. Speziell in den mittelständischen Betrieben verbergen sich eine große Anzahl an Flexibilisierungsmöglichkeiten, die noch auf quer- und ökologisch denkende Ingenieure warten. (Next Kraftwerke)

Eine der Kernelemente der Sektorenkopplung sind Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in Form von Blockheizkraftwerken (BHKW). Die Technologie zeichnet sich durch eine hohe Primärenergieausnutzung aus, da nicht nur der darin erzeugte Strom vollständig, sondern auch das Koppelprodukt Wärme weitestgehend genutzt wird. V.a. auf Hubkolbenmotoren basierende BHKW-Technologien weisen eine relativ geringe Reaktions- und Startzeit auf, weshalb sie gut zur Residualstromerzeugung für das öffentliche Netz geeignet sind. Zwar werden viele Anlagen noch mit fossilen Brennstoffen betrieben, die Fähigkeit andere Brennstoffe wie Biomethan oder sogar Wasserstoff zu nutzen, steigt am BHKW-Markt stetig. Molkereibetriebe sind klassischerweise Standorte mit hohem Wärmeenergiebedarf und daher prädestiniert als BHKW-Standort. Diese tendenziell günstigen Voraussetzungen von Standort und Erzeugungstechnologie führen zu der Annahme, dass Molkereien gut zur Residuallastbereitstellung bei eigener Wärmenutzung mittels BHKW geeignet sind. Ein

ausgeklügelter Anlagenverbund mit weiteren Technologien wie einer P2H-Anlage oder das Verknüpfen mit dem Thema P2C kann die Flexibilität eines Molkereistandortes als Prosumer-Blackbox erhöhen. Solche Standortkonzepte werden am Fallbeispiel der AMS ausführlich untersucht mit dem Ziel einer Einschätzung, ob und in welcher Form dieser oder ähnliche Standorte als flexibler Stromlieferant und -abnehmer betriebswirtschaftlich agieren und gleichzeitig einen Beitrag zur öffentlichen Energiewende liefern kann.

In Molkereibetrieben wurde aufgrund historisch niedriger fossiler Energiepreise v. a. die Wärme komplett mit einem Verbrennungskessel erzeugt. Bei der mittelständischen Andechser Molkerei Scheitz (AMS) war dies in der Vergangenheit ein Erdgaskessel. Die elektrische Energie wurde vollständig aus dem öffentlichen Netz bezogen. Die Größenordnung beim Energiebedarf des Molkereistandortes beläuft sich bei Wärme auf ca. 16.000 MWh pro Jahr, bei Strom auf ebenfalls ca. 16.000 MWh jährlich, wobei nur ca. 7.000 MWh für die Produktion benötigt werden und die restlichen ca. 9.000 MWh auf die Kälteerzeugung per Kompressionskälte (KK-Anlage) entfallen (Daten aktualisiert während des Projektjahres 2020).

Für die Modernisierung soll als zentrales Mittel die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zum Einsatz kommen. Zur Modernisierung der Energieversorgung stehen zwei Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung. Eine Möglichkeit verfolgt das Ziel einer möglichst hohen Eigenenergieversorgung sowohl mit Wärme als auch Strom. Nur der restliche Energiebedarfsanteil, der nicht selbst erzeugt werden kann, wird öffentlich bezogen. Die Spitzenlast bei der Wärme, wie auch in Abbildung 36 dargestellt, übernimmt weiterhin ein Erdgaskessel. Für diese Lösung hat sich AMS bereits nach Projektantragsphase entschieden. Die ersten Maßnahmen wurden mit Beginn des Projektes umgesetzt und im Laufe des Projekts weitergeführt.

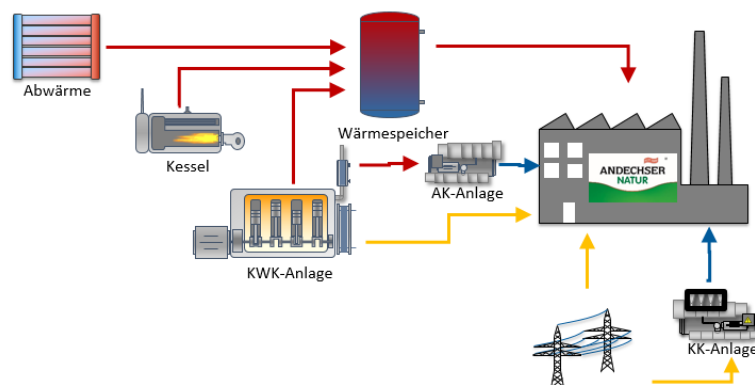


Abbildung 36: Modernisierte Energieversorgung der Andechser Molkerei mit der Lösung Eigenenergieversorgung

Als wichtigste Modernisierungsmaßnahmen sind zu nennen:

- Bau eines BHKW mit 999 kW el. Leistung als neues zentrales Element für die betriebliche Energieversorgung
- mit Rauchgaswärmetauscher zur Erzeugung von Prozessdampf
- Installation einer Absorptionskälteanlage (AK-Anlage) zur Kälteerzeugung aus BHKW-Wärme
- Erweiterung der Abwärmenutzung in der Energiezentrale v.a. bei der Druckluftherzeugung

Die andere Möglichkeit verfolgt die Idee des Projekts - das Konzept der Systemeffizienz. In Abbildung 37 wird eine Variante eines solchen Konzeptes mit flexibilisierter Energieversorgung schematisch dargestellt.

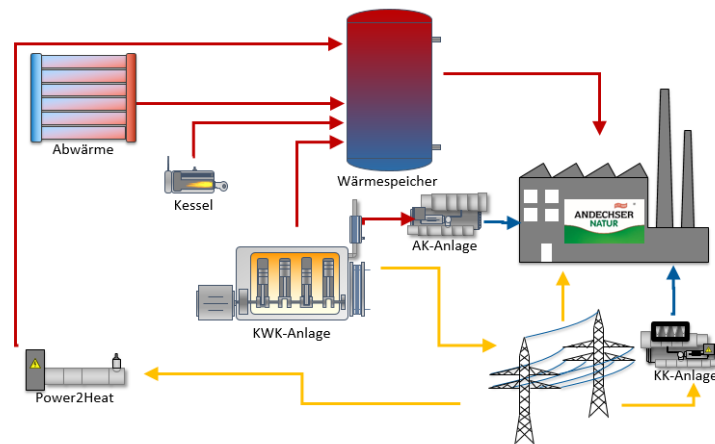


Abbildung 37: Flexibilisierte Energieversorgung schematisch angelehnt an die Umsetzung im Modell

Primär sind durch Identifikation von Effizienzpotentialen und Einbinden von weiteren Abwärmquellen Versäumnisse grundsätzlich aufzuarbeiten, um den Energiebedarf und das Emissionslevel generell zu senken. Die Abwärmekomponente (in Abbildung 37 als Blackbox eingetragen) bzw. die Energiemenge aus Abwärme und dessen zeitlicher Verlauf sind gegenüber der Eigenversorgung noch weiter erhöht. Eine KWK-Anlage in Form eines BHKW speist den Strom komplett ins öffentliche Netz, gezielt zu Zeiten, an denen wenig Erneuerbare zur Verfügung stehen. Das BHKW und der Wärmespeicher, der die KWK-Wärme puffert, müssen in der Kapazität für diese flexible Stromerzeugung tendenziell größer dimensioniert werden, als beim Ansatz der Eigenversorgung. Dafür kann der Kessel meist deutlich kleiner ausfallen bzw. läuft ein bestehender Kessel entsprechend weniger. Der Strom für Produktion und Kälteerzeugung stammt wiederum vollständig aus dem öffentlichen Stromnetz. Ebenso für eine P2H-Anlage, welche als Option zur Erhöhung des Flexibilisierungsgrades des Standortes im Modell berücksichtigt wird. Ebenfalls mit untersucht werden Auswirkungen durch die Option der Abwärmennutzung aus dem BHKW durch Absorptionskälte, da am Standort bereits verfügbar.

Die Entscheidung zur Eigenversorgungslösung durch AMS fiel unter anderem wegen

- der Dringlichkeit zur Modernisierung der bestehenden Energiezentrale
- Änderungen im Energiebedarf durch wachsende Produktionsmengen
- Unwissen und Unsicherheiten bei Auslegung und Betrieb der Flex Lösung
- Unsicherheiten durch (Förder-)Rechtliche Rahmenbedingungen
- In Folge dessen Unsicherheiten in der Wirtschaftlichkeit einer solchen Lösung

Die Unsicherheiten sollten durch den Teilbereich des Projektes adressiert werden, um Vergleichsmöglichkeiten, Handlungsoptionen für die Zukunft, und Orientierungshilfen für Betriebe ähnlicher Größenordnung und Energiebedarfssituation zu erhalten.

Der rechtliche Rahmen bot bei den Analysen besondere Herausforderungen. So bestanden bereits vor Projektbeginn vielzählige unterschiedliche Bestimmungen und Fördermöglichkeiten aus EEG und KWKG. Die mehrfachen Änderungen durch Gesetzesnovellen während der Projektlaufzeit bedingten ständige Aktualisierungen der Modelle und erschweren die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sowie die Aussagekraft für Prognosen.

Die modernisierte Energieversorgung bzw. die Entscheidung dafür basierte auf vorrangig folgenden Voraussetzungen, welche in EEG 2017 und KWKG 2017 genauer einzusehen sind.

- „kleineres“ BHKW unter 1 MW el. Leistung
- Anlage fällt nicht unter KWKG Ausschreibungssegment mit verpflichtender Volleinspeisung und Vergütungssatz nach Gebotszuschlag
- Anlage enthält Vergütungssatz nach festgelegter Zuschlagsberechnung
- Anlage fällt nicht unter variable EEG-Umlagereduzierung bei Überschreitung von 3500 vbh (Claw-back-mechanism)
- Volle EEG-Umlagereduzierung auf 40 % des jährlichen Umlagewertes

Die für das Projektvorhaben relevantesten Änderungen sind in den Gesetzesnovellen der Folgejahre nachzusehen und umfassen:

- Verschiebung der Segmentgrenzen für Anlagengrößen
- Verschiebung der Segmentgrenzen für ausschreibungspflichtige Anlagen
- Änderung der Vergütungssätze in den fest berechneten Segmenten
- Zwischenzeitliche Außerkraftsetzung und Wiedereinführung des Claw-back-mechanism
- Verschiebung der Grenzen für die EEG-Umlagereduzierung
- Stetiges Absenken der EEG-Umlage
- Absenken der EEG-Umlage auf Null im Juli 2022
- Folglich auch Umlagereduzierung und Claw-back-Mechanismus obsolet

Aus den zu Projektstart bestehenden Rahmenbedingungen entstanden eine Reihe an Thesen und Erwartungshaltungen an die Projektergebnisse:

- Es wird eine technische Lösung in Form eines Flexibilisierungskonzeptes gefunden, das sowohl der Projektidee Rechnung trägt, als auch theoretisch für die Molkerei funktioniert und auch praktisch eingebunden werden könnte.
- Die Kombination aus rechtlichem Rahmen und vorherrschenden Energiepreisen aus Gas- und Strom-Festbezugskonditionen sowie Charakteristik im Verlauf des Strombörsenpreises (Day-Ahead) werden Flex-Lösungen für KMU wie die AMS wirtschaftlich schwer realisierbar machen.
- Die Eigenversorgungsvariante ist ökonomisch in den allermeisten Fällen zu bevorzugen. Grund dafür sind v.a. auch die Vorgaben aus dem EEG.
- KMU können nach techno-ökonomischer Betrachtung vermutlich nicht flächendeckend in großem Stil als flexibel agierende Standorte einen Beitrag für das öffentliche Stromversorgungssystem leisten, wenn die Rahmenbedingungen nicht zielgerichtet angepasst werden.

5.2 Durchgeführte Arbeiten/Untersuchungen

5.2.1 Modellierung Gesamtbetriebliche Energieversorgung

Die in 5.1 beschriebenen Energieversorgungslösungen (bisherig, modernisiert, flexibel) wurden in Modelle überführt. Die bisherige Versorgungslösung ist dabei die am wenigsten komplexeste mit den wenigsten Komponenten und wenigsten Freiheitsgraden und somit relativ einfach im Modell umsetzbar. Das Modell der bisherigen Versorgung hat zwei wesentliche Funktionen:

- Abgleich der Simulationsergebnisse mit Realdaten, um das Modell und Annahmen zu validieren. Als Vergleichsgröße dienen v.a. die Kostenpositionen der einzelnen Energieversorgungsformen sowie die jährlichen Energieversorgungskosten für den Gesamtbetrieb. Die Ergebnisse konnten bestätigt werden.
- Basis für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der entwickelten Flex-Konzepte

Das Modell der modernisierten Versorgung hat dagegen folgende zwei wesentliche Funktionen:

- Abgleich der Simulationsergebnisse mit berechneten Auslegungsdaten aus der Planungsphase zur Modell- und Annahmen-Validierung. Als Vergleichsgrößen dienen v.a. jährliche Anlagenlaufzeiten, Kostenpositionen der einzelnen Energieversorgungsformen sowie die jährlichen Energieversorgungskosten für den Gesamtbetrieb. Die Ergebnisse konnten in der Größenordnung bestätigt werden.
- Alternative Lösung mit opportunen Vergleichswerten für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ggü. den entwickelten Flex-Konzepten

5.2.2 Annahmen und Datenbasis

Die Datenerhebung und Modellerstellung begann mit Projektbeginn. Durch laufende Anpassungen der Energieversorgung und Problemen bzw. Lücken in der bestehenden Datenerfassung für die Jahre 2018/2019 wurden im Projektverlauf die Modelle laufend aktualisiert bis ein einheitlicher zufriedenstellender Stand für das Jahr 2020 erreicht werden konnte. In Tabelle 5 und Tabelle 6 sind Modellkomponenten und Datenbasis aufgelistet, die für alle drei Energieversorgungslösungen gleichermaßen gelten. Bei der Zeitreihenmodellierung für jeweilige Energiebedarfe wurden Messfehler oder Messunterbrechungen bzw. Datenlücken durch vergleichbare Zeiträume anderer Jahre ergänzt.

Tabelle 5: Modellkomponenten und deren Parametrierung sowie weiterer Modellumsetzungen

Modell-komponente	Parametrierung	Beschreibung/ Kommentar
Brennstoff	Erdgas; 240 g/kWh CO _{2,eq}	Heizwert bei Wärmebedarfsberechnung bereits berücksichtigt
Dampfkessel	3,444 MW	Gesamtfeuerungswärmeleistung
Druckluftheiz-kraftwerk (DHKW)	155 kW	Thermische Leistung; Aktivität über Zeitreihenvorgabe
El. Druckluft-erzeuger		mehrere Anlagen zusammengefasst, Aktivität über Zeitreihenvorgabe
Elektrische Kälteanlage	715 kW _{el}	Bei 2,5 MW Kälteleistung; mehrere Anlagen zusammengefasst; Abbildung der einzelnen Verdichter über Teillaststufen
Enthitzer	Max. 270 kW _{th}	Abwärmenutzung der Kälteanlage; Zeitreihenfunktion abh. v. el. Kälteerzeugung
BHKW	999 kW _{el}	Für modernisierte Versorgungslösung; bei Flexibler Lösung variiert die BHKW-Größe
Wärmetauscher		Kopplung der Prozesswärmeerzeugung und Wärmebedarf auf niedrigerem Temperaturniveau
Wärmespeicher	4,62 MWh	
Kältespeicher	0,41 MWh	Fungiert real zur Spitzenlastbereitstellung
Strombezug		Bei Lösung 1 und 2 zu Festkostentarif
Strommarkt		Bei Flexibler Lösung Bezug und Einspeisung nach Day-Ahead Preiszeitreihe; bei Bezug CO _{2aq} zeitreihe Kraftwerkspark; bei Einspeisung CO ₂ -Faktor Verdrängungsmix 860 g/kWh;

Alle Energieerzeugungsanlagen können auch in Teillast betrieben werden. Die Teillastfähigkeit ist jeweils vorgegeben. Mit Ausnahme des Kessels können alle Anlagen den Wärmespeicher beladen.

Tabelle 6: Dem Modell zugrundeliegende Energiebedarfsdaten

Modell-komponente	Summe	Beschreibung/ Kommentar
Prozesswärmebedarf	ca. 14.000 MWh	Zeitreihe modelliert aus Gasverbrauchsmessung 2020 abzüglich Wärmebedarf
Wärmebedarf	ca. 2.000 MWh	Zeitreihe modelliert aus Messung der direkten Abwärmenutzung 2020
Strombedarf	ca. 7.000 MWh	Zeitreihe berechnet aus Messung des Gesamtstrombedarfs 2020 abzüglich Strombedarf zur Kälteerzeugung
Kältebedarf	ca. 9.000 MWh	Zeitreihe modelliert aus Stromverbrauchsmessung der Kältekompressoren

Annahmen im Modell zur Wirtschaftlichkeit werden in Tabelle 7 zusammengefasst. Die einzelnen Positionen sind zutreffend für den Standort Andechs und können bei anderen Betrieben in Umfang und Wert stark abweichen. Die hier gelisteten wirtschaftlichen Parameter umfassen nur die für die Modellierung notwendigen Eingangsdaten zur Simulation der Erzeugungszeitreihen und sich daraus ergebenden technischen und ökonomischen Kennwerte, v.a. der jährlichen Energieversorgungskosten. Die techno-ökonomische Analyse umfasst darüber hinaus eine nachgelagerte Investitionskostenbetrachtung. Die Annahmen zu dieser sind in Kap. 5.4.2 beschrieben.

Tabelle 7: Im Modell integrierte wirtschaftliche Parameter

Kategorie	Parameter	Beschreibung/ Kommentar
Betriebliche Einnahmen	Brennstoffsteuer-rückerstattung	Nach EnergieStG; Erdgas; 100 % bei Verbrauch in BHKW; 70 % bei Verbrauch in Kessel
	Entgelt Vermiedene Netznutzung	Gemäß StromNEV und Preisstruktur des Verteilnetzbetreibers
	KWK-Zuschlag	Je nach Versorgungslösung 2 (Festvergütung) oder 3 (mittlerer mengengewichteter Zuschlag Dez. 2017- Jun. 2021 – 51,025 €/MWh)
Betriebliche Aufwendungen Strom	Arbeitspreis	Je nach Versorgungslösung 1, 2 (Festbezugspreis) oder 3 (Day-Ahead Preis)
	Aufschlag Ökostrom	Zusätzlich zu Festbezugspreis
	Stromsteuer	
	EEG-Umlage	
	Leistungspreis	Umlegung auf energiebezogenen Wert
	Arbeitspreis Netz	
	Konzessionsabgabe	
	KWK-Umlage	
	NEV-Umlage	
	Offshore-Umlage	
	Umlage abschaltbare Lasten	
Betriebliche Aufwendungen Gas	Arbeitspreis	
	Energiesteuer	
	Netzentgelt	
Betriebliche Aufwendungen Eigenstrom	Reduzierte EEG-Umlage	40 %; kann je nach Betrachtungsjahr entfallen

5.2.3 Forschungsansatz und Methodik

Nachdem Modellkomponenten und Parameter nun bekannt sind, ist für das Zustandekommen der Ergebnisse noch die Methodik, welche sich hinter der Simulation verbirgt, entscheidend. Gemäß dem Forschungsansatz können Betriebe durch flexibles einsetzen ihres Anlagenverbundes unter Umständen sogar Mehrerlöse durch Ausnutzen schwankender Energiepreise am Day-Ahead Markt (oder ggf. auch anderen Flexibilitätsmärkten) erzielen. Der intelligente Einsatz der Energieerzeugungsanlage benötigt eine Signalgröße, an der sich der Anlagenbetrieb orientiert. Naheliegend ist es hier den Energiepreis in Form des fluktuierenden Strompreises heranzuziehen. So liegt der Methodik in erster Linie der schwankende Strompreis zu Grunde. Dieser fließt indirekt in eine Berechnung der Wärmegeheimungskosten (WKG) für die jeweilige Energiewandlungsanlage mit ein und reduziert diese bei hohen Verkaufserlösen für den Strom. Berücksichtigt werden dabei im Modell u. a. Energiewandlung/-kopplung, Wirkungsgrad, Brennstoffkosten und gesetzliche Förderungen.

In Abbildung 38 ist schematisch der zugrunde gelegte Day-Ahead Strombörsenpreis aus dem Zeitraum 01.10.2020 – 08.10.2020 visualisiert (blaue Kurve) (Agora Energiewende). Die Volatilität bewegt sich in diesem Auszug ca. auf einem Band zwischen 65 €/MWh und -55 €/MWh. Ebenfalls ist der CO₂-Emissionsfaktor des deutschen Strommix aufgetragen (rote Kurve) (Agora Energiewende). Die Korrelation der Beiden Kurven kann erahnt werden (mehr dazu siehe Kapitel 2.3). Bildet sich vereinfacht angenommen der Day-Ahead Strompreis aus Stromangebot und –nachfrage, so ist der Preis tendenziell bei einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien mit niedrigen Stromgestehungskosten niedriger bis sogar deutlich negativ (bei Stromüberangebot durch hohe EE-Produktion und niedrige Nachfrage durch Feiertag 03.10. gegen Mittag). Gleichzeitig ist zu diesen Zeiten der CO₂-Emissionsfaktor des Stromsystems niedrig. Dies gilt auch umgekehrt analog für niedrige EE- und hohe fossile Erzeugung.

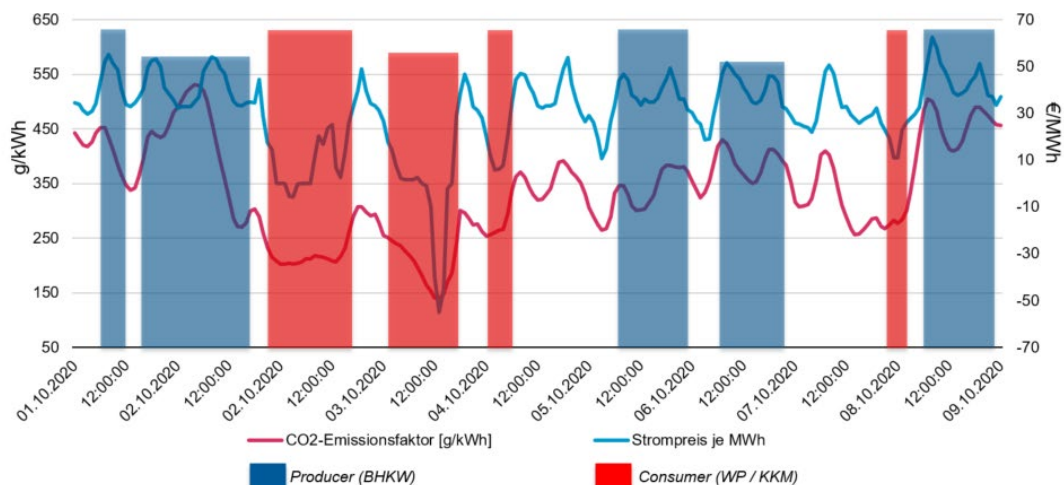


Abbildung 38: schematische Darstellung eines Anlageneinsatzplanes orientierend am Strombörsenpreis

Die Simulation und deren Entscheidung über die Einsatzreihenfolge von Energiewandlungsanlagen erfolgt durch eine analytische stündliche Planung hinsichtlich der geringsten Wärmegeheimungskosten (WKG). In Abbildung 39 ist ein Ablaufplan der Anlageneinsatzplanung in vereinfachter Form dargestellt.

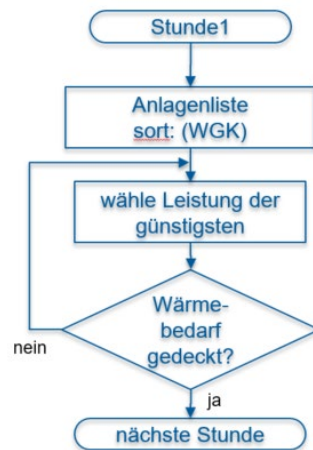


Abbildung 39: Ablaufplan zur Bestimmung der Einsatzreihenfolge der Energieerzeugungsanlagen (vereinfacht)

Beginnend mit Stunde 1 eines Betrachtungszeitraumes werden die WGK für jede Energiewandlungsanlage aus einer Anlagenliste berechnet. Die Anlagenliste der im Modell enthaltenen Anlagen wird dann nach den WGK sortiert. Beginnend mit der Anlage mit den niedrigsten WGK wird der Bedarf mit der maximalen Leistung der Anlage abgeglichen und die Anlage mit maximaler Leistung oder aber aus einem definiertem Teillastbereich ausgewählt. Ist der Wärmebedarf nicht gedeckt, wird wiederum die nächstgünstigere Anlage durch die Simulation gewählt. Verbleibt kein Restbedarf, wird mit der nächsten Stunde fortgefahren.

Der ganze Betrachtungszeitraum durchläuft eine Solver-gestützte Optimierung. Die Zielgröße der Optimierung sind die jährlichen Energieversorgungskosten des Betriebsstandortes, wobei die Zielgröße selbsterklärend gegen ein Minimum tendiert. Die betrieblichen Energieversorgungskosten resultieren direkt aus der technisch-ökonomischen Simulation über den Betrachtungszeitraum (es wurde jeweils ein Kalenderjahr gewählt).

Die grundlegend wichtigste Annahme zur Simulationsmethodik kann als allgemeine Vorgabe gesehen werden. Es wird für alle Lösungen und Konzepte unterstellt, dass der Anlagenbetreiber gewinnmaximierend agiert, die Energieversorgungskosten also möglichst gering ausfallen sollen. Zielfunktion und Solver können an einer wesentlichen Stelle nicht gut mit dieser Prämisse umgehen, u. a., weil der rechtliche Rahmen hier nichts Eindeutiges vorgibt. Vor dem Hintergrund der flexibleren Residualstrombereitstellung wird nach KWKG immer eine feste jährliche Anzahl an Vollbenutzungsstunden der Zuschlag (im Ausschreibungssegment z.B. 3500 Vbh) für den BHKW-Betrieb gezahlt. Es ist allerdings nicht näher eingeschränkt, wann im Jahr diese Stunden zu fahren sind. Daraus ergibt sich ein Widerspruch mit dem übergeordneten Ziel der bestmöglichen Residuallastbereitstellung. So kann z.B. im Extremfall der Betreiber die Anlage auch die ersten 3500 Jahresstunden fahren und für den Rest des Jahres die Anlage stillstehen lassen. Einerseits würde dadurch keine systemdienliche Residuallast bereitgestellt, andererseits auch mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht die geringsten Energieversorgungskosten erzielt. Der Solver aber würde in diese Richtung agieren, da die mangelnde rechtliche Vorgabe auch nicht als Modellrestriktion herangezogen werden kann, die Zielgröße aber schon relativ niedrig ausfallen wird. Eine Lösung wäre die vorgeschriebene Knüpfung der Zuschlagsstunden an die Fluktuation der EE-Erzeugung bzw. des Strombörsenpreises. Dies wurde aber in den Rahmenbedingungen so nicht festgelegt und wäre in der Praxis auch nicht einfach für ein ganzes Jahr festzulegen. Da dem Anlagenbetreiber nun aber generell Gewinnmaximierungstrieb unterstellt wird, wird dieser auch in dieser Weise agieren und den BHKW-Betrieb möglichst so gestalten, dass dessen WGK an möglichst vielen Stunden im Jahr niedriger sind, als die der anderen Energiewandlungsanlagen im Verbund. Im Modell wurde diese zusätzliche Restriktion in Form

einer vorgegebenen Zuschlagszeitreihe umgesetzt. Folgende Vor- und Nachteile sind dazu zu nennen:

Nachteile:

- Entspricht ebenfalls nicht der Realität, da ein Anlagenbetreiber unterstellt wird, der ein ganzes Jahr den Strompreis prognostizieren kann. Jedoch liegt die Wahrscheinlichkeit desselben Anlagenfahrplanes in Realität relativ hoch, da sich durch gewisse technische Intelligenz beim Anlagenbetrieb min. 1 Tag Strompreis und einige Tage bis Wochen der eigene Energiebedarf berücksichtigen lässt.
- Ergebnis ist vermutlich nicht immer das absolute Minimum der Zielgröße

Vorteile:

- Näher an der Realität als geschildertes 3500 Vbh Dauerläuferszenario
- bzw. entspricht es sogar der optimalen Ausnutzung der Kombination KWK-Zuschlag und hohe Stunden an Strombörsenpreise
- vermutlich liegt das Ergebnis sehr nahe am absoluten Minimum der Zielgröße
- Lösung liegt wahrscheinlich sehr nahe am bestmöglichen Kompromiss aus Energieversorgung des Standortes und Residuallastbereitstellung, was eine aussagekräftigere Interpretation der Ergebnisse ermöglicht

Auf die Charakteristik der Zuschlagszeitreihe haben folgende Faktoren einen Einfluss und sind bei der Erstellung zu berücksichtigen:

- Wirkungsgrad der KWK-Anlage
- Charakteristik der Day-Ahead Zeitreihe
- WGK der anderen Anlagen

Die Modellierung der Zuschlagszeitreihe soll abschließend erklärt werden. Dazu ist in Abbildung 40 ein Diagramm schematisch abgebildet. Die Abszissenachse zeigt den Strombörsenpreis an, die Ordinatenachse die Wärmegestehungskosten. Der Erdgaskessel ist in gelb aufgetragen. Der WGK-Wert des Kessels bleibt konstant, da er idealisiert angenommen nicht abhängig vom Strompreis ist. Bei der KWK-Anlage (grau) nehmen dagegen die WGK mit steigendem Strompreis ab. Die Kurven beider Anlagen schneiden sich in einem Punkt mit dem Strompreis x_s . Es ist an allen Jahresstunden, an denen der Strompreis größer ist als x_s die KWK-Anlage hinsichtlich der WGK günstiger als der Kessel und würde nach Simulationsmethode in Abbildung 39 auch automatisch für die Optimierung priorisiert werden. Allerdings könnte auch suboptimaler Weise der KWK-Zuschlag für einige dieser Stunden angerechnet werden. Für das Ziel möglichst niedriger Energieversorgungskosten ist eine Anrechnung des Zuschlags an Stunden kleiner x_s zielführender.

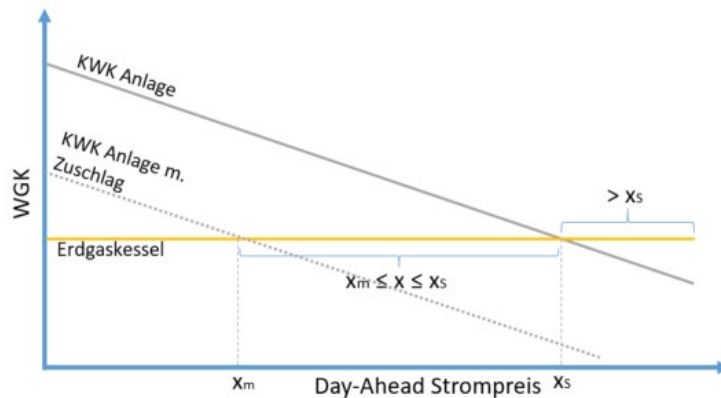


Abbildung 40: WGK-Diagramm zur Erklärung der Modellierungsmethode für die Zuschlagszeitreihe

Eine sinnvolle und nahezu optimale Zuschlagszeitreihe kann also modelliert werden, wenn die Anlage in den nachfolgenden maximal zuschlagsfähigen Stunden (3500 im Beispiel) fahren würde und durch zusätzliche Zuschlagszahlung ebenfalls geringere WGK erzielt als der Kessel (grau gepunktet). Für die Modellierung muss demnach der Strompreis x_m ermittelt werden, bei dem die WGK der KWK-Anlage 3500 zusätzliche Stunden unter dem Wert des Kessels liegen. Die endgültige Zeitreihe enthält dann an allen Stunden x zwischen x_m und x_s den Zuschlagswert.

5.2.4 Erheben vorhandener Messdaten

Im Betrieb wird eine Reihe an Messdaten kontinuierlich aufgezeichnet. Die Qualität und Automatisierung der Daten ist unterschiedlich und reicht von zeitlich hochaufgelöster Übermittlung an informationstechnische Energiedatenmanagementsysteme bis täglich händische Dokumentation von verantwortlichen Mitarbeitern (Projektbeginn). Von für die Modellierung relevanten Daten sind beispielsweise Gesamtstromverbräuche und tlw. Stromverbräuche einzelner Anlagen nahezu lückenlos in viertelstündlicher Auflösung automatisch gespeichert. Beim Wärmeverbrauch beispielsweise von Produktherzern ist dies nicht immer der Fall. Bisher wurde der Verbrauch über Produktionspläne abgeschätzt. Die Umstellung während des Projekts einer Neueinführung erschwerte die Datenerhebung, da auf mehrere unterschiedliche Systeme zurückgegriffen werden musste. Eine Herausforderung bei der Datenerhebung und Aufbereitung zur Weiterverwendung war daher die Standardisierung der Datensätze auf vorwiegend stundenbasierte Jahreszeitreihen. In Tabelle 8 sind Problemstellungen genannt, die bei der Erhebung auftraten, ebenso entsprechende Ansätze zur Behebung von Datenlücken.

Tabelle 8: Datenlücken und Lösungsansätze zur Behebung

Fehlertyp	„Gap of Data“	Bridging the Gap
Systemischer Fehler	<ul style="list-style-type: none"> Defekte Datenbank Größere Datenlücken Gar keine Daten Fehlerhafte Zeiteinstellung Unterschiedliche Reihentypen (rolling time stamps, event stamps) 	<ul style="list-style-type: none"> Auffinden des Fehlers im Datenmanagementsystem / in der Datenbank / bei der Datenaufzeichnung Neustart des Systems Zusätzliches Messsystem zur Validierung oder Lückenschließung installieren Spezifische Methoden zur Typenangleichung
Datenlücken in einzelnen Zeitreihen	<ul style="list-style-type: none"> Fehlende oder überlappende Zeitstempel Fehlende Werte Fehlende ganze Perioden Zeitformat / Zeitzone / Sommer Winterzeit nicht definiert oder nicht einheitlich Abweichende Aufzeichnungsjahre 	<ul style="list-style-type: none"> Kleine Datenlücken Interpolieren Zusätzliches Messsystem zur Validierung oder Lückenschließung installieren Reverse Data Engineering / Validation
Zweifelhafte Datensätze	<ul style="list-style-type: none"> Vorliegende Datenaufzeichnung wirkt in zeitlicher Form und thermodynamischer Physik nicht plausibel 	<ul style="list-style-type: none"> Sekundärdaten zur Plausibilisierung ausfindig machen (z.B. Produktionsplan, Fließschema, ...) Hinterfragen der Mess- und Aufzeichnungsmethoden Zusätzliches Messsystem zur Validierung installieren

5.2.5 Ergänzende Energieverbrauchsmessungen

Besonders zwei Datensätze waren nach ersten Analysen für das Vorhaben nicht zufriedenstellend in Umfang und/oder Qualität. Daher wurden an betreffenden Stellen Messgeräte installiert. V.a. der Wärmebedarf im Betrieb war unzureichend einzeln erfasst.

Der Wärmeverbrauch wurde an einigen der größten und relevantesten Verbraucher mit Geräten zur Wärmemengenmessung aufgezeichnet. Verwendet wurden (Systec Controls)

- Portable Ultraschall-Durchflussmesser ClampOn deltawaveC-P
- Datenlogger integriert
- Berührungsfreie Ultraschallwandler
- Anlege-Temperaturfühler

Drei Messgeräte standen gemäß Projektbudget zur Verfügung. Da nicht alle Messstellen gleichzeitig damit abgedeckt werden konnten, wurden die Messstellen nacheinander gemessen. Der jeweilige Messzeitraum betrug 3-4 Wochen. Je nach Qualität und Überschneidung mit Produktionsplänen konnten effektiv Daten über einem Zeitraum von 2 vollständigen Kalenderwochen verwertet werden.

Tabelle 9: Messstellenliste der Wärmeverbraucher

Bezeichnung	Messstelle	R&I Kennung
MS_1	Joghurtherhitzer Stufe Wärmespeicher	10E4 WS
MS_2	Joghurtherhitzer Stufe Anwärmung	10E4 NT
MS_3	Joghurtherhitzer Stufe Erhitzung	10E4 D
MS_4	Rahmerhitzer	1E2
MS_5	Milcherhitzer	1E1
MS_6	Quarkerhitzer	6E1
MS_7	Quarkanwärmer	1E2
MS_8	Reinigung Sammelwagen	CIPS
MS_9	Reinigung 2	CIP2
MS_10	Reinigung 1	CIP1
MS_11	Lüftungsanlage	LUEFT
MS_12	Joghurtkühler	(JEIS)

In Tabelle 9 sind die Messstellen der Wärmeverbrauchsmeasurements aufgelistet. Die Ultraschallwandler zur Durchflussmengenbestimmung wurden entsprechend Rohrdimension und Medienparameter mit Schienenzubehör an für Durchflussmessverhältnisse geeigneter Vor- oder Rücklaufstrecke installiert. Die Temperaturfühler wurden an Vor- bzw. Rücklauf des entsprechenden Apparates angelegt. Abbildung 41 zeigt beispielhaft an einem Apparat die Installation einer Wärmemengenmessung.

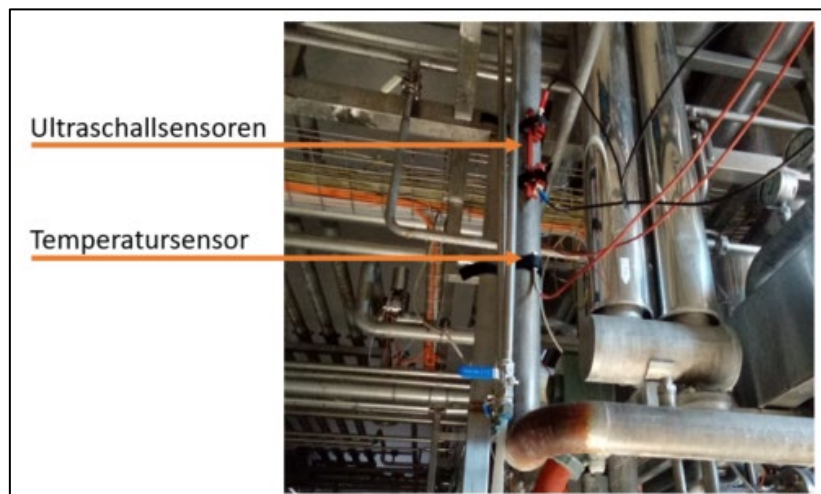


Abbildung 41: Beispiel einer Wärmemengenmessung installiert an einem Apparatzulauf

Die Stromaufnahme der Kompressionskälteanlage erfolgte nur in aggregierter Form und nicht nach unterschiedlichen Kältekreisläufen getrennt. Um hier eine bessere Datengrundlage zu haben und Aufzeichnungsausfälle des vorhandenen Systems zu überbrücken wurde die Stromaufnahme einiger Kältekompressoren einzeln gemessen.

5.2.6 Modellierung jährlicher Energiebedarfszeitreihen

Um Effizienzpotentiale des Betriebes besser beschreiben zu können und v.a. sie letztendlich mit in das Modell überführen zu können, um den Einfluss einzelner Verbraucher auf die Systemeffizienz besser beurteilen zu können, war eine Reihe an Aufarbeitungen vorhandener und gemessener Daten notwendig.

Zur Verwendung im Modell ist eine vollständige Jahreszeitreihe notwendig. Die vorhandenen Daten waren zu ungenau, zu uneinheitlich und zu lückenhaft. Hinzu kamen die uneinheitlichen Datentypen, bei denen teilweise auch nur eine Bilanzierung über längere Zeiträume und keine genaue Zeitreihenmessung vorlag. Die Daten selbst waren tlw. nicht erklärbar bis widersprüchlich. Die zuverlässigsten und langfristig gesichertsten Datensätze waren die Produktionspläne. Diese waren dafür aber mit der geringsten zeitlichen Auflösung (1 min bis mehrere Stunden) und entsprachen mehr einer Gesamtmengenmessung oder einer Bilanzierung über einen Produktionszeitraum. Abweichungen bestanden außerdem zwischen Planung der Produktion und der tatsächlichen Produktion (z. B. abweichende Start und Ende von Produktionszeiten) sowie mangelnde Differenzierung von Produktionsschritten (z. B. Zuordnung von Leerlaufmengen zu Produktion, welche aber nicht immer Einfluss auf Energieverbrauch haben).

Die ergänzenden Messungen waren selbsterklärend nicht über ein Jahr möglich (Problematik in Abbildung 42 dargestellt). Der Projektplan gab dies zeitlich nicht her und die geplanten notwendigen Messstellen übertrafen die Anzahl der Messgeräte um den Faktor 4, sodass eine Parallele Messung nicht möglich war. Die Messstellen wurden nacheinander gemessen, je über einen Zeitraum von 3-4 Wochen. Daraus wurden die 14 am brauchbarsten zusammenhängenden Datentage weiterverwendet.

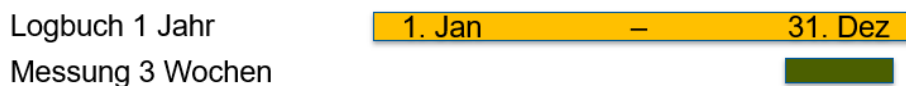


Abbildung 42: Unterschiedliche/ sich nicht vollständig überschneidende Zeitabschnitte

Ziel war es, die unbefriedigende Datensituation zu verbessern, den Daten-Gap zu schließen, dadurch die wissenschaftliche Präzession zu erhöhen. Das Ziel sollte mit dem Erstellen von Zeitreihen, die möglichst der Realität entsprachen, erreicht werden. Die Produktionspläne dienten dabei zum Abgleich mit dem Messzeitraum. Der Abgleich sollte Erkenntnisse über den Einfluss einzelner Produktionsdaten bringen, um anschließend mit den korrelierenden Daten eine Jahreszeitreihe erstellen zu können. Es war jedoch kein signifikanter Zusammenhang erkennbar. Daher wurde eine Schwankung in der Jahreszeitreihe abhängig vom produzierten Produkt modelliert und mit dem unterschiedlichen Energieverbrauch in Folge unterschiedlicher stoffphysikalischer Eigenschaften der Produkte begründet.

Nachfolgend wird die Methodik zur Jahreszeitreihenmodellierung ausführlicher beschrieben. Das Ergebnis in diesem Fall ist skeptisch und höchstensfalls als kleine Annäherung an die Realität zu betrachten. Die erzeugten Zeitreihen sind in jedem Fall etwas realistischer als die vorliegenden (Bilanz-)Daten, aber nicht als real anzusehen. Aufgrund der undurchschaubaren Datenlage ist das Vorgehen auch nicht evident, sondern als (für diesen Fall unzureichender) Versuch einer wissenschaftlichen Annäherung an die Realität zu sehen. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass durch die mangelnde Verifizierbarkeit die Jahresgesamtenenergiemengen abweichen. Es wird nach Abschätzungen über die Bilanzierung der Produktionspläne davon ausgegangen, dass sich dies nicht bzw. nur gering auf die Endergebnisse auswirkt.

Methodisch sollte ein Verschnitt von Produktionsdaten mit Leistungsmesswerten aufgrund korrelierender Daten stattfinden. Die Datenqualität aus den Logbüchern lies dies aber nicht uneingeschränkt zu. Eine grundsätzliche Problematik sind die unterschiedlichen Reihentypen. Die Logbücher wurden als Reihe vom Typ „Event Stamp“ (Setzen eines Zeitstempels nur bei einem Ereignis oder einer Änderung) aufgezeichnet, die mobilen Messgeräte zeichnen im Typ „Rolling Stamp“ (Setzen eines Zeitstempels nach festgelegtem Zeitintervall) auf. Ein paar weitere Problembeispiele sind im Folgenden dargestellt:

Beispiel 1: Fehlerhafte Zeitstempel - Überlappungen

Zeitstempel im Logbuch sind teilweise offensichtlich fehlerbehaftet, sofort und am eindeutigsten ist dies an den Überlappungen erkennbar. Abbildung 43 zeigt die Problematik.



Abbildung 43: Beispiel 1 - Überlappende Zeitstempel

Beispiel 2: Fehlerhafte Zeitstempel - Zeitliche Korrelation

Diese war nicht immer gegeben. Grund waren v. a. fehlerhafte Zeitstempel im Logbuch. Abbildung 44 zeigt die Problematik.

Zeitstempel	Logbuch:	1 Std.	1 Std.
	Messung:	0,9 Std.	0,8 Std.

Abbildung 44: Beispiel 2 - Abweichende Zeitstempel im Produktionslogbuch

Beispiel 3: Korrelation von Blocklänge und Wärmeleistung

Eine Korrelation über die Länge eines Blockes mit der Leistung war nicht gegeben. Daher konnte einzelnen Zeiträumen nicht eindeutig eine Leistung zugeordnet werden. Abbildung 45 zeigt die Problematik.

Länge = 0,5 Std.:	50 kW	40 kW
-------------------	-------	-------

Abbildung 45: Beispiel 3 - keine einheitliche Leistung von gleichlangen Blöcken

Beispiel 4: Korrelation von Produktsorte und Wärmeleistung

Eine Korrelation über das Produkt mit der Leistung war immer eindeutig gegeben. Daher konnte einzelnen Produkten nicht eindeutig eine Leistung zugeordnet werden. Abbildung 46 zeigt die Problematik.

Sorte = Griechischer Joghurt:	50 kW	27 kW
-------------------------------	-------	-------

Abbildung 46: Beispiel 4 - keine einheitliche Leistung von Produktsorten

Als Lösung wurde der zeitlich gewichtete Mittelwert für jede Sorte aus der Messung gebildet und auf die Produktionsblöcke des Produktionslogbuches projiziert. Abbildung 47 zeigt den Lösungsansatz.

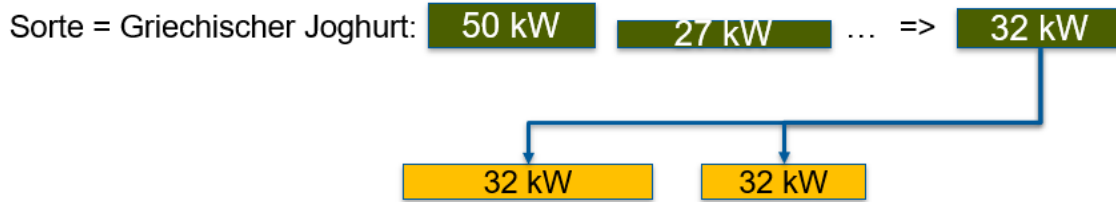


Abbildung 47: Lösungsansatz - Projektion des zeitlich gewichteten Mittelwertes

Als Endprodukt stehen generierte vollständige Jahreszeitreihen in einheitlichem Reihentyp Event Stamp, aber nicht fehlerfrei und nicht real. Einen Ausschnitt zeigt Abbildung 48

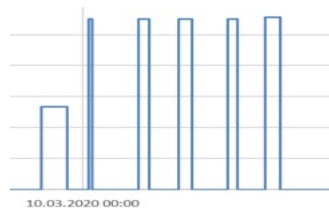


Abbildung 48: Ausschnitt einer Jahreszeitreihe in einheitlichem Reihentyp

Eine abweichende Annahme und Korrelation wurde bei der Modellierung der Zeitreihe für die Werkshallenheizung herangezogen. Hier wurde aus vorhandenen Mess- und Wetterdaten eine Korrelation des Heizleistungsbedarfs mit der Außentemperatur hergestellt. Die Zeitreihe ist daher auch vom Typ Rolling Stamp.

Fazit zur den generierten Jahreszeitreihen: Die aufgrund Datenqualität notwendigerweise gewählte Lösungsmethode ergibt Zeitreihen zwischen völlig generisch und absolut real und sind in jedem Fall skeptisch zu betrachten – das Daten-Endprodukt ist realistisch aber nicht real, mit kleiner Annäherung in Richtung real!

5.3 Effizienzpotenziale

Es bestehen im Molkereibetrieb Effizienzpotenziale, welche nach Analyse des betrieblichen Wärmesektors benannt werden können. Übergeordnet ist zu erkennen, dass die wesentlichen Effizienzverluste von zwei Ursachen getrieben sind. Diese bestehen zum einen in der historisch etablierten Wärmeerzeugung durch den Dampfkessel, bei der Wärme auf einem pauschalen Energie- (bzw. Temperatur- und Druck) -niveau erzeugt und verteilt wird. Erst am jeweiligen Verbraucher wird Energie und Druck nach Bedarf angepasst, wodurch in den meisten Fällen hohe exergetische Verluste auftreten. Zum anderen werden auch weitere unterschiedliche vorhandene Temperaturniveaus nicht immer adäquat an Verbrauchern mit demselben Temperaturbedarf eingesetzt.

Die größten Potenziale entstehen somit v.a. durch die Substitution der Dampfkesselwärme und dem besseren Matching von Temperaturniveaus zwischen Erzeugern, Abwärmequellen und Verbrauchern. Die Substitution betrifft vorrangig den Teil des Energiebedarfes, bei dem faktisch kein Dampf benötigt wird. Durch das BHKW wird hier schon ein großer Schritt in die richtige Richtung unternommen. Dieses stellt Wärmeenergie in Form von Dampf und Warmwasser bereit.

Die Potentiale können daher Großteils über folgende Maßnahmen ausgeschöpft werden:

- Produkterhitzung mit Warmwasser statt Dampf wo möglich
- Verstärkte Zwischenerhitzung bei der Produkterwärmung
- Substitution von Dampf durch Warmwasser bei der Beheizung der Werkshallen und Büros
- Erweiterung der Absorptionskälteanlage (im Modell um ein Modul/Verdopplung der Kälteleistung)
- Gezieltere Nutzung von Temperaturniveaus durch (Neu-)Bau eines (z. B.) 80-Grad-Kreislaufes
- Gezielte Nutzung der Abwärme aus der Druckluftherzeugung

5.3.1 Auffinden von zusätzlichen Wärmesenken und Wärmequellen und Wärmenutzungskonzepte

Von der Analyse und Potentialerhebung abgeleitet wurden in Verbindung mit verschiedenen Annahmen konkrete Wärmenutzungskonzepte ausgearbeitet. Diese Konzepte fanden auch in der Modellierung Anwendung, um deren Auswirkung auf die gesamtbetriebliche Energieversorgung abschätzen zu können. In Tabelle 10 sind die entwickelten Wärmenutzungskonzepte mit deren Annahmen beschrieben. Die Konzepte 5 bis 9 sind immer aufeinander aufbauend (Hinweis: Zähler 1 bis 4 sind für bestehende nicht weiterentwickelte Modellierungen reserviert und für die hiesige Auflistung nicht relevant). Im Modell wurden diese über geänderte Bedarfszeitreihen implementiert. Die Zeitreihen wurden über Energiebilanzen, welche sich aus den Annahmen ableiten lassen, neu modelliert. Ergebnisse aus Simulationen können im Kapitel 5.5.1 bei den Systemeffizienzpotentialen eingesehen werden. Zusätzliche Wärmequellen bestehen u.a. in der Abwärme von der Druckluftherzeugung, die ebenso wie das BHKW Wärme im Bereich von 80-90 °C bereitstellen kann, sowie Restwärme, die von Verbrauchern mit einem nicht direkt nutzbaren Temperaturniveau (meist unter 50 °C) abfällt. Eine Nutzung über getrennte Kreisläufe, Anhebung über eine Wärmepumpe, Endnutzung zur Gebäudeheizung oder Kombination aus diesen Möglichkeiten ist sinnvoll.

Tabelle 10: Beschreibung der entwickelten Wärmenutzungskonzepte

Zähler	Annahme Wärmenutzungskonzept
05	Verbraucher lassen sich ohne Umbau idealerweise mit existierendem 65° C Netz versorgen, da die Produktzieltemperatur diese nicht überschreitet; betrifft: Reinigung Säure, Quarkerhitzer
06	Werkshallenheizung wird mit 65° C Netz versorgt. Minimaler Umbau notwendig, Skalierung der Lüftergröße und Durchlaufmenge des Heizmediums; betrifft zusätzlich zu 05: Lüftung
07	Durch Zwischenerwärmung lassen sich einige weitere Verbraucher teilweise mit 65 °C Netz versorgen. Umbau der Wärmeübertrager notwendig, größerer Eingriff in bestehende Produktionsabläufe; betrifft zusätzlich zu 05 und 06: Reinigung Lauge, Reinigung Sammelwagen
08	Durch adäquatere Zuordnung von Temperaturniveaus lassen sich weitere Verbraucher mit entsprechend benötigten 65 °C oder 80 °C versorgen, Bau eines zusätzlichen Warmwassernetzes, größerer Eingriff in bestehende Produktionsabläufe; betrifft zusätzlich zu 05, 06 und 07: Rahmerhitzer, Milcherhitzer
09	Durch adäquatere Zuordnung von Temperaturniveaus lassen sich weitere Verbraucher mit entsprechend benötigten 65 °C oder 80 °C oder bis 95 °C versorgen, Bau eines zusätzlichen Warmwassernetzes und Direktleitung von BHKW zu Verbrauchern 85 °C aufwärts; größerer Eingriff in bestehende Produktionsabläufe; betrifft alle Verbraucher außer den Dampferhitzerteil des Joghurtherhitzers Hinweis: Konzept nur sinnvoll bei größeren BHKWs
10	Kombination aus 06 und einer AKM-Erweiterung; Eine Verdoppelung der AKM-Kapazität verbessert die Ausnutzung der BHKW-Wärme besonders bei großen BHKWs, bei denen die Wärme nicht mehr komplett von Verbrauchern aus der Produktion verbraucht wird
11	Kombination aus 07 und einer AKM-Erweiterung; Eine Verdoppelung der AKM-Kapazität verbessert die Ausnutzung der BHKW-Wärme besonders bei großen BHKWs, bei denen die Wärme nicht mehr komplett von Verbrauchern aus der Produktion verbraucht wird

5.3.2 Integration Wärmepumpen

Die Integration einer Wärmepumpe muss in jedem Fall mit in den Lösungsraum mit aufgenommen und hier genannt werden. Als zukunftsweisende Technologie der Sektorenkopplung ist sie besonders im Bereich der Wärmeeffizienz von Bedeutung. Auch in der Molkereibranche können hier weitere Potentiale erschlossen werden, die sich z.B. daraus ergeben, nicht mehr brauchbare Temperaturniveaus auf ein nutzbares Niveau anzuheben und dem Produktionsprozess wieder zur Verfügung zu stellen. Auch bzgl. des Flexibilisierungspotentials spielen elektrisch betriebene Wärmepumpen eine Rolle. Im Rahmen der Untersuchungen bei AMS spielte eine elektrische Wärmepumpe keine Rolle, da zu Projektbeginn von dieser Technik Abstand genommen wurde und in Abstimmung mit der Molkerei mittelfristig eher auf Elektrodenkessel gesetzt werden sollte. Daher lassen sich keine konkreten Aussagen dazu im Ergebnisteil angeben.

5.4 Flexibilitätspotenziale

Die Analyse der Ist-Situation kann relativ kurz zusammengefasst werden. Durch den hundertprozentigen Strombezug aus dem öffentlichen Netz entsprechend dem zeitaktuellen Bedarf der Produktion ist faktisch keine Flexibilität vorhanden, weder in der betrieblichen Energieversorgung noch in Form eines systemdienlichen Industriebetriebes. Zweites kann durch Verschiebung von Produktionskapazitäten forciert werden, ist jedoch nicht Gegenstand

des Projektes. Das Potential zu mehr Flexibilität besteht v.a. in der Implementierung von Sektorenkopplungstechnologien zur betrieblichen Energieversorgung. Mit dem zu Beginn bereits geplanten BHKW ist dafür der erste Grundstein gelegt. Entsprechender Neu- oder Zubau von Energiespeichern auf beiden Sektoren kann zu mehr Flexibilität beitragen. Besonders die Wärme- und Kältespeicherung kann die Wärmeproduktion des BHKW besser an den Produktionsbedarf angleichen. Je mehr das BHKW flexibel auf fluktuierende Strompreise reagieren soll, desto entscheidender wird die Wärmespeicherung. Wärmeseitig stellt sich die Frage welchen Einfluss Wärme-Kältekopplung auf die flexible Fahrweise des BHKWs hat. Hinsichtlich Effizienzpotential ist dies wahrscheinlich sinnvoll zu berücksichtigen. Die Systemeffizienzfrage kann erst im Modell beantwortet werden, wenn ersichtlich ist, dass eine AKM die Flexibilität des gesamten Betriebes eher begünstigt statt negativ beeinflusst. Power-to-Heat-Technologien wie Elektrodenkessel und Power-to-Cool-Anlagen in Form von Kompressionskälte begünstigen zumindest den günstigen EE-Strombezug. Ob dadurch auch zusätzlich Stromerzeugungskapazitäten des BHKWs auf günstige Zeiten verschoben werden können ist Gegenstand der Untersuchungen.

Zusammengefasst sind folgende Energiewandlungsanlagen und Speicherkomponenten in verschiedenen Konstellationen in einem Anlagenverbund im Modell vorgesehen:

- Blockheizkraftwerk
- Kompressionskälteanlage
- Absorptionskälteanlage
- Elektrodenkessel
- Wärmespeicher
- Kältespeicher

5.4.1 Studiendesign und Fragestellungen

In einer Übersicht zeigt Abbildung 49 das angelegte Design, aus dem Modellierungs- und zu Fragestellungen passenden Untersuchungsaufgaben ersichtlich sind. Die linke Spalte beinhaltet die Zeilenbeschriftung mit der Modellzuweisung. Die ersten beiden Modelle (historisches und modernisiertes Modell) sind als digitaler Zwilling der Molkerei zu sehen. Diese dienen zur grundsätzlichen Modellvalidierung über Referenzzahlen der Molkerei um daraus das Flex-Modell gesichert ableiten zu können, welches keinen realen Zwilling besitzt. Das historische Modell dient außerdem als Basis für ökonomische Vergleichbarkeit (s.a. genauere Beschreibung der Methodik in 5.4.2).

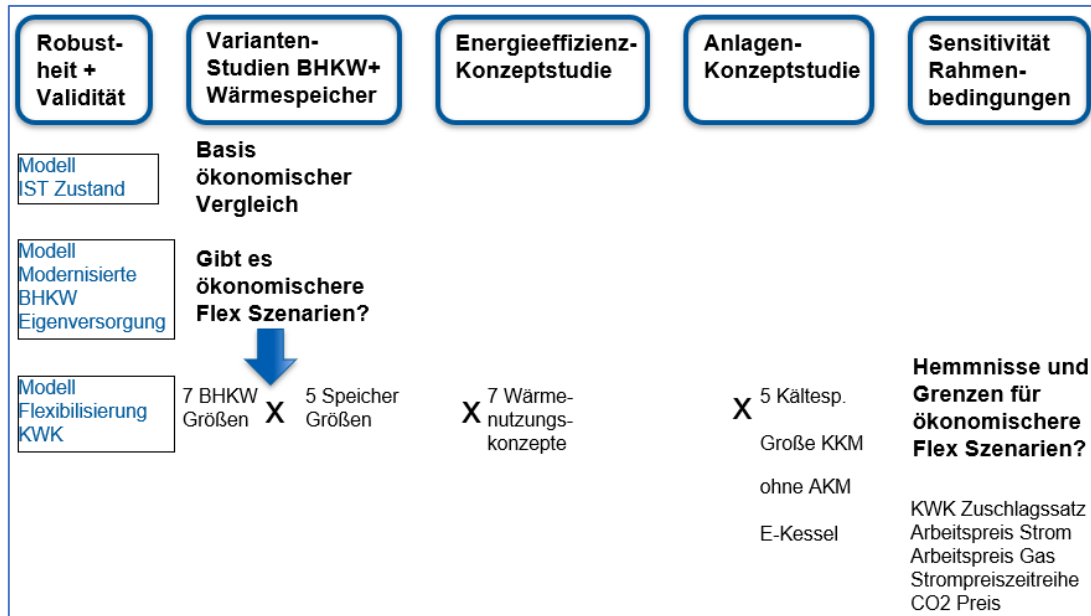


Abbildung 49: Studiendesign: Modellierungs- und Untersuchungspfade

Das Design ist in drei Studien untergliedert, um verschiedene Fragestellungen zu beantworten. Eine Variantenstudie mit Variation der BHKW- und Wärmespeichergrößen soll klären, ob es überhaupt Szenarien geben könnte, bei dem eine flexible KWK den Betrieb aus ökonomischen Gesichtspunkten besser mit Energie versorgen kann, als eine Eigenenergieversorgung. Dazu werden 7 BHKW-Leistungsklassen mit entsprechendem Wärmeauskopplungsverhältnis (Warmwasser/Dampf) modelliert. Die Speichergrößen unterscheiden sich in einem einfachen Parameter, dem Speichervolumen und somit der Speicherkapazität. Ergebnisse dazu können in 5.4.2, 5.4.4 und 5.5.2 eingesehen werden. Die Studie mit Wärmenutzungskonzepten zur Energieeffizienz betrachtet Möglichkeiten einer besseren Wärmenutzung im Produktionsbetrieb (genauer beschrieben in 5.3) und soll der Frage nachgehen, wie sich eine Umsetzung dieser Wärmenutzung in Verbindung mit der angepassten Energiebereitstellung auf technisch, ökonomisch und ökologisch auf den Gesamtbetrieb auswirkt. Ergebnisse enthält das Kapitel 5.5.1. Die Kombinationsvielfalt ist hier sehr hoch und lässt sich im Ergebnis nicht mehr gut auswerten und darstellen, weshalb nach einer Vorauswahl im Anschluss an sämtliche Parametervariationen sinnvoll erscheinende Anlagenkonzepte in einer abschließenden Studie nochmals ausführlich simuliert und diskutiert werden. Die Ergebnisse dazu sind im Kapitel 5.5 ausführlich behandelt. Da nach groben Vorabschätzungen absehbar ist, dass viele Flex-Szenarien unter Standort- und rechtlichen Rahmenbedingungen der Eigenversorgung ökonomisch unterlegen sind stellt sich die Frage an welcher Stellschraube justiert werden muss, dass sich dieser Nachteil im Sinne der Flexibilität wendet. Dazu dienen Sensitivitätsanalysen nach ceteris paribus und vereinzelt kombiniert wie in der rechten Spalte gelistet.

5.4.2 Techno-ökonomische Analysen neuer Energieversorgungskonzepte

Im beschriebenen technisch-ökonomischen Modell fließen lediglich laufende Kosten- und Erlöspositionen mit ein. Das ökonomische Simulationszwischenergebnis, die Energieversorgungskosten, ist für eine vollständige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für sich alleinstehend nicht aussagekräftig genug. Daher wird nachgelagert mit den Ergebnissen aus den techno-ökonomischen Simulationen ein Investitionsmodell bedient, um unter Einbezug von Investitionskosten die Wirtschaftlichkeit von Konzepten zu simulieren. Über das Modell werden zusätzlich die Wirtschaftlichkeitskennzahlen in einer dynamischen Investitionsrechnung ermittelt:

- Gesamtinvestition für das vorliegende Konzept
- Ersparnis ggü. historischer Versorgungslösung (BASIS)
- Amortisationszeit
- Kapitalwert (nach 15 Jahren)
- Interner Zinsfuß

Um die Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten für die Energieversorgung herzustellen, werden methodisch die Möglichkeiten als Opportunitäten angesehen und gegenübergestellt. Als BASIS (s.a. Abbildung 49) dient immer die historische Lösung (komplette Wärmeversorgung mit Erdgaskessel, Strombezug komplett aus öffentlicher Versorgung). Als Referenz (REF) dient immer die in Kapitel 5.1 beschriebene modernisierte Energieversorgungslösung. Der entscheidende Vergleich findet also zwischen den beiden Opportunitäten in Form der Referenz und dem jeweiligen betrachteten Flexibilisierungskonzeptvorschlag (KONZ) statt.

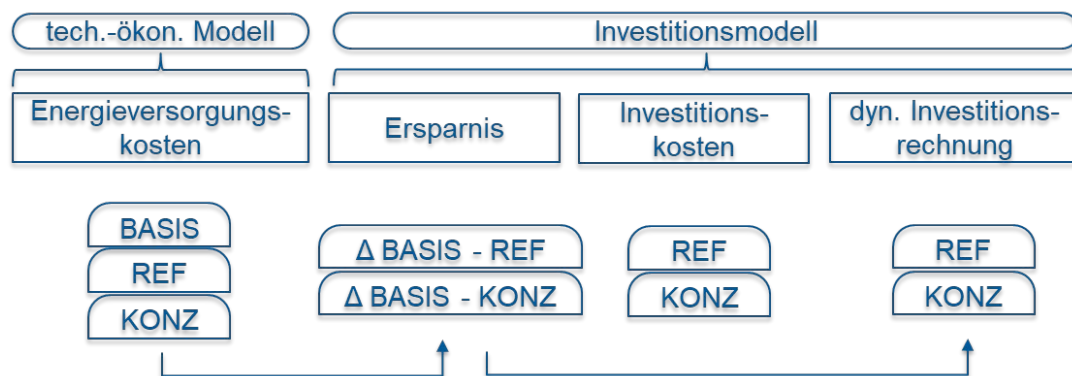


Abbildung 50: schematische Darstellung der Verknüpfung beider Modelle und der Weiterverwendung von Zwischenergebnissen

In Abbildung 50 ist schematisch die Verknüpfung beider Modelle und die Weiterverwendung von Zwischenergebnissen dargestellt. Die Energieversorgungskosten sind der Übergabewert aus dem techno-ökonomischen Modell und dienen im Investitionsmodell zur Errechnung der Ersparnis, die sich aus dem Betrieb nach der Modernisierung bzw. Flexibilisierung ergibt. Die Ersparnis errechnet sich aus der Differenz zum Basiswert entsprechend für die Modernisierung ($\Delta \text{BASIS} - \text{REF}$) und der Flexibilisierung ($\Delta \text{BASIS} - \text{KONZ}$) und fließt wiederum in die dynamische Investitionsrechnung als periodische Einzahlung ein. Die Investitionskosten setzen sich aus unterschiedlichen Positionen zusammen, deren Umfang und genauere Beschreibung aus Tabelle 11 zu entnehmen sind.

Tabelle 11: Positionsaufstellung und -beschreibung der Investitionskostenrechnung

Position der Investition	Berechnung	Quelle/Beschreibung/ Kommentar
BHKW-Modulkosten	Kostenfunktion	Modul inklusive (Preise: netto ohne MwSt.): KWK-Modul (Motor und Generator), Schalldämpfung, Katalysator, Schmierölversorgung und -entsorgung, Schaltschrank, Be- und Entlüftung, Transport und Montage, Inbetriebnahme (ASUE Arbeitskreis Brennstoffzellen/BHKW et al. 2014)
BHKW-Installationskosten	Kostenfunktion	Kosten für Transport, Aufstellung, Montage, Inbetriebnahme, Probetrieb und Abnahme, Kosten für Anbindung an Brennstoffversorgung, Abgasleistung, Einbindung an Strom und Wärmenetz (ASUE Arbeitskreis Brennstoffzellen/BHKW et al. 2014)
BHKW-Zusatzkosten	10 % Pauschale	Für Sonstiges (ASUE Arbeitskreis Brennstoffzellen/BHKW et al. 2014)
BHKW Betriebsgebundene Kosten	Kostenfunktion	Instandhaltungskosten; Generalüberholung; Vollwartungsverträge (ASUE Arbeitskreis Brennstoffzellen/BHKW et al. 2014)
Wärmespeicher-Ausbau	Mittelwert aus 2 Kostenfunktionen	(Schulz und Brandstät 2013), (Beer 2011)
Kältespeicher-Bau	Mittelwert aus 2 Kostenfunktionen Wärmespeicher x Faktor 1,5 für Kältespeicher nach Herstelleranfrage	(Schulz und Brandstät 2013) (Beer 2011) Eigene Herstellerbefragungen
Absorptionskälteanlage	Herstellerangaben	(AGO GmbH Energie+Anlagen)
Kompressionskälteanlage Zubau	Kostenfunktion Wärmepumpen x Faktor 1,5 für Peripherie	(Wolf 2026)
Elektrodenkessel	Kostenfunktion	(Eller 2015)

Außerdem wurden folgende Annahmen im Modell getätigt (VDI-Richtlinie 2067):

- Kalkulationszins: 5 %
- Abschreibungszeitraum BHKW: 15 Jahre
- Abschreibungszeitraum Wärme-/Kältespeicher: 30 Jahre
- Abschreibungszeitraum AKM/KKM/E-Kessel: 20 Jahre
- Betrachtungszeitraum (Kapitalwert nach): 15 Jahre

Ob Variation von technischen oder ökonomischen Parametern, die meisten Analysen werden rein nach ceteris paribus durchgeführt. Die Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten stößt an mehreren Enden an Grenzen des Projektes. Es muss daher darauf hingewiesen werden, dass Ergebnisse kritisch zu betrachten sind, da eine Variation mehrerer interagierender, teilweise voneinander abhängiger Parameter Interaktionen verursachen würden, welche sich in den Ergebnissen auch niederschlagen würden. Die ceteris paribus Methode muss hier als vereinfachte Kompromisslösung angesehen werden, um Anhaltspunkte zu liefern. Eine detaillierte Analyse der Rahmenbedingungen und förderrechtlicher Anpassungsmaßnahmen war im Projekt nicht vorgesehen. Zur Beantwortung solch spezifischerer Fragen muss die Variantenmatrix entsprechend vollständig gerechnet werden.

5.4.3 Ergebnisse Betrachtungsjahr 2020

Dem Modell sind die Standortdaten in Form von Energiebedarfszeitreihen aus dem Jahr 2020 über den gesamten Betrachtungszeitraum hinterlegt. Weitere Standortdaten wie Arbeitspreise für Strom und Gas, Energiedaten wie Zeitreihen des Day-Ahead Strombörsenpreis und des GEF ändern sich im Modell mit dem Betrachtungsjahr. Ebenso haben sich über Projektlaufzeit bzw. Analysezeiträume die regulatorischen Rahmenbedingungen besonders aus EEG und KWKG stark geändert.

Die Diagramme zur Ergebnisdarstellung zeigen die Simulationsergebnisse und sind jeweils gleich aufgebaut. Die Abszissenachse zeigt die BHKW-Kapazität in MW_{el}. Auf der Ordinatenachse ist die gewünschte Ergebnisgröße aufgetragen. Die Legende auf der rechten Seite unterscheidet die Farben der Säulen, welche den Ergebniswert des variierenden Parameters anzeigt. Die dicke rote Markierung kennzeichnet das Vergleichsergebnis des Eigenversorgungskonzeptes.

Das Jahr 2020 ist ein Jahr mit repräsentativ noch niedrigen Energiebezugskonditionen und den gültigen Rahmenbedingungen der Jahre vor 2020. Als wichtigste abgeleitete Modellgrößen werden daher noch die EEG-Umlage und eine 40-prozentige EEG-Umlagereduzierung von selbstverbrauchtem Strom, sowie der durchschnittliche Wert aus dem Ausschreibungssegment des KWK-Zuschlags für Volleispeisung der letzten Jahre angenommen.

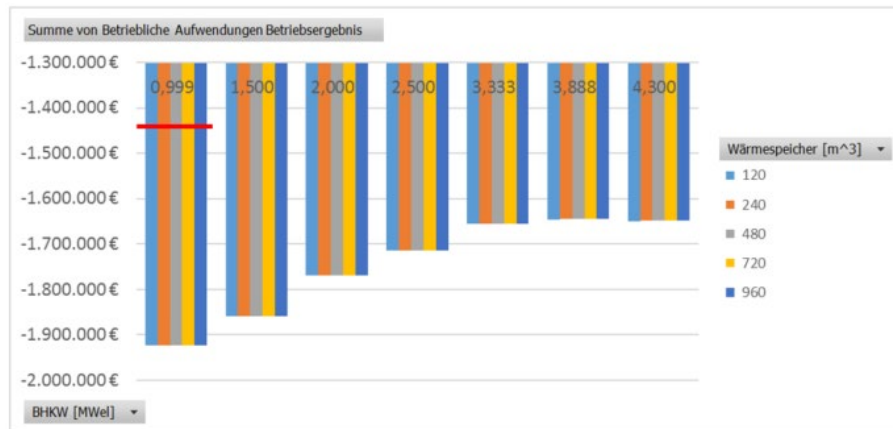


Abbildung 51: Varianten 2020

Abbildung 51 zeigt die Ergebnisse der Variantenstudie zu BHKW- und Wärmespeichergößen bzgl. Energieversorgungskosten (ohne Investitionsaufwendungen). Es zeigt sich, dass keines der Varianten niedrigere Energieversorgungskosten erreicht als das Eigenversorgungskonzept. Der Wärmespeicher beeinflusst die betrieblichen Aufwendungen nicht in relevantem Ausmaß wie erwartet (allerdings mit speziellen Vor-Ort Charakteristika zu begründen). Die BHKW-Größe wiederum beeinflusst bis zu einer bestimmten Leistung die Aufwendungen relevant. Betrachtet man die Investitionskosten liegen die Amortisationszeiten zwischen 7 und 16 Jahren ggü. 3 Jahren bei der Eigenversorgung.

5.4.4 Ergebnisse Betrachtungsjahr 2022

Das Jahr 2022 kann durchaus als extrem hinsichtlich Änderungen bei Rahmenbedingungen, Energiebezugskonditionen, Preisspitzen, -täler und –spread an der Strombörse angesehen werden. Auf Basis von 2020 werden Arbeitspreiserhöhungen bei Strom um Faktor 2,5 und bei Gas um Faktor 3,7 unterstellt. Eine CO₂-Bepreisung nach BEHG und der Wegfall der EEG Umlage sind berücksichtigt.

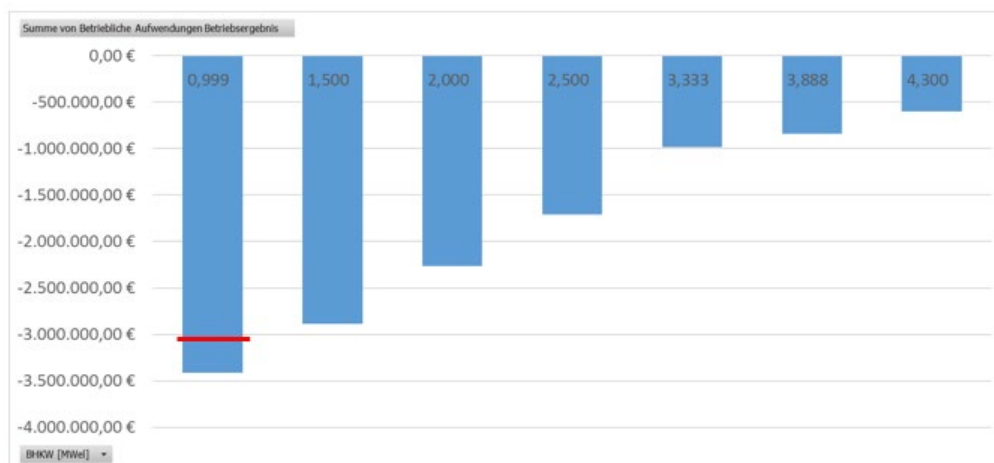


Abbildung 52: Energieversorgungskosten BHKW-Variantenvergleich 2022

Abbildung 52 zeigt die Ergebnisse der Variantenstudie zu BHKW-Größen unter diesen Rahmenbedingungen ohne Zubau von Speicherkapazität für das Jahr 2022. Anders als 2020 erreichen alle Varianten niedrigere Energieversorgungskosten als das Konzept zur Eigenversorgung. Auch die Amortisationszeiten der Investitionen fallen im Vergleich besser aus. Beispielsweise liegen die Amortisationszeiten ab 2 MW el. BHKW-Leistung zwischen 3 und 4 Jahren ggü. 16 Jahren bei der Eigenversorgung.

5.4.5 Ergebnisse Betrachtungsjahr 2021

Zumindest die Charakteristik des Day-Ahead Jahresverlaufs könnte tendenziell die nächsten Jahre ähnlich ausgeprägt sein, was die größte Unsicherheit der Modellierung und der praktischen Auslegung darstellt. Die übrigen Modellvorgaben bleiben dieselben wie 2022.

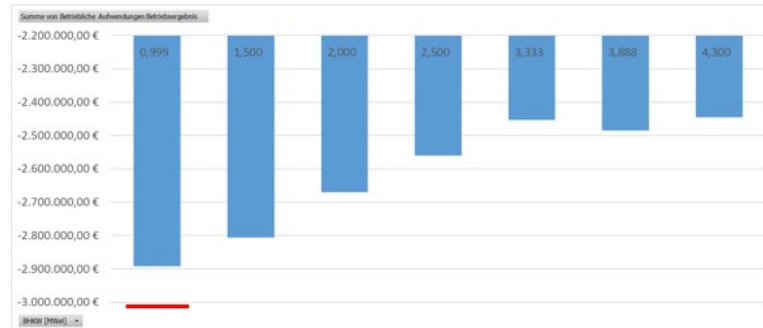


Abbildung 53: Energieversorgungskosten BHKW-Variantenvergleich 2021

Abbildung 52 zeigt die Ergebnisse für das Jahr 2021. Hier ist ersichtlich, dass im vermeintlich repräsentativeren Jahr als 2020 und 2022 alle Varianten niedrigere Energieversorgungskosten erreichen könnten als die Eigenversorgung. Amortisationszeiten liegen zwischen 6 und 8 Jahren und damit deutlich niedriger als die 16 Jahre bei der Eigenversorgung.

Aus technischer Sicht ist mit den Bedingungen im Jahr 2021 im Gegensatz zu den anderen Jahren ein BHKW-Betrieb im Sinne der Flexibilität gegeben und eine strompreisorientierte Fahrweise an diesem Standort möglich. Die Vollbenutzungsstunden liegen für alle BHKW-Größen im Bereich 2700 bis 3700 Stunden. 2020 werden 5500 und 2022 werden 7000 Stunden nur bei großen BHKW unterschritten.

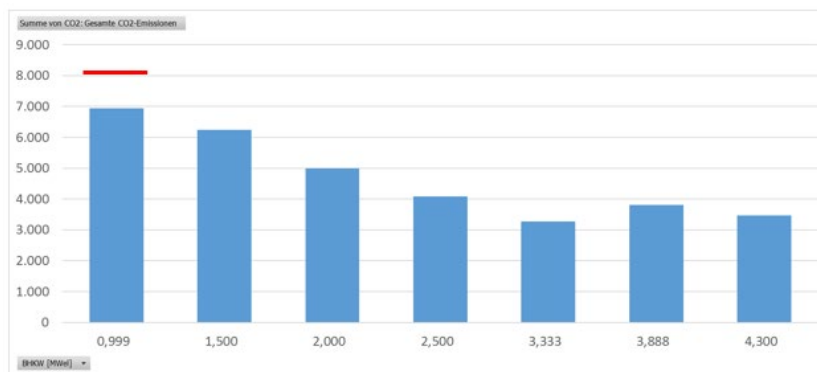


Abbildung 54: betriebliche CO2 Emissionen BHKW-Variantenvergleich 2021

Ein wichtiger Blick soll auch den betrieblichen Emissionen in Abbildung 54 gelten. Unter Anwendung der Verdrängungsmixmethode (Pfeifroth und Beer 2023) bei flexibler Stromeinspeisung liegen in allen Jahren für alle Varianten die CO2 Emissionen deutlich unter dem Wert bei Eigenversorgung. Tendenziell sinken diese mit steigender BHKW-Größe. Die Bilanz für das öffentliche Versorgungssystem fällt aufgrund des niedrig emittierenden Brennstoffes im Vergleich zum GEF des Strommix ebenfalls positiv aus. Die Herausforderung für Unternehmen ist jedoch, dass ihre positive Bilanz nicht ohne weiteres ins Umweltmanagementsystem integrierbar ist und dadurch nicht ausreichend honoriert wird.

5.4.6 Zwischenfazit

Aus den einzelnen Ergebnissen lassen sich zusammenfassend drei wesentliche Punkte ableiten:

- 2020 bei relativ günstigen und konstanten Energiebezugspreisen waren komplexe flexible Versorgungskonzepte betriebswirtschaftlich i. d. R. nicht sinnvoll
- 2021 mit höheren und volatileren Kosten für Energie ist eine strombörsenpreisorientierte Fahrweise betriebswirtschaftlich möglich und die Konzepte können mit überschaubaren Amortisationszeiten refinanziert werden
- bei steigender Volatilität der Energiepreise und Rahmenbedingungen können die flexiblen Konzepte eine resilientere Alternative darstellen und zu Risikominimierung nicht nur in extremen Jahren beitragen und für eine stabilere Energiebezugskostenstruktur bei geringeren CO₂-Emissionen sorgen

5.4.7 Parameterstudien zu restriktiven oder inzentiven förderrechtlichen Rahmenbedingungen

Die ständige Änderung der Rahmenbedingungen durch Gesetzesnovellen, geo- und energiepolitische Ereignisse während der Projektlaufzeit erschweren die Aussagekraft dieser Untersuchungen und dieses Kapitels. Annahmen für Wirtschaftlichkeitsparameter, die von den Ereignissen abhängig sind, waren schwer abzuschätzen. Die zu Mitte des Projekts durchgeführten Sensitivitätsanalysen basieren auf dem Jahr 2020 mit Variation einiger Parameter nach ceteris paribus. Ursprüngliches Ziel war die Auswirkungen von Förderbedingungen auf die unterschiedlichen Anlagenkonzepte aufzuzeigen. Teilweise wurde zu den Einzelparametern in Kombination die Jahreszeitreihe sobald bekannt variiert, um die Wechselwirkung mit dem Marktgeschehen darzustellen. Dieses Vorgehen erwies sich aufgrund der eingangs genannten Großereignisse im Nachhinein als nicht geeignet. Die eingetretenen Ereignisse überstiegen tlw. die festgelegten Sensitivitätsgrenzen. Konkrete jahresabhängige Szenarien können hiermit nicht abgebildet werden. Auf eine Darstellung der Auswertungen wird an dieser Stelle verzichtet, da die Aussagekraft als gering eingeschätzt wird. Bei Bedarf können diese bei den Projektverantwortlichen eingesehen werden. Am interessantesten sind hier noch die Variation der CO₂-Bepreisung nach BEHG. Die Differenz der Energieversorgungskosten zwischen dem REF- und dem KONZ-Szenarien wird mit steigendem CO₂-Preis für alle Szenarien größer.

Konkrete Jahresszenarien wurden bei den Untersuchungen der Systemeffizienzpotentiale mit ausgewählten Gesamtkonzepten betrachtet (s. dazu Kap. 5.5.2). Hier wurden Parametersätze festgelegt, die für den Betriebsstandort als real angenommen werden können. In Tabelle 12 sind die Parameter mit Wert und Kriterien zur Festlegung des Wertes definiert.

Tabelle 12: Kriterien zur Festlegung der rahmenbedingten ökonomischen Parameter für Jahresszenarien der Gesamtkonzepte

Parameter	Kriterien	Wert 2020	Wert 2021	Wert 2022
Arbeitspreis Gas	orientiert sich an Gaspreisbremse für KMU	Basiswert	Faktor 3,7	Faktor 3,7
Arbeitspreis Strom	orientiert sich an Strompreisbremse für KMU	Basiswert	Faktor 2,5	Faktor 2,5
Flexibler Strompreis	Day-Ahead Jahreszeitreihe	-	-	-
KWK Zuschlag Volleinspeisung	Mengengewichtetes Mittel der Ausschreibungen 2020 bis 2022	61,1 €/MWh	61,1 €/MWh	61,1 €/MWh
KWK Zuschlag Eigenversorgung	BHKW-Größen entsprechender fester Zuschlagssatz KWKG Stand 2020	47,5 €/MWh	47,5 €/MWh	47,5 €/MWh
EEG-Umlage	2020 gültiger Umlagesatz; Wegfall der Umlage ab 01.07.2022 für immer; Annahme für Szenarien mit Zeitreihe 2021 und 2022	67,56 €/MWh	0	0
EEG Abgabe Eigenstrom	Umlagereduzierung auf 40% für KWK-Anlagen von 1 bis 10 MW _{el} ; entfällt komplett mit Wegfall der Umlage	27,02 €/MWh	0	0
CO ₂ Preis	Jeweils geltender Preis nach BEHG; Anpassung nach 3. Entlastungspaket berücksichtigt	0	25 €/t	30 €/t

5.5 Systemeffizienzpotenziale

5.5.1 Einbinden der Wärmenutzungskonzepte

Die in Kap. 5.3 vorgeschlagenen Potentiale und in 5.3.1 entwickelten Wärmenutzungskonzepte werden an dieser Stelle in die Flex-Modelle eingebunden, um daraus sich ergebende Systemeffizienzpotentiale zu erkunden. Die Wärmeausnutzung im Gesamtbetrieb wird verbessert, wodurch sich bei entsprechender KWK-Fahrweise in geeignetem Anlagenverbund zusätzlich Vorteile für die Flexibilisierung ergeben können. Durch diese Weiterentwicklung wird erwartet, dass die (System-)Effizienz gesteigert und die Emissionen gemindert werden können.

Bei ökonomisch sinnvoller Betriebsweise größerer BHKWs entstehen Wärmemengen, welche nicht immer zeitaktuell genutzt werden können. Zur Veranschaulichung werden diese an dieser Stelle mit einem Wert von 0 Cent deklariert. Je größer die BHKW-Leistung, desto mehr kostenlose „0-Cent-Wärme“ steht zur Verfügung. Dies soll den Anreiz verdeutlichen, weitere Wärmesenken im Betrieb zu erschließen und alternative Wärmenutzungen umzusetzen, auch wenn die in 5.3.1 beschriebenen Konzepte und deren Umbaumaßnahmen im Rahmen des Projektes nicht mit konkreten Investitionsvolumen verknüpft wurden. Der veranschaulichende (Modell)kennwert der ungenutzten „0-Cent-Wärme“ gibt die Möglichkeit zur besseren Abschätzung bei der Konzeptionierung, welche BHKW Größe mit welchem Anlagenkonzept und mit welchem Wärmenutzungskonzept die beste Gesamtlösung darstellt.

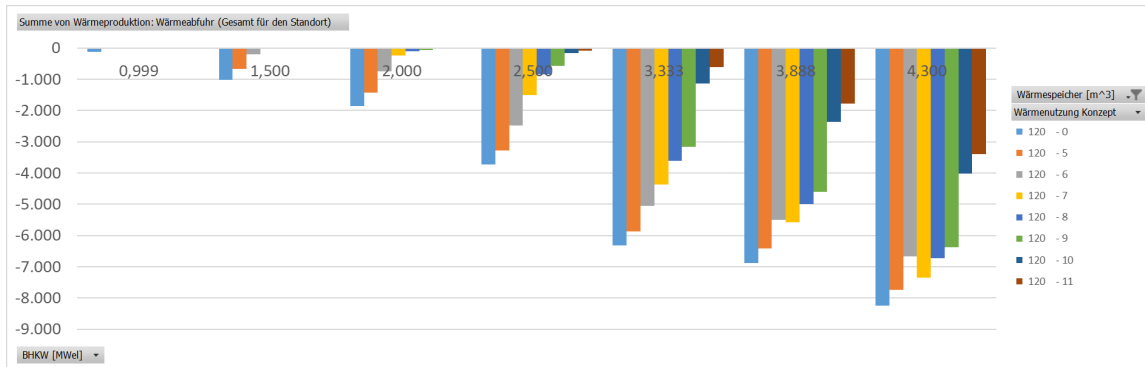


Abbildung 55: Verringerung der ungenutzten „0-Cent-Wärme“ durch die Nutzungskonzepte

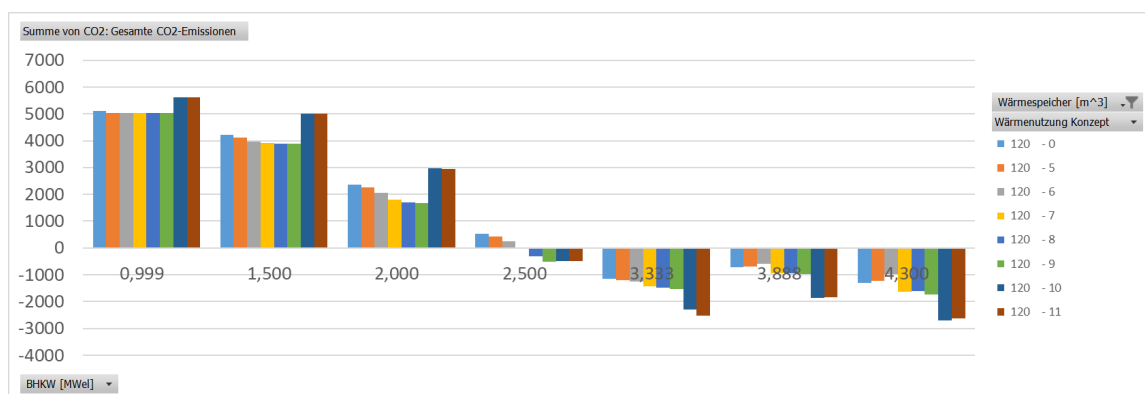


Abbildung 56: Verringerung der CO₂ Emissionen durch die Nutzungskonzepte

Um einen Eindruck zu bekommen werden die Ergebnisse nur kombiniert mit BHKW-Leistungsvariation genauer betrachtet (Betrachtungsjahr 2020). Abbildung 55 zeigt, wie sich die 0-Cent-Wärme mit den Kombinationen aus BHKW-Größe und Wärmenutzungskonzept verhält. Für alle Leistungsklassen gilt: je ausgefeilter die Wärmenutzung, desto weniger 0-Cent-Wärme bleibt ungenutzt. Beispielhaft wird das BHKW mit 2,5 MW_{el} näher betrachtet. Hier ergibt sich bereits eine relevante ungenutzte Menge an 0-Cent-Wärme ohne zusätzliche Effizienzmaßnahmen (Konzept 0 – hellblauer Balken). Die 0-Cent-Wärme verringert sich stückweise mit entsprechenden Wärmenutzungskonzepten. Bei Konzepten mit größerer AKM (Konzept 10 – dunkelblaue Balken) kann die 0-Cent-Wärme sogar komplett genutzt werden.

Abbildung 56 zeigt die entsprechende Verringerung der CO₂ Emissionen aufgrund der verbesserten Systemeffizienz nach Einbindung der Wärmenutzungskonzepte. Dabei werden mit steigender BHKW-Leistung auch die betrieblichen Emissionen gemindert. Bei dem Beispiel mit 2,5 MW_{el} gehen die Emissionen gegen Null, bei größeren BHKW sogar ins Negative. Tendenziell korreliert ab dieser Leistungsgrenze eine ausgefeiltere Wärmenutzung auch vollständig mit sinkenden Emissionen innerhalb der Leistungsklasse.

Fazit zu den Wärmenutzungskonzepten:

bei entsprechendem Wärmenutzungskonzept kann auch bei mittleren BHKW-Größen (2,5/3,3 MW) die 0-Cent-Wärme effizient eingesetzt und zur betrieblichen CO₂ Reduktion werden.

5.5.2 Auswahl und Vorschlag von Konzepten

Die Vielzahl an möglichen Parametrierungen, Konzepten aus den Kombinationsmöglichkeiten und den daraus resultierenden Lösungen, die sich aus dem methodischen Vorgehen nach ceteris paribus ergeben sind verständlicherweise in Kürze nicht überschaubar. Bereits bei der Simulation setzt diese mehrere tausend Möglichkeiten umfassende Sammlung in der Rechenzeit Grenzen. Die Auswertung aller Ergebnisse ist kognitiv nicht mehr zu erfassen.

Um abschließend einen guten Überblick zu erhalten, werden aus den Tendenzen, die aus den bereits beschriebenen Untersuchungen zu erkennen oder durch Praxisrelevanz zu begründen sind, 5 Vorschläge von Gesamtkonzepten gemacht, welche als solche jeweils die Simulation mit entsprechenden Parametrierungen nochmals durchlaufen.

In den Tabellen Tabelle 13 und Tabelle 14 werden die Annahmen festgehalten. Tabelle 13 enthält nochmals die Grundparameter, die für die Konzepte angenommen wurden, eingeteilt nach den Jahren des Betrachtungszeitraumes. Für die Wärmespeichergröße wurden 480 m³ (entspricht ca. 18 MWh) gewählt, da für noch größere Speicher kein nennenswerter Unterschied mehr in den Ergebnissen zu erwarten war, die Investitionskosten jedoch weiter steigen würde. Für den Kältespeicher wurden 158 m³ (entspricht im Modell ca. 5,5 MWh) gewählt, da diese Kapazität bei der Molkerei sowieso errichtet werden sollte. Der KWK-Zuschlag ergibt sich aus dem mengengewichteten Mittel der drei Betrachtungsjahre.

Tabelle 13: Grundparameter und -annahmen zu den ausgewählten Konzepten

Jahr	Wärmespeicher	Kältespeicher	KWK Zuschlag	Strompreis Zeitreihe	Strom Arbeitspreis	Gas Arbeitspreis	BHE G CO ₂ Preis	CO ₂ äq Zeitreihe	EEG Umlage
2020	480 m ³	158 m ³	61,1 €/MWh	2020	Basis	Basis	0	2020	X
2021	480 m ³	158 m ³	61,1 €/MWh	2021	X2,5	X3,7	25 €/t 2021		0
2022	480 m ³	158 m ³	61,1 €/MWh	2022	X2,5	X3,7	30 €/t 2022		0

Die Anlagenkonfigurationen und die Wärmenutzung für die 5 ausgewählten Gesamtkonzepte A bis E sind in Tabelle 14 festgelegt. Für die Wärmenutzung kommen aus CO₂-Minderungssicht kombiniert mit den Anlagenkonfigurationen bevorzugt die Konzepte 7 und 11 aus Kapitel 5.3.1 in Frage. Diese beiden haben auch für AMS aufgrund der Umsetzungswahrscheinlichkeit die höchste Relevanz. Die BHKW-Größen sind auf 2 MW_{el} und 3,8 MW_{el} beschränkt. Bei kleineren Leistungsgrößen ergeben sich zu geringe technische Flexibilisierungspotentiale. Es können kaum zusätzliche Erlöse aus dem Stromverkauf realisiert werden, um mit dem Eigenversorgungskonzept zu konkurrieren. Ein BHKW mit 3,8 MW_{el} erscheint als eine adäquate Größe für die Kombination mit 480 m³ Speicher und das Wärmenutzungskonzept mit maximaler Wärmenutzung. Bei den Konzepten C und E wird zusätzlich ein E-Kessel mit 2 MW_{th} modelliert. Die Konzepte A und C enthalten die standardmäßige AKM, B ein doppelt so großes AKM-Modul, D und E sollen ohne eine AKM auskommen.

Tabelle 14: Anlagenkonfiguration und Wärmenutzung der ausgewählten Konzepte

Konzept	BHKW	E-Kessel	AKM	KKM Zubau	Wärmenutzung
EV	0,999 MW _{el}	-	X	-	-
A	2,0 MW _{el}	-	X	-	7
B	3,888 MW _{el}	-	X2	-	11
C	2,0 MW _{el}	X	X	-	7
D	2,0 MW _{el}	-	-	-	7
E	3,888 MW _{el}	X	-	-	7

Die folgende Zusammenstellung an Abbildungen und Tabellen zeigen die Simulationsergebnisse der ausgewählten Gesamtkonzepte. Die Diagramme sind jeweils gleich aufgebaut. Die Abszissenachse zeigt die BHKW-Kapazität in MW_{el}. Auf der Ordinatenachse ist die gewünschte Ergebnisgröße aufgetragen. Die Farben der Säulen zeigen den Ergebniswert des jeweiligen Konzeptes (A-hellblau; B-orange; C-grau; D-gelb; E-dunkelblau). Die grüne Säule zeigt zum Vergleich das Ergebnis für das Eigenversorgungskonzept. Abbildung 57, Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen jeweils die Ergebnisse zu den Energieversorgungskosten für die Betrachtungsjahre 2020, 2021 und 2022. Die Tabellen Tabelle 15 und Tabelle 16 enthalten die Investitionskosten und Kennzahlen der dynamischen Investitionsrechnung aller Konzepte und Betrachtungsjahre.

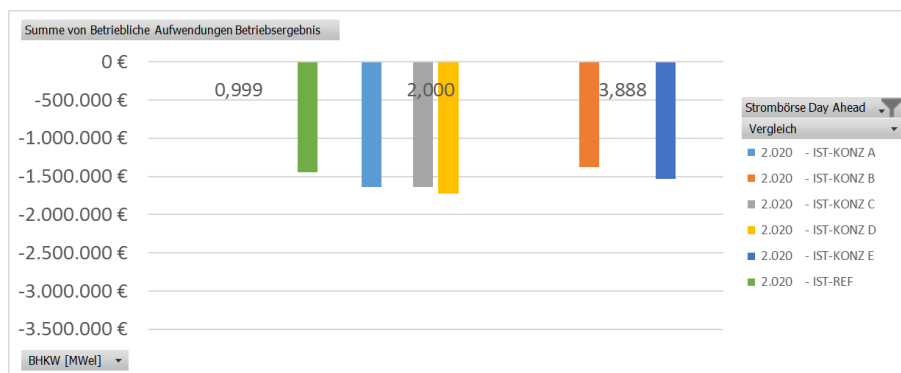


Abbildung 57: Energieversorgungskosten im Gesamtkonzeptvergleich - Betrachtungszeitraum 2020

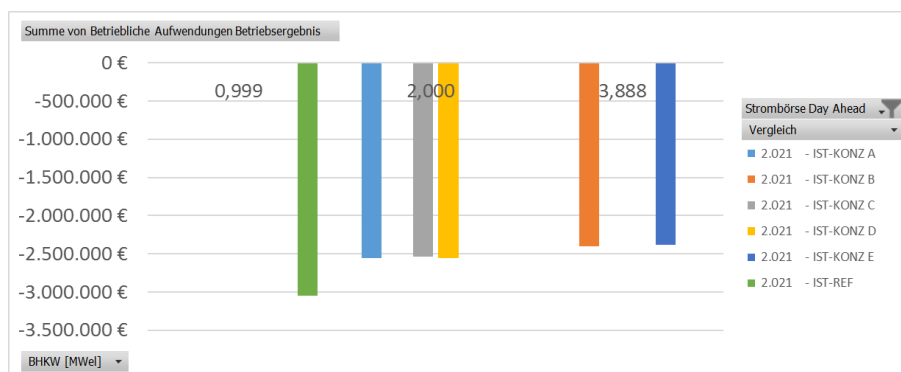


Abbildung 58: Energieversorgungskosten im Gesamtkonzeptvergleich - Betrachtungszeitraum 2021

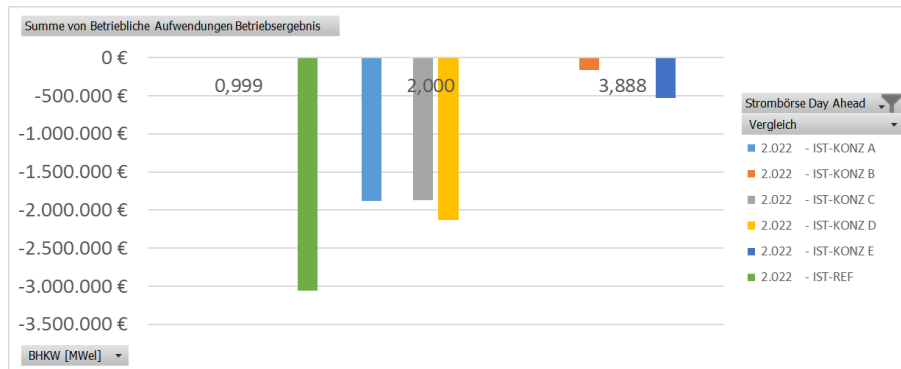


Abbildung 59: Energieversorgungskosten im Gesamtkonzeptvergleich - Betrachtungszeitraum 2022

Tabelle 15: Investitionskosten und Ersparnisse beim Betrieb im Gesamtkonzeptvergleich

Konzept	Gesamtinvestition [€]	Ersparnis [€/a] (ggü. ursprünglicher Versorgung)		
		2020	2021	2022
EV	1.812.823	864.834	174.687	186.167
A	3.275.166	667.130	667.096	1.363.124
B	5.533.525	934.956	820.753	3.081.388
C	3.900.760	667.127	689.685	1.371.729
D	2.352.766	587.227	671.280	1.113.935
E	4.459.119	775.991	837.599	2.717.279

Tabelle 16: dynamische Investitionskennzahlen im Gesamtkonzeptvergleich

Konzept	Amortisationszeit [a]			Kapitalwert nach 15 a [€]			Interner Zinsfuß [%]		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022	2020	2021	2022
EV	3	16	166	166.431.533	-715.402	-607.685	43,14	-0,99	-0,01
A	7	7	31	631.687	2.338.076	8.700.339	12,94	15,20	37,32
B	9	10	3	681.120	1.930.157	23.078.084	7,31	9,97	52,61
C	9	8	4	1.081.292	2.025.881	8.246.663	9,46	12,44	31,13
D	6	5	3	1.746.477	3.226.404	7.036.245	17,42	23,90	42,02
E	11	7	2	36.394	3.421.367	20.675.252	5,20	15,14	58,27

Anhand der ökonomischen Auswertung zeigt sich deutlich, dass das Konzept der Eigenversorgung nur 2020 vorteilhaft ggü. den Flex-Konzepten abschneidet. Nur Konzept B schneidet bezüglich der Energieversorgungskosten in diesem Jahr geringfügig schlechter ab. In den anderen Jahren weist das EV-Konzept mit Abstand die höchsten Kosten zur Energieversorgung auf. Die vergleichsweise geringen Investitionskosten führen in Folge auch nur im Betrachtungszeitraum 2020 zu vorteilhaften Investitionskennzahlen.

Vergleicht man die Flex-Konzepte anhand der ökonomischen Auswertung können einige Feststellungen gemacht werden.

Die Konzepte mit dem größten BHKW schneiden immer besser ab als die Konzepte mit dem kleineren BHKW. Konzept E mit dem E-Kessel ist 2020 ökonomisch Konzept B unterlegen. Für die anderen beiden Jahre ist es jedoch etwas zu bevorzugen. Das bedeutet insgesamt, dass in Jahren mit fluktuierenden Preisen bei sehr groß dimensioniertem BHKW die Wärmebereitstellung durch BHKW und ergänzendem E-Kessel ökonomisch sinnvoller ist als mit BHKW-Abwärme Absorptionskälte bereitzustellen. Es sollte dabei jedoch die Höhe an ungenutzter Wärme immer im Blick behalten werden.

Da die Investitionskosten für diese Konzepte jedoch tlw. über doppelt so hoch ausfallen als für die Konzepte mit 2-MW-BHKW, lohnt v.a. aus Liquiditätsgründen ein genauerer Blick auf die Konzepte A, C und D. Konzept D schneidet hinsichtlich der Energieversorgungskosten vergleichsweise ungünstig ab. Bei den jährlichen Ersparnissen belegt D tendenziell eher hintere Platzierungen. Es wird jedoch auf Investitionen über ein größeres BHKW hinaus verzichtet, was zu deutlich geringsten Investitionskosten führt und sich im Vergleich positiv auf die Investitionskennzahlen auswirkt. Das bedeutet, dass zusätzliche Flexibilitätskomponenten keine ausreichenden langfristigen ökonomischen Vorteile durch die fluktuierenden Strompreise generieren können. Auch hier sollten neben den ökonomischen Zahlen die Höhe an ungenutzter Wärme immer im Blick behalten werden, weshalb Konzepte ohne AKM nicht immer optimal sind.

Weitere Blicke müssen ökologischen und technischen Zahlen zukommen. Ausgewählt zeigen Abbildung 60, Abbildung 61 und Abbildung 62 jeweils die Ergebnisse zu den betrieblichen CO₂-Emissionen für die Betrachtungsjahre 2020, 2021 und 2022. Tabelle 17 enthält die Vollbenutzungsstunden des jeweiligen BHKW aller Konzepte und in jedem Betrachtungsjahr.

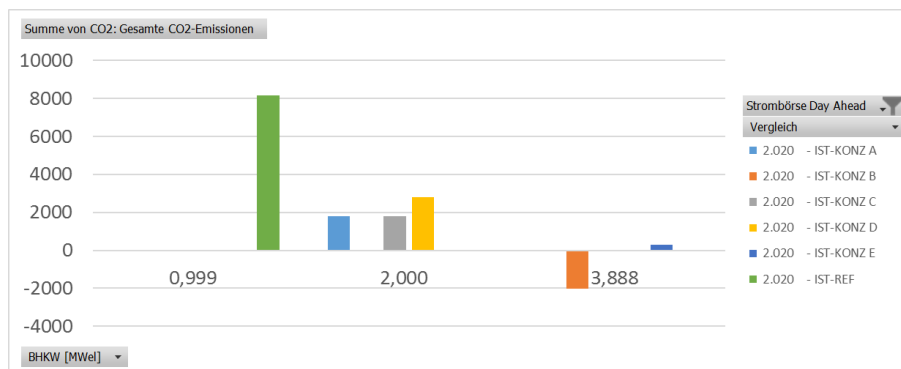


Abbildung 60: CO₂-Emissionen im Gesamtkonzeptvergleich - Betrachtungszeitraum 2020

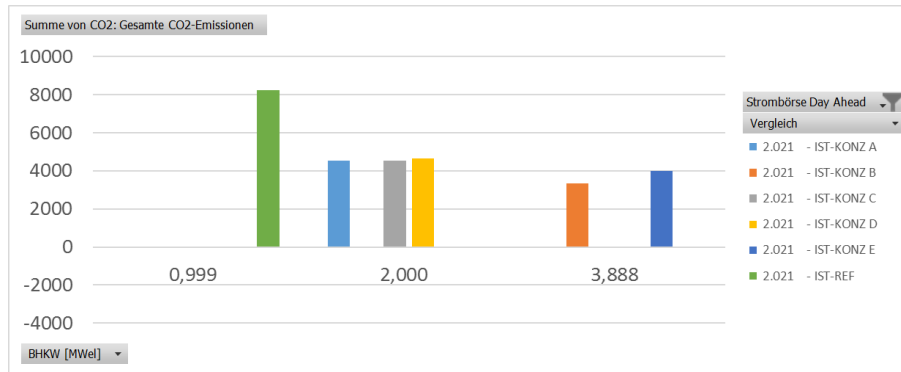


Abbildung 61: CO₂-Emissionen im Gesamtkonzeptvergleich - Betrachtungszeitraum 2021

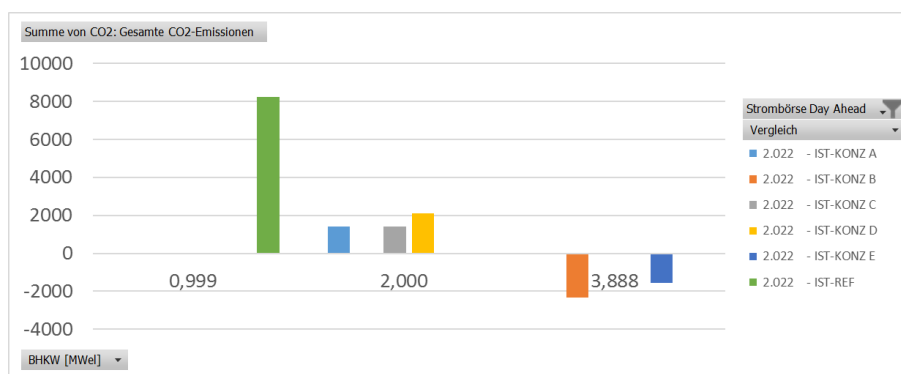


Abbildung 62: CO₂-Emissionen im Gesamtkonzeptvergleich - Betrachtungszeitraum 2022

Aus den Diagrammen ist zu erkennen, dass die betrieblichen CO₂-Emissionen aller Flex-Konzepte in allen Jahren deutlich unter denen des Eigenversorgungskonzepts liegen. Die Konzepte B und E mit großem BHKW liegen mit diesem Wert vorne. Bei hohen BHKW-Laufzeiten und daher hohen eingespeisten Strommengen sind in entsprechenden Jahren sogar negative Emissionen möglich. Im Jahr 2021 haben diese Konzepte nur geringe Vorteile ggü. den Konzepten mit 2-MW-BHKW, welche sich untereinander kaum unterscheiden, jedoch mit Konzept C minimal führend. Im Jahr 2021 könnten die CO₂-Emissionen je nach Konzept ca. um die Hälfte verringert werden.

Tabelle 17: jährliche Vollbenutzungsstunden des BHKW im Gesamtkonzeptvergleich

Konzept	Vollbenutzungsstunden BHKW		
	2020	2021	2022
EV	8235	8252	8366
A	5811	3830	7257
B	5436	2786	6235
C	5811	3816	7227
D	4829	3630	6871
E	4320	2413	6254

Die geringen bis negativen Emissionen hängen stark mit den Vollbenutzungsstunden zusammen. 2022 ergeben sich aus den hohen möglichen Erlösen an der Strombörse auch entsprechend hohe BHKW-Laufzeiten. Aus Sicht der Flexibilisierung für die öffentliche Stromversorgung sind diese aber nicht unbedingt zweckgemäß. Jährliche Vollbenutzungsstunden über die 3500 nach KWKG geförderten hinaus sind nicht besonders flexible und strompreisorientierte Fahrweisen, verfehlen einerseits den Hintergrund des gesetzlichen Anreizes und sind andererseits tendenziell als nicht systemdienlich einzustufen. 2020 und 2022 wird diese Grenze jedoch bei allen Konzepten überschritten, 2022 sogar sehr deutlich mit ca. jeweils doppelter Laufzeit. 2021 liegen bei allen Konzepten die Vollbenutzungsstunden im Bereich dieser Grenze, bei den Konzepten B und E sogar deutlich darunter. Hier kann man tendenziell von systemdienlichen BHKW-Einsatz sprechen.

5.5.3 Zusammenfassung, Bewertung und Empfehlung

In Tabelle 18 ist eine Bewertungsmatrix enthalten, welche zusammenfassend die ausgewählten Konzepte anhand genannter Kriterien für die 3 betrachteten Beispieljahre gegenüberstellt. Die Bewertungsskala unterliegt keiner streng wissenschaftlich hergeleiteten Einteilung, sondern dient einer ersten Übersicht und Orientierung für die angewandte Praxis. Die Einteilung reicht von ++ bis --, wobei 0 sich am Durchschnitt orientiert.

Tabelle 18: Bewertungsmatrix der Gesamtkonzepte nach verschiedenen Kriterien und Jahren

Konzept	E-Vers. kosten			Gesamtkosten			Amortisation			Kapitalwert			Int. Zinsfuß			Vb-Stunden			CO2-Emissionen			Effiziente Wärmenutzung		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022	2020	2021	2022	2020	2021	2022	2020	2021	2022	2020	2021	2022	2020	2021	2022	2020	2021	2022
EV	++	--	--	++	++	++	++	--	--	--	--	--	++	--	--	k.A.	k.A.	k.A.	--	--	--	++	++	++
A	--	0	0	0	0	0	0	+	++	0	+	0	+	++	0	-	+	--	+	0	+	++	++	++
B	++	+	++	--	--	--	-	-	++	+	0	++	--	+	++	-	++	-	++	+	++	-	+	--
C	--	0	0	-	-	-	-	0	+	+	0	0	-	+	-	-	+	--	+	0	+	++	++	++
D	--	0	-	++	+	++	+	++	++	0	++	-	0	++	+	0	+	-	-	0	+	-	-	--
E	0	+	++	--	--	--	--	+	++	++	++	++	--	++	++	0	++	-	+	+	++	--	--	--

Für die nachfolgend ausgesprochene Empfehlung wird das Jahr 2021 als das zukünftig realistischere Rahmenjahr unter den untersuchten Jahren fokussiert. Die ausgearbeitete Empfehlung ist auf die Ergebnisse dieses untersuchten Standortes mit dessen Charakteristik und Rahmenbedingungen zurückzuführen. Eine allgemeine Gültigkeit für alle Molkereibetriebe stellt diese Empfehlung nicht dar. Diese kann dennoch für Standorte, Molkereibetriebe, Lebensmittelbetriebe oder KMUs mit ähnlichen Voraussetzungen als Orientierung für deren möglicher Energieversorgungskonzepte dienen.

Für den untersuchten Molkereistandort wird Konzept B oder D empfohlen. Es wird aus Sicht des Umfangs der Investitionskosten eine Tendenz zu Konzept D ausgesprochen wird, primär aus dem Grund der deutlich niedrigeren Investitionskosten gegenüber Konzept B. Diese geringeren Investitionskosten bei Konzept D ergeben sich aus der niedrigeren BHKW-Größe und dem Umstand, dass das Konzept ohne zusätzliche Energiewandlungsanlage (AKM) auskommt. Es ist davon auszugehen, dass die fast doppelt so hohen Kosten bei Konzept B für viele Betriebe dieser Größenordnung eine zu hohe Liquiditätsbelastung darstellt, auch

wenn die jährlichen Energieversorgungskosten deutlich niedriger sind als bei D. Bei Konzept B ist das flexible Potential mit niedrigen Vollbenutzungsstunden und eine effiziente Wärmeausnutzung gegeben. Die CO₂-Emissionen bewegen sich in einem relativ guten Bereich.

Konzept D weist Vollbenutzungsstunden und Emissionen im mittleren Bereich auf, welche als akzeptabel angesehen werden können. Die Wärmenutzung ist allerdings mit dem angelegten Nutzungskonzept nicht optimal. Es können bzw. sollten zusätzlich Maßnahmen zur effizienteren Wärmenutzung ergriffen werden, um diese weiter zu verbessern.

Fazit:

Konzept D (2-MW-BHKW, ohne E-Kessel und AKM) ist in Verbindung mit Wärmenutzungskonzept 7 eine gute Flexibilisierungslösung bei niedrigen Investitionskosten für den untersuchten Standort, bei ausreichend positiven Kennwerten zu CO₂ Minderung und Flexibilität. Konzept B (3,88 MW BHKW, ohne E-Kessel, mit AKM) ist in Verbindung mit Wärmenutzungskonzept 11 (beinhaltet doppelte AKM-Größe) bezogen auf die Kennwerte CO₂-Minderung und Flexibilität noch positiver zu bewerten, weist aber im Gegenzug sehr hohe Investitionskosten auf, die in der Regel nur bei ausreichender Liquidität des Unternehmens oder über Energieliefer-Contracting-Modelle realisiert werden können.

6 Systemeffizienzpotenziale der Kühlkette

Im Projekt *BlueMilk* werden zwei verschiedene Varianten der Kühlkette untersucht.

- Variante 1 (Zott): Kühlkette bestehend aus „Vorkühlung – Kühlhaus – Lkw-Transport“
- Variante 2 (AMS): Kühlkette besteht aus „Kühlhaus – Lkw-Transport“

In Variante 1 der Kühlkette werden abzukühlende Molkereierzeugnisse (z. B. Joghurt; im Gegensatz dazu muss z. B. Mozzarella nicht abgekühlt werden) in einem Kühltunnel abgekühlt, bevor die Molkereierzeugnisse in das Kühlhaus eingelagert werden. Im Kühltunnel findet eine Abkühlung des Joghurts von etwa 25 °C auf etwa 5 °C statt. Im Kühlhaus wird die Temperatur der Molkereierzeugnisse auf einer Temperatur von 5 °C gehalten. Die Innentemperatur der Laderaums des Lkws beträgt 2-4 °C (TÜV SÜD Industrie Service GmbH 2020), daher findet beim Transport im Lkw eine weitere Abkühlung statt. Die Kühlkette der Variante 1 ist schematisch in Abbildung 63 dargestellt.

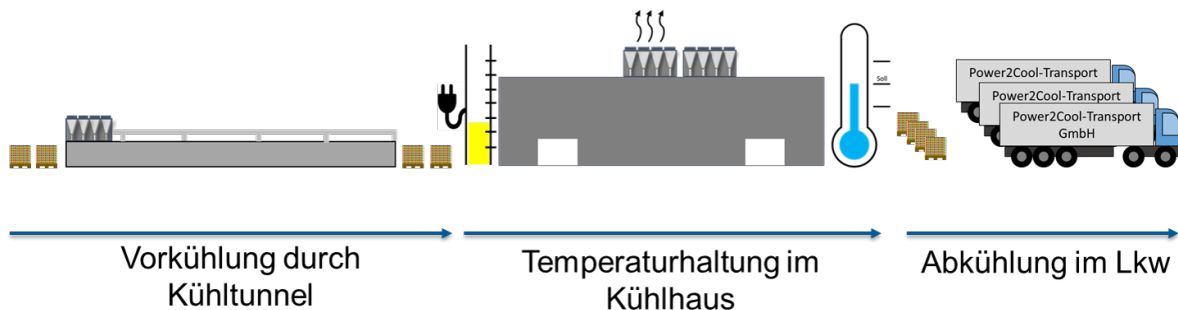


Abbildung 63: Schematische Darstellung der Kühlkette Variante 1

In Variante 2 der Kühlkette werden abzukühlende Molkereierzeugnisse ohne Vorkühlung in das Kühlhaus eingelagert. Die Abkühlung der Molkereierzeugnisse findet im Kühlhaus statt. Nach einer entsprechenden Kühldauer werden die Molkereierzeugnisse ebenso wie in Variante 1 im Lkw transportiert. Die Kühlkette der Variante 2 ist in Abbildung 64 dargestellt.

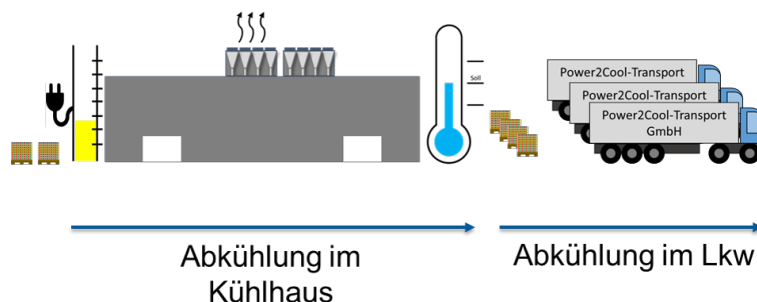


Abbildung 64: Schematische Darstellung der Kühlkette Variante 2

6.1 Funktionsbeschreibung und Modellierung der einzelnen Glieder der Kühlkette

Im Folgenden werden die drei Glieder der Kühlkette genauer beschrieben: Kühl tunnel, Kühlhaus und Lkw-Transport.

6.1.1 Kühl tunnel

Die Abkühlung im Kühl tunnel wird als Vorkühlung bezeichnet. Die Vorkühlung ist eine aktive Kühlung entsprechender Molkereierzeugnisse nach der Produktion und vor der Einlagerung in das Kühlhaus. Eine Abkühlung findet aufgrund von Konvektion statt. Die Luft im Kühl tunnel wird durch die Paletten mit den Molkereierzeugnissen (somit zwischen den einzelnen Bechern der Palette) geblasen. Die Lufteintrittstemperatur im Kühl tunnel beträgt 4 °C. Die Verweildauer der Molkereierzeugnisse ist abhängig von der abzuführenden Wärme (Temperatur zu Beginn, Masse der Molkereierzeugnisse). Die Verweildauer beträgt etwa 60-120 Minuten (Steidle 2018). Im Fall von Joghurt besitzt die Palette eine Temperatur von 5 °C nach der Vorkühlung (und somit vor der Einlagerung in das Kühlhaus).

In der Realität besitzt die Molkerei Zott mehrere Kühl tunnel, welche parallel arbeiten. In der Modellierung wird ein Kühl tunnel angewendet, welcher alle Paletten abfertigen kann. Eine Information welcher Kühl tunnel eine bestimmte Palette abfertigt, liegt nicht vor.

Es findet keine Veränderung der Kühlzeitpunkte statt (z. B. eine Abkühlung wird nach hinten verschoben), da kein Eingriff in die Produktion untersucht werden sollte.

Die Abkühlung der Produkte findet mittels der Annahmen „dünnwandiger Behälter“ und „ideal gerührter Behälter“ statt. Diese Annahmen wurden in einer unabhängig vom Projekt *BlueMilk* durchgeführten und bereits davor abgeschlossen Abschlussarbeit bei Zott so getroffen und für *BlueMilk* übernommen.

Die Abkühlung eines Joghurtbechers wird wie folgt berechnet (Steidle 2018):

$$\vartheta_{JB} = \vartheta_{LET} + (\vartheta_{Start} - \vartheta_{LET}) \cdot \exp\left(\frac{k_{JB} A_{JB} \cdot t}{m_{JB} \cdot c_{p,JB}}\right) \quad (20)$$

ϑ_{JB}	Temperatur eines Joghurtbechers zum Zeitpunkt t in °C
ϑ_{LET}	Lufteintrittstemperatur im Kühl tunnel in °C
ϑ_{Start}	Starttemperatur eines Joghurtbechers in °C
$k_{JB} A_{JB}$	Wärmeübertragungsfähigkeit eines Joghurtbechers in W/K
t	Kühlzeit in s
m_{JB}	Masse eines Joghurtbechers in kg
$c_{p,JB}$	Spezifische Wärmekapazität eines Joghurtbechers in J/kgK

In der Modellierung wird angenommen, dass jeder Joghurtbecher mit der Lufteintrittstemperatur abgekühlt wird. Eine Erwärmung der Luft innerhalb der Palette wird nicht berücksichtigt. Der Verlauf der Abkühlung eines Joghurtbechers ist stellvertretend für die Abkühlung aller Joghurtbecher und der gesamten Palette (Palette für Molkereierzeugnisse). Der Verlauf der Abkühlung ist in Abbildung 65 dargestellt. Aufgrund einer konstanten Geschwindigkeit der Paletten durch den Kühl tunnel ist die Zeitachse stellvertretend zur Position im Kühl tunnel.

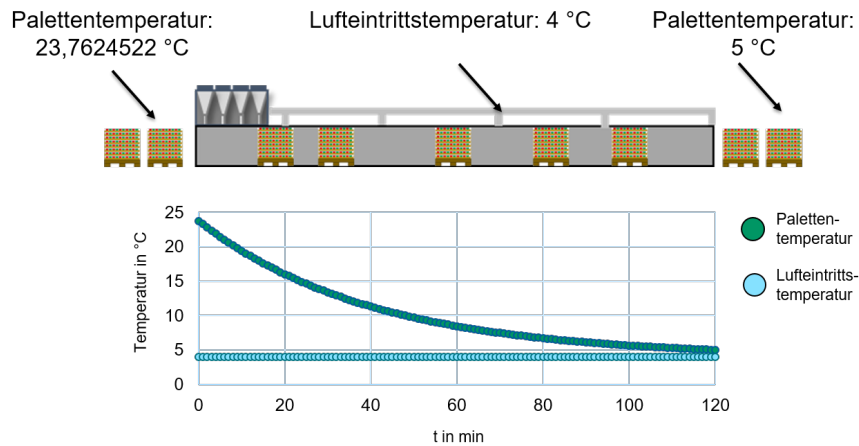


Abbildung 65: Verlauf der Palettentemperatur über die Zeit/Länge des Kühltunnels

Aufgrund der Aussage seitens des Projektpartners, dass die Austrittstemperatur der Paletten aus dem Kühltunnel konstant 5 °C beträgt, kann für eine bestimmte Wärmeübertragungsfähigkeit und Kühldauer die Starttemperatur eines Joghurtbechers von $\vartheta_{\text{Start}} = 23,7624522 \text{ °C}$ berechnet werden.

In der Simulation wird für jede Minute die neue Temperatur eines Joghurtbechers für jede sich im Kühltunnel befindliche Palette berechnet. Aus der Differenz zwischen neuer und alter Temperatur kann die zu abführende Wärmemenge in dieser Zeit berechnet werden:

$$Q_{\text{JB}} = (\vartheta_{\text{JB}}(t_{n-1}) - \vartheta_{\text{JB}}(t_n)) \cdot m_{\text{JB}} \cdot c_{p,\text{JB}} \quad (21)$$

- Q_{JB} Abzuführende Wärmemenge eines Joghurtbechers in J
- $\vartheta_{\text{JB}}(t)$ Temperatur eines Joghurtbechers zum Zeitpunkt t in °C
- m_{JB} Masse eines Joghurtbechers in kg
- $c_{p,\text{JB}}$ Spezifische Wärmekapazität eines Joghurtbechers in J/kgK

Der Anteil der Kühlleistung zur Kühlung der Molkereierzeugnisse für jeden Zeitschritt berechnet sich aus der Wärmemenge pro Palette und aller sich im Kühltunnel befindlichen Paletten:

$$P_{\text{KTL,J}} = \frac{\sum Q_{\text{JB}} \cdot n}{\Delta t} \quad (22)$$

- $P_{\text{KTL,J}}$ Anteil Kühlleistung der sich im Kühltunnel befindlichen Molkereierzeugnisse in W
- Q_{JB} Abzuführende Wärmemenge eines Joghurtbechers einer bestimmten Palette in J
- n Anzahl Joghurtbecher pro Palette
- Δt Zeitschrittweite in s

Die Transmissionsverluste berechnen sich wie folgt (Steidle 2018):

$$P_{\text{KTL,Trans}} = A_{\text{KTL}} \cdot k_{\text{KTL}} \cdot (\vartheta_{\text{Halle}} - \vartheta_{\text{LET}}) \quad (23)$$

$P_{\text{KTL,Trans}}$	Transmissionsverluste Kühltunnel mit Umgebung in W
A_{KTL}	Außenfläche aller Kühltunnel in m ²
k_{KTL}	Wärmedurchgangskoeffizient Kühltunnel in W/m ² K
ϑ_{Halle}	Hallentemperatur in °C
ϑ_{LET}	Luft Eintrittstemperatur im Kühltunnel in °C

Der Wärmeeintrag durch Ventilatoren ($P_{\text{KTL,Vent}}$, siehe Gleichung (24)), entspricht der elektrischen Bezugsleistung aller Ventilatoren aus den Kühltunneln.

Die gesamte von der Kühlanlage aufzubringende Kühlleistung zur Kühlung der Luft auf die Luft eintrittstemperatur ergibt sich aus dem Anteil zur Kühlung der Molkereierzeugnisse, den Transmissionsverlusten mit der Umgebung und den Wärmeeintrag durch Ventilatoren:

$$P_{\text{KTL}} = P_{\text{KTL,J}} + P_{\text{KTL,Trans}} + P_{\text{KTL,Vent}} \quad (24)$$

P_{KTL}	Kühlleistung der Kühlanlage des Kühltunnels in W
$P_{\text{KTL,J}}$	Anteil Kühlleistung der sich im Kühltunnel befindlichen der Molkereierzeugnisse in W
$P_{\text{KTL,Trans}}$	Transmissionsverluste Kühltunnel mit Umgebung in W
$P_{\text{KTL,Vent}}$	Wärmeeintrag durch Ventilatoren in W

Die Einlagerungszeitpunkte in das Kühlhaus sind bekannt. Zur Erstellung einer Zeitreihe wird vom Einlagerungszeitpunkt die Dauer des Kühltunnels abgezogen. Dies wird als Startzeitpunkt der Kühlung im Kühltunnel verwendet. Die elektrische Leistungsaufnahme errechnet sich aus:

$$P_{\text{KTL,el}} = \frac{P_{\text{KTL}}}{EER_{\text{KTL}}} \quad (25)$$

$P_{\text{KTL,el}}$	Elektrische Leistungsaufnahme der Kühlanlage des Kühltunnels in W
P_{KTL}	Kühlleistung der Kühlanlage des Kühltunnels in W
EER_{KTL}	Energy Efficiency Ratio der Kühlanlage des Kühltunnels

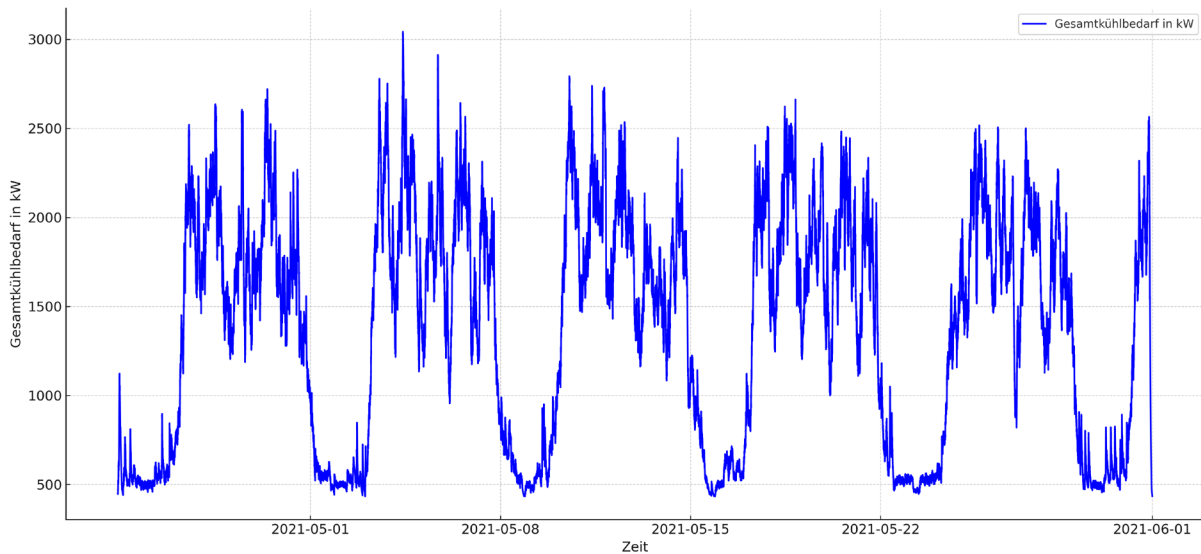


Abbildung 66: Gesamtkühlbedarf der Vorkühlung für den Monat Mai 2021

Abbildung 66 zeigt den Gesamtkühlbedarf der Vorkühlung nach Gleichung (24) für den Monat Mai 2021.

6.1.2 Kühlhaus

Das Kühlhaus (auch als Hochregallager bezeichnet) dient je nach Variante 1 oder 2 zur Temperaturhaltung bzw. zur Abkühlung der Molkereierzeugnisse. Die Kälteanlage des Kühlhauses dient dabei Wärmeeinträge auszugleichen und die Lufttemperatur auf einer Solltemperatur zu halten. Es werden hierbei folgende Wärmeströme berücksichtigt:

- Transmission
- Solarstrahlung
- Türöffnungsverluste
- Wärmeeinträge durch strombetriebene Geräte (Fördertechnik, Ventilatoren, ...)
- Wärmeaustausch mit Stahlkonstruktion im Kühlhaus
- Molkereierzeugnisse (= Produkte)

Transmissionsverluste werden für jede Wand einzeln berechnet, da ϑ_W für jede Wand unterschiedlich sein kann. Eine Wand des Kühlhauses kann entweder eine Außenwand oder eine Wand eines anderen Gebäudes sein. Temperaturen für andere Gebäude werden als konstant betrachtet.

$$\dot{Q}_{\text{HRL,Trans,W}} = k_W A_W \cdot (\vartheta_W - \vartheta_{\text{HRL}}) \quad (26)$$

$\dot{Q}_{\text{HRL,Trans,W}}$	Wärmestrom der Wand W aufgrund Transmission in W
$k_W A_W$	Wärmeübertragungsfähigkeit einer Wand in W/K
ϑ_W	Temperatur des Fluids auf der gegenüberliegenden Seite der Wand in °C
ϑ_{HRL}	Temperatur des Kühlhauses in °C

Der gesamte Transmissionswärmestrom berechnet sich aus der Summe der Teilwärmeströme:

$$\dot{Q}_{\text{HRL,Trans}} = \sum \dot{Q}_{\text{HRL,Trans,W}} \quad (27)$$

$\dot{Q}_{\text{HRL,Trans}}$ Gesamttransmissionswärmestrom in W
 $\dot{Q}_{\text{HRL,Trans,W}}$ Wärmestrom der Wand W aufgrund Transmission in W

Der solare Wärmeeintrag auf den Dachflächen des Kühlhauses wird mittels folgender Gleichung berücksichtigt (Idda 2023):

$$\dot{Q}_{\text{HRL,Solar}} = k_{\text{Dach}} A_{\text{Dach}} \cdot \frac{a \cdot I}{\alpha_{\text{außen}}} \quad (28)$$

$\dot{Q}_{\text{HRL,Solar}}$ Wärmestrom durch solare Einstrahlung in W
 $k_{\text{Dach}} A_{\text{Dach}}$ Wärmeübertragungsfähigkeit der Dachfläche in W/K
 a Absorptionskoeffizient Dach des Kühlhauses
 I Direkte Strahlung auf der Oberfläche in W/m²
 $\alpha_{\text{außen}}$ Wärmeübergangskoeffizient an Außenseite der Fachfläche in W/m²K

Bei der Einlagerung der Molkereierzeugnisse in das Kühlhaus müssen Tore geöffnet werden, damit die Paletten passieren können. Aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Kühlhaus und den Produktionshallen entsteht beim Öffnen der Tore ein Wärmeeintrag in das Kühlhaus. Dieser wird mit folgender empirischen Formel nach Tamm berücksichtigt:

$$\dot{Q}_{\text{HRL,Tür}} = [8 + (0,067 \cdot \Delta\vartheta_{\text{Tür}})] \cdot \tau_{\text{Tür}} \cdot \rho_{\text{L,i}} \cdot B_{\text{Tür}} \cdot H_{\text{Tür}} \cdot \sqrt{H_{\text{Tür}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{L,a}}}{\rho_{\text{L,i}}}\right)} \cdot (h_{\text{L,a}} - h_{\text{L,i}}) \cdot \eta_{\text{LS}} \quad (29)$$

$\dot{Q}_{\text{HRL,Tür}}$ Mittlerer Wärmestrom gemittelt über eine Stunde durch Türöffnung in W
 $\Delta\vartheta_{\text{Tür}}$ Temperaturunterschied zwischen Kühlraum und außerhalb des Kühlraums in K
 $\tau_{\text{Tür}}$ Öffnungszeit in Min pro Stunde
 $\rho_{\text{L,i}}$ Dichte der Luft im Kühlraum in kg/m³
 $B_{\text{Tür}}$ Breite der Tür in m
 $H_{\text{Tür}}$ Höhe der Tür in m
 $\rho_{\text{L,a}}$ Dichte der Luft außerhalb des Kühlraums in kg/m³
 $h_{\text{L,a}}$ Spezifische Enthalpie der Luft im außerhalb des Kühlraumes in kJ/kg
 $h_{\text{L,i}}$ Spezifische Enthalpie der Luft im Kühlraum in kJ/kg
 η_{LS} Wirkungsgrad der eventuell vorhandenen Luftschleieranlage (ohne =1, mit z. B. 0,25)

Der Stromverbrauch innerhalb des Kühlhauses wird als Wärmeeintrag angesehen, da zum Beispiel Bewegungsenergie der Lagertechnik oder Bewegungsenergie der Luft durch Ventilatoren in Wärme umgewandelt wird (Die elektrische Leistungsaufnahme ist durch Messungen bekannt):

$$\dot{Q}_{\text{HRL,Strom}} = P_{\text{el}} \quad (30)$$

$\dot{Q}_{\text{HRL,Strom}}$ Wärmestrom durch Stromverbrauch in W
 P_{el} Elektrische Leistungsaufnahme innerhalb des Kühlhauses in W

Jegliche Masse im Kühlhaus reagiert auf Temperaturänderungen und wird dadurch Wärme aufnehmen oder abgeben. Neben den Molkereierzeugnissen wird weiterhin Stahl berücksichtigt.

$$\dot{Q}_{\text{HRL,Stahl}} = \alpha_{\text{Stahl}} \cdot A_{\text{Stahl}} \cdot (\vartheta_{\text{Stahl}} - \vartheta_{\text{HRL}}) \quad (31)$$

$\dot{Q}_{\text{HRL,Stahl}}$ Wärmestrom welcher aufgrund der Temperaturdifferenz des Stahls entsteht in W
 α_{Stahl} Wärmeübergangskoeffizient zwischen Stahl und Luft im Kühlhaus in W/m²K
 A_{Stahl} Oberfläche des Stahls in m²
 ϑ_{Stahl} Temperatur des Stahls in °C
 ϑ_{HRL} Temperatur der Luft im Kühlhaus in °C

Der gesamte Wärmestrom zur Änderung der Lufttemperatur berechnet sich aus der Summe der genannten Wärmeströme einschließlich des Wärmestroms der Produkte (= Molkereierzeugnisse; auf die Berechnung des Wärmestroms der Produkte wird in Kapitel 6.1.3 eingegangen) und der Kühlleistung der Kälteanlage des Kühlhauses.

$$\dot{Q}_{\text{HRL,Luft}} = \dot{Q}_{\text{HRL,Trans}} + \dot{Q}_{\text{HRL,Solar}} + \dot{Q}_{\text{HRL,Tür}} + \dot{Q}_{\text{HRL,Strom}} + \dot{Q}_{\text{HRL,Stahl}} + \dot{Q}_{\text{HRL,Produkte}} - P_{\text{KKM}} \quad (32)$$

$\dot{Q}_{\text{HRL,Luft}}$ Wärmestrom der Luft innerhalb des Kühlhauses in W
 $\dot{Q}_{\text{HRL,Trans}}$ Gesamttransmissionswärmestrom in W
 $\dot{Q}_{\text{HRL,Solar}}$ Wärmestrom durch solare Einstrahlung in W
 $\dot{Q}_{\text{HRL,Tür}}$ Wärmestrom durch Türöffnung in W
 $\dot{Q}_{\text{HRL,Strom}}$ Wärmestrom durch Stromverbrauch in W
 $\dot{Q}_{\text{HRL,Stahl}}$ Wärmestrom welcher aufgrund der Temperaturdifferenz des Stahls entsteht in W
 $\dot{Q}_{\text{HRL,Produkte}}$ Wärmestrom, welcher durch gelagerte Produkte verursacht wird, in W
 P_{KKM} Kühlleistung der Kälteanlage des Kühlhauses

Aus dem Wärmestrom kann die Wärmemenge berechnet werden:

$$Q_{\text{HRL,Luft}} = \dot{Q}_{\text{HRL,Luft}} \cdot \Delta t \quad (33)$$

$Q_{\text{HRL,Luft}}$ Wärmeeintrag in das Kühlhaus in J
 $\dot{Q}_{\text{HRL,Luft}}$ Wärmestrom der Luft innerhalb des Kühlhauses in W
 Δt Zeitschritte in s

Aus der Wärmemenge $Q_{\text{HRL,Luft}}$ kann die Temperaturänderung der Luft des Kühlhauses berechnet werden:

$$\Delta\vartheta_{\text{HRL,Luft}} = \frac{Q_{\text{HRL,Luft}}}{\rho_{\text{Luft}} \cdot V_{\text{Luft}} \cdot c_{p,\text{Luft}}} \quad (34)$$

$\Delta\vartheta_{\text{HRL,Luft}}$	Temperaturänderung der Luft im Kühlhaus in K
$Q_{\text{HRL,Luft}}$	Wärmeeintrag in das Kühlhaus in J
ρ_{Luft}	Dichte der Luft im Kühlhaus in kg/m^3
V_{Luft}	Volumen der Luft im Kühlhaus in m^3
$c_{p,\text{Luft}}$	Spezifische Wärmekapazität der Luft in J/kgK

6.1.3 Lkw-Transport

Die Erläuterungen sind aus dem Projektbericht „Simulation und Analyse des Energiebedarfs des Kältesystems im Kühltransport von Molkereierzeugnissen“ (Idda 2023) übernommen.

Im Lkw-Transport wird der Langstreckenverkehr ohne Be- und Entladungsphase untersucht. Die Infiltrationslast – Wärmeeintrag durch Lufteintrag aufgrund der geöffneten Türen – bleibt unberücksichtigt.

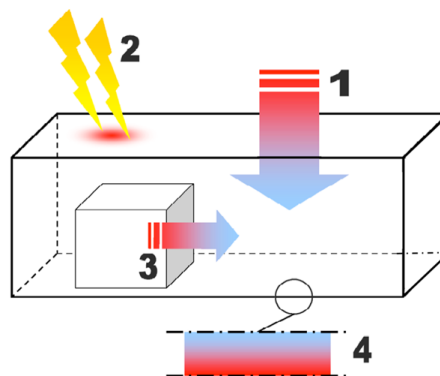


Abbildung 67: Im Modell des Lkw-Transports berücksichtigte Wärmeströme (eigene Anpassungen; Original: (Idda 2023))

Im Modell für den Lkw-Transport werden folgende Wärmeströme/Wärmemengen berücksichtigt (siehe auch Abbildung 67):

- Transmission
- Solareinstrahlung
- Produkt
- Temperierung der Isolierung

Die Transmission zwischen der Außenluft und der Lkw-Laderaums wird wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_{\text{Lkw,Trans}} = \sum U_{\text{Lkw},i} \cdot A_{\text{Lkw},i} \cdot (\vartheta_{\text{außen}}^* - \vartheta_{\text{Lkw}}) \quad (35)$$

$\dot{Q}_{\text{Lkw,Trans}}$	Transmissionswärmestrom durch die Lkw-Laderaumhülle in W
$U_{\text{Lkw},i}$	Wärmedurchgangskoeffizient der Lkw-Wand i in W
$A_{\text{Lkw},i}$	Fläche der Lkw-Wand i in W
i	Laufvariable der Lkw-Wände
$\vartheta_{\text{außen}}^*$	Außentemperatur mit Berücksichtigung der Solarstrahlung in °C
ϑ_{Lkw}	Temperatur des Lkw-Laderaums in °C

Der Wert $\vartheta_{\text{außen}}^*$ ist die Außentemperatur, bei der die Solarstrahlung miteinberechnet wurde. Die auf die Außenfläche eintreffende Solarstrahlung erhöht die Außentemperatur der Luft wie folgt:

$$\vartheta_{\text{außen}}^* = \vartheta_{\text{außen}} + \frac{a \cdot I}{\alpha_{\text{außen}}} \quad (36)$$

$\vartheta_{\text{außen}}^*$	Außentemperatur mit Berücksichtigung der Solarstrahlung in °C
$\vartheta_{\text{außen}}$	Außentemperatur in °C
a	Absorptionskoeffizient Außenfläche des Lkws
I	Direkte Strahlung auf der Oberfläche in W/m ²
$\alpha_{\text{außen}}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Lkw-Außenfläche und Luft in W/m ² K

Der Wärmeaustausch zwischen der Luft im Lkw und Produkt wird mittels vorbestimmter Zeitreihen berechnet. Diese sind für verschiedene Szenarien (Lkw-Laderaumtemperatur und Produkttemperatur) pro Palette berechnet. Diese Leistung kann mit der Anzahl der Paletten in einem Lkw skaliert werden.

$$\dot{Q}_{\text{Lkw,Prod}} = n \cdot \dot{Q}_{\text{Prod,Szenario}} \quad (37)$$

$\dot{Q}_{\text{Lkw,Prod}}$	Wärmestrom aller Produktpaletten im Lkw in W
n	Anzahl der Paletten im Lkw
$\dot{Q}_{\text{Prod,Szenario}}$	Wärmestrom einer Produktpalette im Lkw in W

Die Temperierung der Isolierung beschreibt die notwendige Wärmemenge um die Isolierung ausgehend von einer Starttemperatur auf die Lkw-Laderaumtemperatur zu bringen. Ebenso wird hierbei die Luft im Lkw gekühlt. Die Starttemperatur wird hierbei auf die Außentemperatur eine Stunde vor Fahrtbeginn gesetzt.

$$Q_{\text{Lkw, Iso}} = (m_{\text{Iso}} \cdot c_{p, \text{Iso}} + \rho_{\text{Luft}} \cdot V_{\text{Lkw}} \cdot c_{p, \text{Luft}}) \cdot (\vartheta_{\text{Start}} - \vartheta_{\text{Lkw}}) \quad (38)$$

$Q_{\text{Lkw, Iso}}$	Wärmemenge zur Temperierung der Vorisolierung und der Luft im Lkw-Laderaum in J
m_{Iso}	Masse der Isolierung in kg
$c_{p, \text{Iso}}$	Spezifische Wärmekapazität der Isolierung in J/(kg K)
ρ_{Luft}	Dichte von Luft in kg/m ³
V_{Lkw}	Volumen des Lkw-Laderaums in m ³
$c_{p, \text{Luft}}$	Spezifische Wärmekapazität von Luft in J/(kg K)
ϑ_{Start}	Starttemperatur vor Temperierung in °C
ϑ_{Lkw}	Temperatur des Lkw-Laderaums in °C

Die gesamte von Kältemaschine im Lkw aufzubringenden Kälte berechnet sich aus der Wärmemengen während der Fahrt ($\dot{Q}_{\text{Lkw, Trans}}$ und $\dot{Q}_{\text{Lkw, Prod}}$) und der Temperierung der Vorisolierung ($Q_{\text{Lkw, Iso}}$):

$$Q_{\text{Lkw, Kühl}} = Q_{\text{Lkw, Iso}} + \sum (\dot{Q}_{\text{Lkw, Trans}} + \dot{Q}_{\text{Lkw, Prod}}) \cdot \Delta t \quad (39)$$

$Q_{\text{Lkw, Kühl}}$	Benötigte Kälte zum Ausgleich der Wärmeeinträge in J
$Q_{\text{Lkw, Iso}}$	Wärmemenge zur Temperierung der Vorisolierung und der Luft im Lkw-Laderaum in J
$\dot{Q}_{\text{Lkw, Trans}}$	Transmissionswärmestrom durch die Lkw-Laderaumhülle in W
$\dot{Q}_{\text{Lkw, Prod}}$	Wärmestrom aller Produktpaletten im Lkw in W

Aus der Gesamtwärme kann über den Wirkungsgrad der Kältemaschine und dem Energieinhalt von Diesel die benötigte Menge an Diesel berechnet werden:

$$V_{\text{Diesel}} = \frac{Q_{\text{Lkw, Kühl}}}{\eta_{\text{Lkw, Kühl}} \cdot H_i} \quad (40)$$

V_{Diesel}	Benötigte Menge an Diesel zur Kühlung in m ³
$Q_{\text{Lkw, Kühl}}$	Benötigte Kälte zum Ausgleich der Wärmeeinträge in J
$\eta_{\text{Lkw, Kühl}}$	Wirkungsgrad der Kälteanlage im Lkw
H_i	Heizwert von Diesel in J/m ³

Aus der benötigten Menge an Diesel werden die kühlungsbedingten CO₂-Emissionen für den Kühltransport berechnet.

6.2 Temperaturänderung und Wärmeströme der Palette

Die eingelagerten Molkereierzeugnisse haben eine zentrale Rolle in der Betrachtung des Kühlhauses. Der in *BlueMilk* verwendete Ansatz der Flexibilisierung beruht auf der Verwendung von inhärenten Speichern, d. h. keine dedizierten Kältespeicher. Im Kühlhaus sind die Molkereierzeugnisse der inhärente Kältespeicher, da die Speicherfähigkeit von z. B. Joghurt größer ist als die der Luft.

Die Bereitstellung einer Speicherfähigkeit darf jedoch die Qualität der Molkereierzeugnisse nicht beeinträchtigen. Daher ist es notwendig, dass die Temperatur der Molkereierzeugnisse

bekannt ist. Ebenso ist die Bestimmung der Temperatur zur Berechnung des Wärmestroms zwischen Luft und Palette notwendig, damit die ein- und ausgespeicherte Kälte bestimmt werden kann.

Bezüglich der Temperaturen einer Palette spielt die Kerntemperatur, d. h. die Temperatur der Joghurts in der Mitte der Palette eine wichtige Rolle. Die Kerntemperatur ist vor allem dann entscheidend, wenn das Kühlhaus mit Variante 2 konzeptioniert ist (siehe Abschnitt 6), da sichergestellt werden muss, dass auch der Joghurt in der Mitte auf die entsprechende Temperatur abgekühlt wurde. Damit Temperaturen und Wärmeströme jeder Palette im Kühlhaus berechnet werden können, wurde ein Modell für die Palette entwickelt.

Das Modell basiert auf der Annahme, dass eine Palette, bestehend aus gefüllten Joghurtbechern in Verpackungskartonagen (siehe Abbildung 68), einen Festkörper darstellt, da die Luft zwischen den Joghurtbechern als stehend und nicht als strömend zu betrachten ist.



Abbildung 68: Palette mit Joghurtbechern innerhalb von Verpackungskartonagen

Die Wärmeleitungsgleichung in Festkörpern kann mit folgender Differentialgleichung beschrieben werden (Baehr und Stephan 2011):

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 \vartheta \quad (41)$$

ϑ	Temperatur für einen bestimmten Punkt und einer bestimmten Zeit in °C
t	Zeit in s
a	Temperaturleitfähigkeit in m ² /s

Die Differentialgleichung zweiter Ordnung kann mit einem „Forward in Time, Centered in Space“-Ansatz gelöst werden. An den Seitenflächen tritt Konvektion auf, dies stellt eine Cauchy-Randbedingung dar (Bollhöfer und Mehrmann 2004).

Die Abbildung 69 zeigt die Temperaturverteilung einer Joghurtpalette mit einer Starttemperatur von 8 °C für einen bestimmten Zeitpunkt während der Kühlung mit einer Lufttemperatur von 4 °C. Es ist zu sehen, dass die Abkühlung im Kern länger dauert als die Abkühlung an den Seitenflächen.

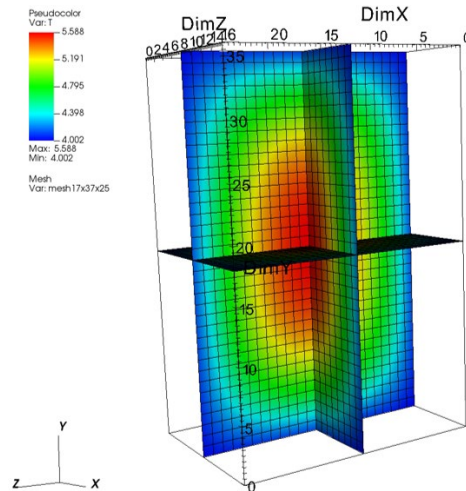


Abbildung 69: Darstellung der Temperaturverteilung innerhalb der Palette

Der Wärmestrom, welcher durch eine Seite einer Palette aufgenommen wird, berechnet sich aus:

$$\dot{Q}_{\text{HRL,Palette,Seite}} = \alpha_{\text{Palette,Seite}} \cdot A_{\text{Palette,Seite}} \cdot (\vartheta_{\text{Palette,Seite}} - \vartheta_{\text{HRL,Luft}}) \quad (42)$$

- $\dot{Q}_{\text{HRL,Palette,Seite}}$ Wärmestrom einer Seite der Palette in W
- $\alpha_{\text{Produkt,Seite}}$ Wärmeübergangskoeffizient einer Seite der Palette in $\text{W/m}^2\text{K}$
- $A_{\text{Produkt,Seite}}$ Seitenfläche der Palette in m^2
- $\vartheta_{\text{Produkt,Seite}}$ Flächengemittelte Temperatur der Seitenfläche in $^{\circ}\text{C}$
- $\vartheta_{\text{HRL,Luft}}$ Temperatur der Luft im Kühlhaus

Die Summe pro Palette berechnet sich aus den Wärmeströmen pro Seite:

$$\dot{Q}_{\text{HRL,Palette}} = \sum \dot{Q}_{\text{HRL,Palette,Seite}} \quad (43)$$

- $\dot{Q}_{\text{HRL,Palette}}$ Wärmestrom der Palette in W
- $\dot{Q}_{\text{HRL,Palette,Seite}}$ Wärmestrom einer Seite der Palette in W

Der gesamte Wärmestrom berechnet sich aus dem Wärmestrom aller Paletten im Kühlhaus:

$$\dot{Q}_{\text{HRL,Produkte}} = \sum \dot{Q}_{\text{HRL,Palette}} \quad (44)$$

- $\dot{Q}_{\text{HRL,Produkte}}$ Wärmestrom der Produkte im Kühlhaus in W
- $\dot{Q}_{\text{HRL,Palette}}$ Wärmestrom der Palette in W

6.3 Simulationsablauf

Die beschriebenen Modelle sind in der Programmiersprache Python 3 inklusive weiterer sogenannter Packages wie z. B. NumPy, Numba und pandas umgesetzt.

Die drei Glieder der Kühlketten (beschrieben in den Abschnitten 6.1.1, 6.1.2 und 6.1.3) werden einzeln berechnet. Gekoppelt sind die Glieder untereinander durch den Austausch von Daten (z. B. eine durch Flexibilisierung unterschiedliche Einlagerungstemperatur der Produkte wird über eine Zeitreihe in einer Datei ausgetauscht).

Die Simulationen basieren darauf, dass die Modelle für einen bestimmten Zeitschritt gelöst werden, d. h. Wärmeströme und neue Temperaturen werden berechnet. Vor allem die Temperaturen werden als Startwerte für den nächsten Zeitschritt verwendet, um wiederum in diesem Zeitschritt die Modelle zu lösen. Üblicherweise beträgt die Zeitschrittweite 1 min. Größere Zeitschrittweiten können dazu führen, dass die Simulationen instabil werden, da sich Temperaturen und Wärmeströme aufschwingen. Geringere Zeitschrittweiten führen zu längeren Rechenzeiten.

Die durchgeführten Simulationen sind Ex-Post-Analysen, d. h. die Simulationen werden im Nachgang durchgeführt, wenn bereits alle Daten (GEF- und Strombörsenpreis-Zeitreihen, Einlagerungen, Stromverbräuche, ...) bekannt sind. Es soll damit untersucht werden, welche Veränderungen sich gegenüber Referenzen ergeben, wenn die Betriebsweise des jeweiligen Glieds in der Kühlkette angepasst wird. Damit wird das Potenzial der Flexibilisierungen untersucht. Es werden keine Prognosen durchgeführt, da kein Fahrplan der Kälteanlage im Realbetrieb erstellt werden soll.

Die Simulation des Kühlhauses wird üblicherweise für einen Monat durchgeführt. Da nur Zeitreihen über die Ein- und Auslagerung vorhanden sind und nicht eine Belegung des Kühlhauses, muss eine Art Vorlaufzeit in der Simulation verwendet werden, damit das zu Beginn leere Kühlhaus durch die Ein- und Auslagerungen entsprechend „gefüllt“ wird. Die durchschnittliche Lagerzeit beträgt etwa sechs Tage. Es wurde eine Vorlaufzeit von sieben Tagen gewählt. Diese wird zusätzlich zum gewünschten Monat berechnet, d. h. eine Simulation beträgt einen Monat und eine Woche.

6.4 Flexibilisierung der einzelnen Glieder der Kühlkette

Im Folgenden wird die Flexibilisierung der einzelnen Glieder der Kühlkette beschrieben.

6.4.1 Kühl tunnel

Die Flexibilisierung des Kühl tunnels findet durch das Variieren der Lufteintrittstemperatur (LET) im Kühl tunnel statt. Die Lufteintrittstemperatur wird dabei an den GEF angepasst. Die Lufteintrittstemperatur wird heraufgesetzt, um eine Senkung der Kühlleistung im Kühl tunnel und somit eine Senkung der elektrischen Leistungsaufnahme durchzuführen. Analog dazu wird die Lufteintrittstemperatur herabgesetzt, um eine Steigerung der Kühlleistung im Kühl tunnel und eine Steigerung der elektrischen Bezugsleistung zu bewirken.

Eine Übersicht der untersuchten Flexibilisierungen des Kühl tunnels sind in Tabelle 1 beschrieben und in Abbildung 70: Lufteintrittstemperaturen bei hohen und niedrigen spezifischen Emissionen für verschiedene Flexibilisierungsstrategien dargestellt.

Tabelle 19: Auflistung der verschiedenen Flexibilisierungen des Kühltunnels

Kennzeichnung	hohe spez. Emissionen	niedrige spez. Emissionen	Auswirkung
Flex X-Y	LET heraufsetzen	LET herabsetzen	mittlere LET bleibt gleich
Flex X-4	LET bleibt bei 4 °C	LET herabsetzen	mittlere LET sinkt
Flex 4-Y	LET heraufsetzen	LET bleibt bei 4 °C	mittlere LET steigt

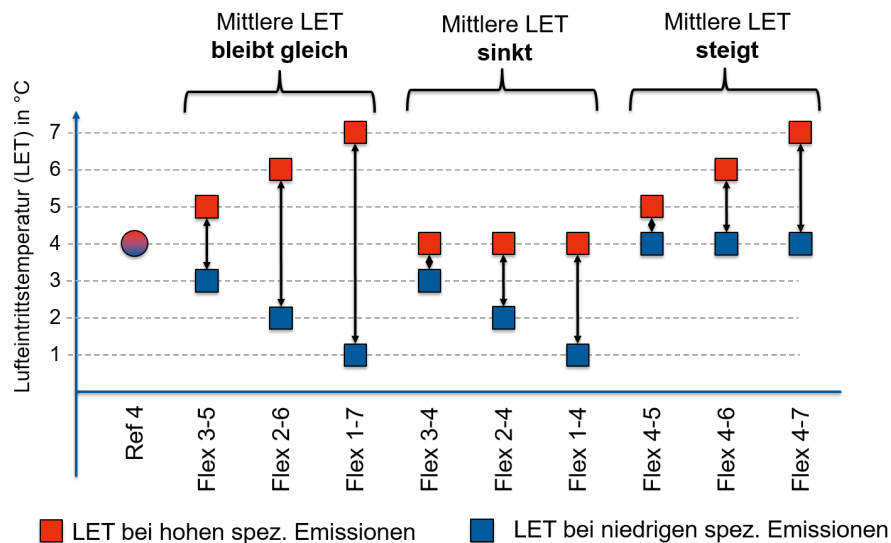


Abbildung 70: Luft Eintrittstemperaturen bei hohen und niedrigen spezifischen Emissionen für verschiedene Flexibilisierungsstrategien

Die Einteilung der Stunden nach hohen spezifischen und niedrigen spezifischen Emissionen erfolgt täglich mit dem Median des GEF (dieser ist bekannt, da es sich um Ex-Post-Analysen handelt, siehe auch Abschnitt 6.3). Aufgrund der Verwendung des Medians (statt Mittelwert) sind zwölf Stunden pro Tag als hohe spezifische Emissionen und zwölf Stunden pro Tag als niedrige spezifische Emissionen klassifiziert. Paletten, die den Kühltunnel ausschließlich während einer Phase mit hohen oder niedrigen Emissionen durchlaufen, besitzen eine Temperatur die etwa 1 K über der Luft Eintrittstemperatur ist (genaue Temperaturen siehe Tabelle 20). Paletten, welche „beide Phasen“ durchlaufen, besitzen eine Temperatur dazwischen.

Tabelle 20: Temperatur der Palette nach dem Kühltunnel für bestimmte Lufteintrittstemperaturen

Lufteintrittstemperatur	Temperatur Palette nach Kühltunnel
1 °C	2,15 °C
2 °C	3,10 °C
3 °C	4,05 °C
4 °C	5,00 °C
5 °C	5,95 °C
6 °C	6,90 °C
7 °C	7,85 °C

Durch die Flexibilisierung des Kühltunnels ergibt sich, dass die Einlagerungstemperatur in das Kühlhaus (d. h. die Temperatur der Paletten nach dem Kühltunnel) nicht konstant ist.

6.4.2 Kühlhaus

Die Flexibilisierung des Kühlhauses ist in Abbildung 71 dargestellt.

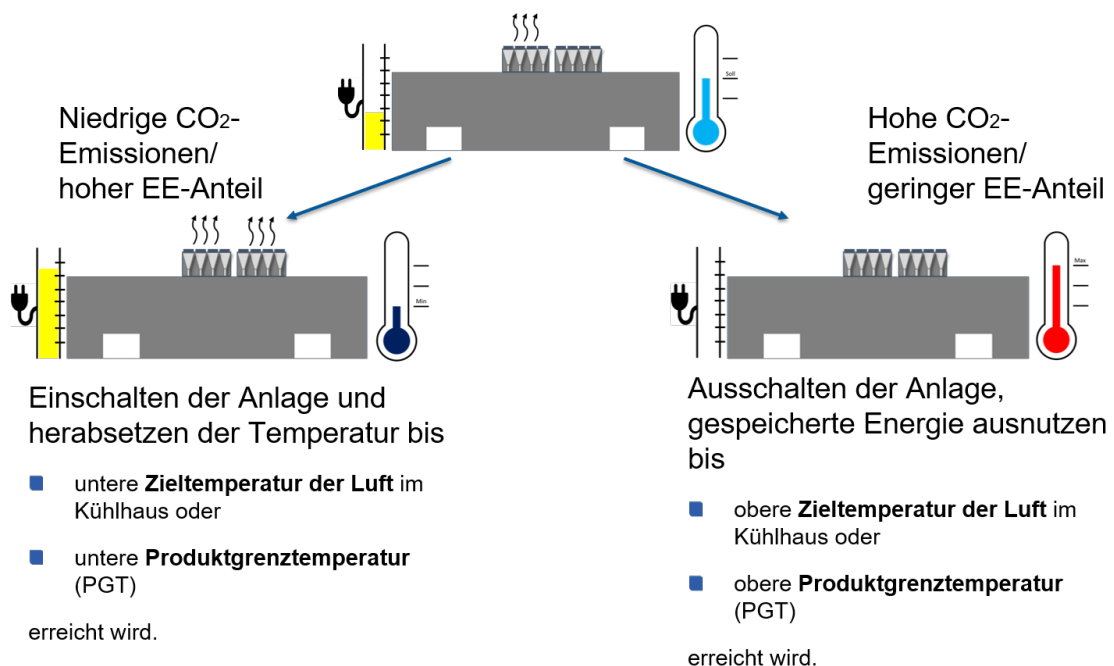


Abbildung 71: Flexibilisierung des Kühlhauses

Der Referenzfall (Mitte, oben in Abbildung 71) stellt die übliche Betriebsweise eines Kühlhauses dar. Die Kälteanlage gleicht die in Abschnitt 6.1.2 beschriebenen Wärmeeinträge aus und hält die Lufttemperatur bei einer bestimmten Solltemperatur, z. B. 5 °C, konstant. Bei einer Flexibilisierung mit inhärenten Speichern wird die Lufttemperatur verändert. In *BlueMilk* wurde die Lufttemperatur an den GEF angepasst.

In der in diesem Projekt angewendeten Flexibilisierung sind zwei verschiedene Temperaturen von Bedeutung. Dies ist zum einen die Lufttemperatur im Kühlhaus und zum anderen die Temperatur der Produkte (Molkereierzeugnisse).

Die Molkereierzeugnisse im Kühlhaus müssen einer Temperaturdifferenz ausgesetzt werden, damit eine Speicherfähigkeit entsteht:

$$Q_{\text{Speicher}} = m \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta \quad (45)$$

Q_{Speicher}	Kältespeicherfähigkeit der Molkereierzeugnisse in J
m	Masse Molkereierzeugnisse in kg
c_p	Spezifische Wärmekapazität von Joghurt in J/kgK
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz in K

Die maximale Temperaturdifferenz aus Gleichung (1) ergibt sich durch die Produktgrenztemperaturen.

Sind die spezifischen Emissionen niedrig (d. h. hoher Anteil an EE im öffentlichen Stromversorgungssystem) wird die Kälteanlage des Kühlhauses angeschaltet und/oder die Kühlleistung wird erhöht, indem die Temperatur der Luft im Kühlhaus herabgesetzt wird. Die Lufttemperatur wird so weit herabgesetzt, bis die untere Zieltemperatur der Luft im Kühlhaus oder die untere Produktgrenztemperatur erreicht wird.

Bei hohen spezifischen Emissionen des Stroms im öffentlichen Stromversorgungssystem (d. h. niedriger EE-Anteil) wird die Kälteanlage des Kühlhauses abgeschaltet und die in den Molkereierzeugnissen eingespeicherte Kälte ausgenutzt. Die Kühlanlage bleibt so lange angeschaltet, bis die obere Zieltemperatur der Luft im Kühlhaus erreicht wird oder bis die obere Produktgrenztemperatur erreicht wird.

Tabelle 21: Betriebsweise der Flexibilisierung des Kühlhauses

GEF	PGT	Lufttemperatur	Maßnahme
niedrig	innerhalb Grenze	innerhalb oberer und unterer Zieltemperatur der Luft	weiter abkühlen
niedrig	innerhalb Grenze	untere Zieltemperatur der Luft erreicht	Kühlleistung so regeln damit untere Zieltemperatur der Luft beibehalten wird
niedrig	untere Grenze unterschritten	unabhängig von Lufttemperatur	weitere Abkühlung der Produkte verhindern: Kühlleistung auf Lufttemperatur = 4 °C einstellen
hoch	innerhalb Grenze	innerhalb oberer und unterer Zieltemperatur der Luft	Kühlanlage bleibt ausgeschaltet
hoch	innerhalb Grenze	obere Zieltemperatur der Luft erreicht	Kühlleistung so regeln damit obere Zieltemperatur der Luft beibehalten wird
hoch	obere Grenze überschritten	unabhängig von Lufttemperatur	weitere Erwärmung der Produkte verhindern: Kühlleistung auf Lufttemperatur = 5 °C einstellen

Tabelle 21 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Betriebsweisen in Abhängigkeit der Luft- und Produkttemperatur.

Abbildung 72 stellt die beiden Temperaturen gegenüber. Die Variation der Lufttemperatur im Kühlhaus kann größer sein als die Variation der Produktgrenztemperaturen. Die untere Grenze der Lufttemperatur kann z. B. auch unter der zulässigen unteren Produktgrenztemperatur liegen. Die untere Lufttemperatur muss nicht zwangsläufig im Produkt erreicht werden. Eine höhere Differenz zwischen Lufttemperatur und Palette bewirkt jedoch eine schnellere Abkühlung, da der Wärmestrom zwischen Luft und Palette größer wird (siehe auch Gleichung (42)).

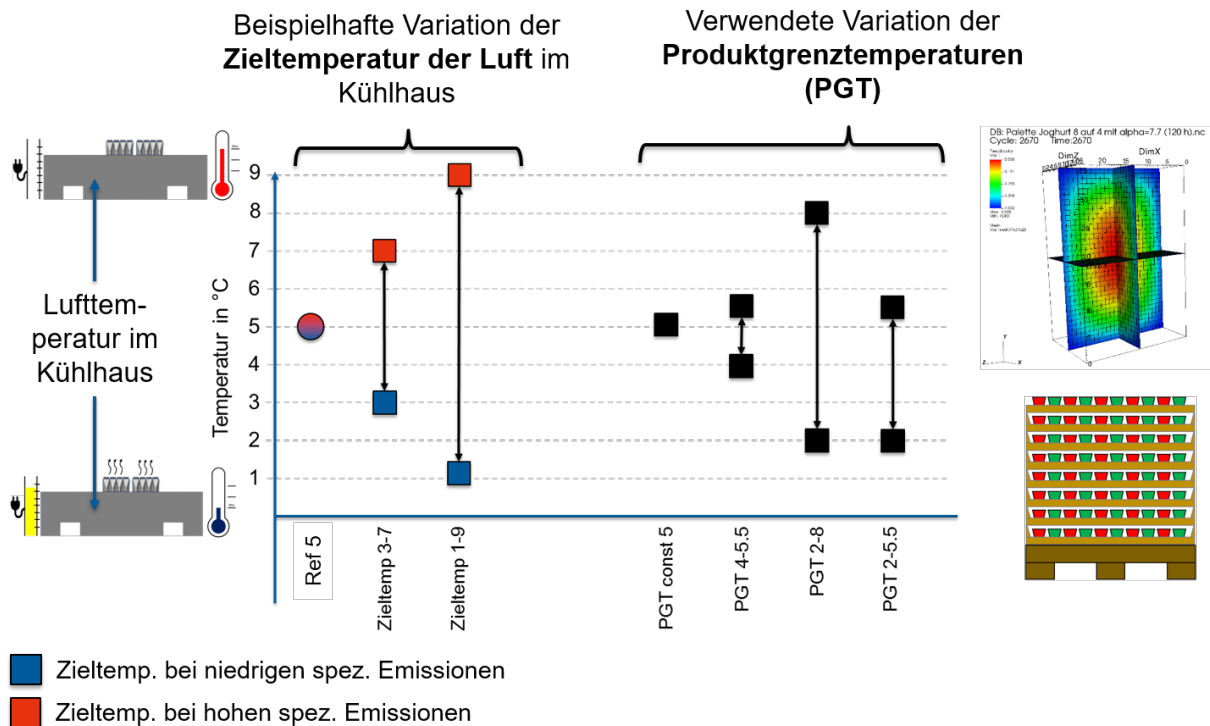


Abbildung 72: Gegenüberstellung der Variation der Lufttemperatur im Kühlhaus und der Variation der Produktgrenztemperaturen

Für die Produktgrenztemperaturen wurden folgende Grenzen untersucht:

- PGT 4-5.5: Nur kleine notwendige Variationen, angelehnt an der üblichen Betriebsweise eines Kühlhauses bei 5 °C
- PGT 2-8: Erweiterte Grenzen, welche noch innerhalb der Kühlanforderungen an Molkereiprodukte sind (DIN 10508) (BITO-Lagertechnik Bittmann GmbH)
- PGT 2-5.5: Obere Grenze ist nahe an der üblichen Betriebsweise mit 5 °C, untere Grenze erlaubt eine deutlich weitere Abkühlung. Produkte können so kälter als üblich werden, jedoch nicht deutlich wärmer.

6.4.3 Lkw-Transport

Die Flexibilisierung des Lkw-Transports besteht in der Anpassung der Temperatur des gekühlten Laderaums (Lkw-Laderaumtemperatur).

Die Endtemperatur der Molkereierzeugnisse bei Auslieferung an den Kunden (z. B. Supermarkt) wird beeinflusst durch:

- Starttemperatur der Produkte bei Auslieferung
- Lkw-Laderaumtemperatur
- Fahrtdauer
- Wetter

Sind Fahrtdauer und Zeitpunkt gleich (damit ist der Wiedereinfluss konstant), können Starttemperatur und Lkw-Temperatur aufeinander abgestimmt werden um die gleiche Endtemperatur bei Auslieferung zu erreichen.

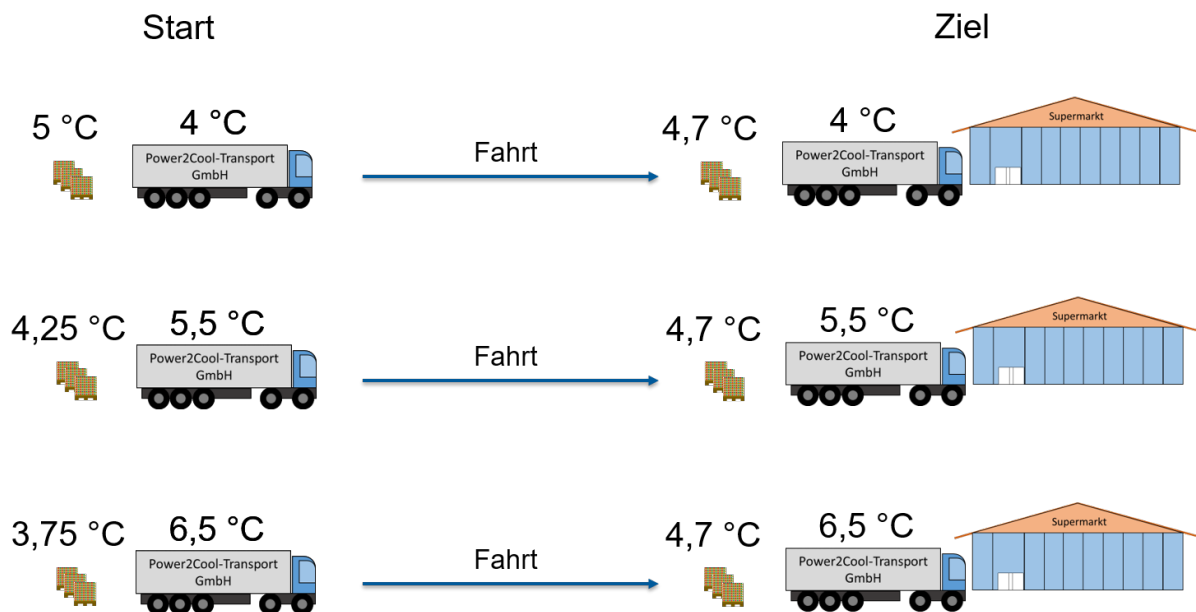


Abbildung 73: Drei verschiedene Kombinationen aus Palettentemperatur bei Auslagerung und Lkw-Laderaumtemperatur zur Erreichung der gleichen Palettentemperatur bei Ende der Auslieferung

Abbildung 73 zeigt verschiedene Kombinationen aus Palettentemperatur vor Start der Auslieferung (gleichbedeutend mit Temperatur bei Auslagerung aus dem Kühlhaus) und Lkw-Laderaumtemperatur. In der oberen Kombination aus Abbildung 73 besitzen die Paletten zu Beginn eine Temperatur von 5 °C. Der Lkw besitzt eine Innentemperatur von 4 °C. Nach einer zehnstündigen Fahrt im Monat Mai des Testreferenzjahrs (Deutscher Wetterdienst 2017) besitzen die Paletten eine durchschnittliche Temperatur von 4,7 °C. Diese 4,7 °C können ebenso mit einer Palettentemperatur von 4,25 °C zu Beginn der Auslieferung bei einer Lkw-Laderaumtemperatur von 5,5 °C erreicht werden. In diesem Fall erwärmen sich die Produkte gegenüber dem Beginn der Auslieferung um 0,45 K. Im oberen Beispiel werden die Produkte um 0,3 K aktiv durch den Lkw herabgekühlt. Wird die Palettentemperatur noch weiter abgesenkt (unteres Beispiel aus Abbildung 73), kann die Lkw-Laderaumtemperatur noch weiter erhöht werden.

6.5 Ergebnisse Flexibilisierung der einzelnen Glieder

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Flexibilisierung einzelner Glieder der Kühlkette dargestellt. Die Ergebnisse des Kühlhauses werden aufgeteilt nach Variante 1 und Variante 2 (siehe auch Abschnitt 6).

6.5.1 Kühltunnel

Die Flexibilisierung des Kühltunnels geschieht durch die Variation der Lufteintrittstemperatur. Dadurch wird die elektrische Leistungsaufnahme variiert (siehe Abschnitt 6.4.1).

Abbildung 74 zeigt die relative CO₂-Emissionsänderung gegenüber der Referenz in %. Die Referenz bezeichnet die übliche Betriebsweise bei der die Lufteintrittstemperatur in den Kühltunnel unabhängig vom GEF bei 4 °C ist. Die Abbildung zeigt, dass für den dargestellten Monat die CO₂-Emissionen durch den Strombezug sinken, wenn die Lufteintrittstemperatur variiert wird und dabei die mittlere Lufteintrittstemperatur gleichbleibt. Die Einsparung (negative Änderung) ist umso größer, je größer die Variation der Lufteintrittstemperatur ist. Die Einsparungen bewegen sich jedoch für den untersuchten Zeitraum in einem geringen Bereich von bis zu einem Prozent.

Für den Fall, dass die mittlere Lufteintrittstemperatur sinkt, d. h. die Kühlleistung steigt im Mittel, entstehen gegenüber der Referenz höhere CO₂-Emissionen. Die CO₂-Emissionen sind umso höher, je geringer die mittlere Lufteintrittstemperatur ist. Es entsteht ein Mehrverbrauch von bis zu etwa fünf Prozent.

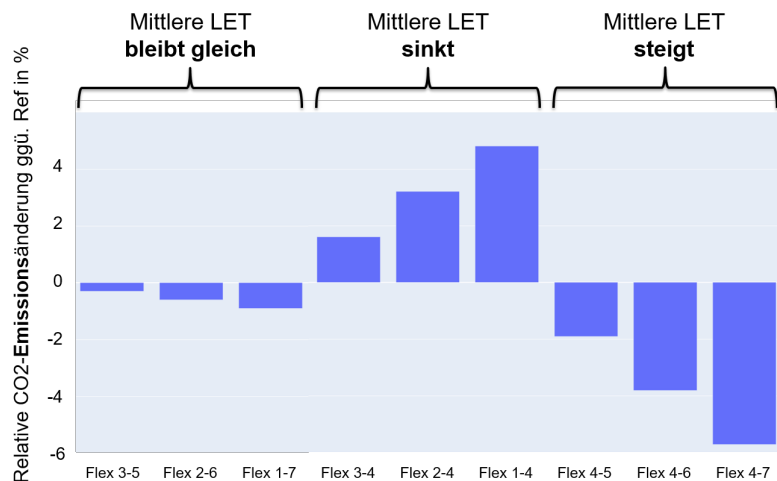


Abbildung 74: Relative CO₂-Emissionsänderung gegenüber Ref in % für den Monat Mai 2021

Wenn die mittlere Lufteintrittstemperatur steigt und somit die Kühlleistung sinkt, entstehen Einsparungen von CO₂-Emissionen bis zu sechs Prozent.

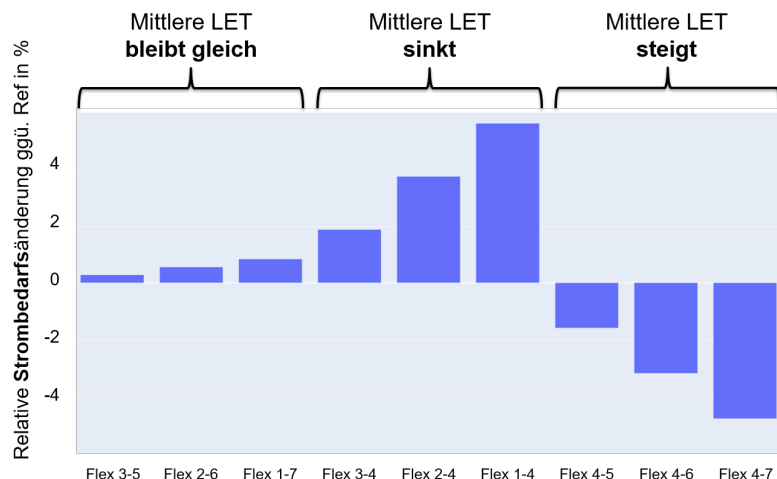


Abbildung 75: Relative Strombedarfsänderung gegenüber Ref in % für den Monat Mai 2021

Abbildung 75 zeigt die Veränderungen im Stromverbrauch für die Variation der Lufteintrittstemperaturen. Für den Fall „mittlere LET bleibt gleich“ wird bis zu 1,5 Prozent mehr Strom benötigt, gleichzeitig jedoch insgesamt CO₂-Emissionen eingespart. Dies zeigt, dass der Strombezugszeitpunkt einen Einfluss auf die Emissionen hat. Bei „mittlere LET sinkt“ ist der prozentuale Strommehrverbrauch größer als der prozentuale Mehrbedarf an Emissionen. Für den letzten untersuchten Fall „mittlere LET steigt“ ist die Emissionseinsparung größer als sich allein durch den geringeren Verbrauch an Strom ergibt. Dies zeigt, dass Mehrverbrauch an Strom durch einen geeigneten Zeitpunkt des Strombezugs zu gewissen Teilen kompensiert werden kann.

6.5.2 Kühlhaus zur Temperaturhaltung

Im Folgenden werden Ergebnisse für die Flexibilisierung des Kühlhauses zur Temperaturhaltung (Variante 1, siehe Abschnitt 6) beschrieben.

Wie in Abschnitt 6.4.2 beschrieben, besteht die Flexibilisierung des Kühlhauses aus den Zieltemperaturen der Luft sowie den Produktgrenztemperaturen. In diesem untersuchten Szenario wird die untere Zieltemperatur der Luft auf 0 °C und die obere Zieltemperatur der Luft auf 10 °C festgelegt. Im Mittel ergibt dies eine Zieltemperatur der Luft bei 5 °C, dies entspricht der Zieltemperatur der Luft bei der üblichen Betriebsweise. Die Produktgrenztemperaturen werden entsprechend der Beschreibung aus Abschnitt 6.4.2 variiert.

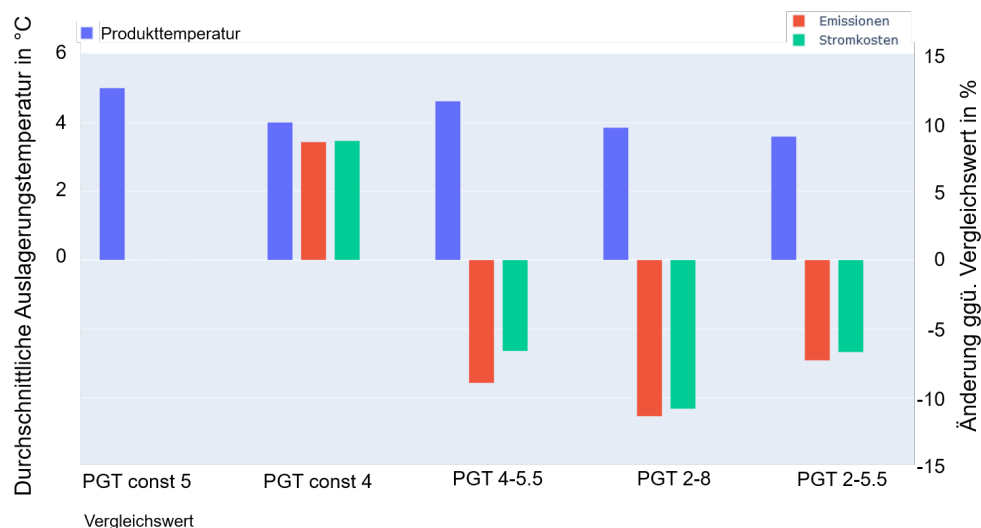


Abbildung 76: Ergebnisse für Flexibilisierung des Kühlhauses zur Temperaturhaltung für Mai 2021

Abbildung 76 zeigt die Ergebnisse der Flexibilisierung des Kühlhauses zur Temperaturhaltung für den ausgewählten Monat Mai im Jahr 2021. Das Szenario PGT const 5 beschreibt die übliche Betriebsweise bei einer konstanten Zieltemperatur der Luft bei 5 °C und stellt den Vergleichswert dar. Dieser wird mit den weiteren Szenarien – konstante Zieltemperatur von 4 °C und drei flexiblen Varianten – verglichen.

Verglichen werden die durchschnittliche Auslagerungstemperatur, die Änderungen in den CO₂-Emissionen und den Stromkosten.

Die durchschnittliche Auslagerungstemperatur stellt die nach Anzahl der Paletten gewichtete gemittelte Temperatur der ausgelagerten Paletten über den Monat dar. Die Auslagerungstemperatur ist aufgrund der Flexibilisierung und der unterschiedlichen Wärmeeinträge nicht konstant. Die Auslagerungstemperatur ist eine entscheidende Größe, da sie einerseits ein Indikator ist, wieviel Kühlleistung im Kühlhaus eingetragen wird und

andererseits entscheidende Auswirkungen auf den weiteren Energieverbrauch in den nachfolgenden Schritten hat.

Die CO₂-Emissionen und Stromkosten beziehen beide auf den elektrischen Energiebedarf für die Verdichter der Kälteanlage. CO₂-Emissionen werden über den GEF ermittelt. Stromkosten beziehen sich auf die Day-Ahead-Strombörsenpreise.

Abbildung 76 zeigt, dass die drei Flexibilisierungen – PGT 4-5.5, PGT 2-8 und PGT 2-5.5 – sowohl bei den CO₂-Emissionen als auch bei den Stromkosten Einsparungen bei gleichzeitig geringeren durchschnittlichen Temperaturen erzielen. Die Einsparungen sind für den größten zulässigen Bereich der Produktgrenztemperaturen (PGT 2-8) am größten. Die Emissionseinsparungen für PGT 2-5.5 sind geringer als für PGT 4-5.5, jedoch werden bei PGT 2-5.5 geringere monatliche Durchschnittstemperaturen erzielt.

6.5.3 Kühlhaus zur Abkühlung

Im Folgenden werden Ergebnisse für die Flexibilisierung des Kühlhauses zur Abkühlung (Variante 2, siehe Abschnitt 6) beschrieben.

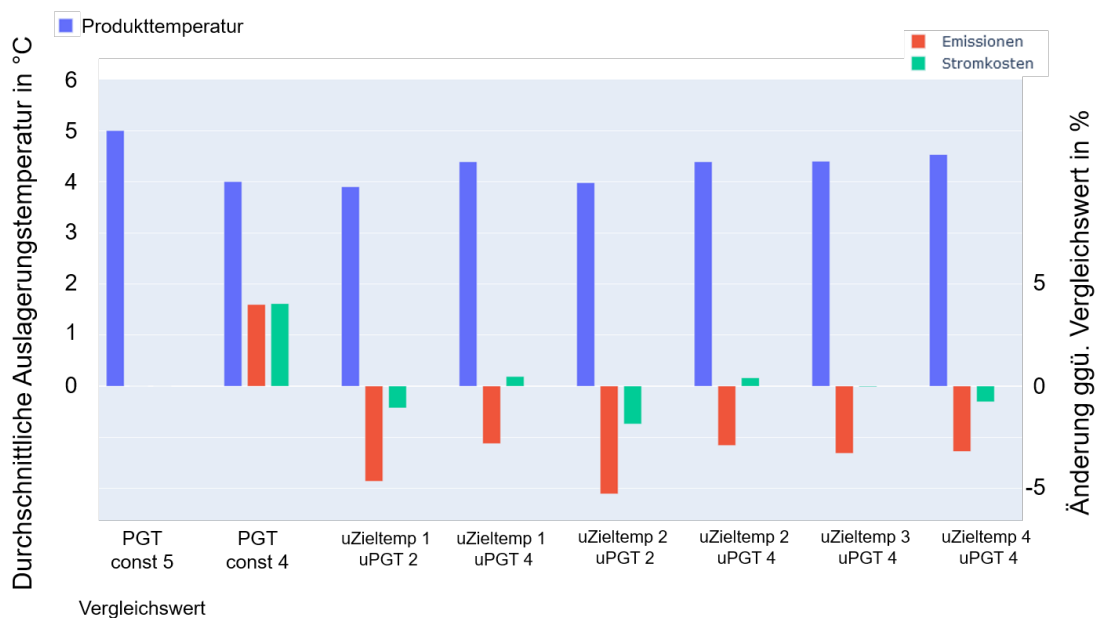


Abbildung 77: Ergebnisse für Flexibilisierung des Kühlhauses zur Abkühlung für Mai 2022

In dieser Untersuchung werden sowohl die Produktgrenztemperaturen als auch die Zieltemperaturen der Luft variiert. In dieser Variante der Kühlkette wird das Kühlhaus zur Abkühlung verwendet und nicht nur zur Temperaturhaltung. Abhängig von der Produktion werden zu bestimmten Zeiten immer neue Paletten eingelagert, deren Temperatur zu Beginn ca. 25 °C beträgt. Aufgrund dessen und dadurch, dass sich zumeist immer Paletten mit einer Temperatur über der in Abschnitt 6.4.2 vorgestellten oberen Produktgrenztemperatur befinden, sind für ein Kühlhaus zur Abkühlung nur die untere Produktgrenztemperatur (d. h. 2 °C bei PGT 2-5.5) und die untere Zieltemperatur (d.h. 3 °C bei 3-7) entscheidend. Ebenso ist es nur sinnvoll, eine untere Zieltemperatur zu wählen, deren Temperatur unter der unteren Produktgrenztemperatur liegt. Andernfalls kann die untere Produktgrenztemperatur nicht erreicht werden, da die Temperatur des Produkts nicht unter der Lufttemperatur liegen kann. Es werden insgesamt sechs Varianten der Flexibilisierung untersucht.

Abbildung 77 zeigt die Ergebnisse der Flexibilisierung des Kühlhauses zur Abkühlung für Mai 2022.

Dargestellt ist die durchschnittliche Auslagerungstemperatur, die CO₂-Emissionen und die Stromkosten (siehe Abschnitt 6.5.2 zur Erklärung der Größen).

Die konstante Zieltemperatur der Luft stellt den Vergleichswert dar. In allen dargestellten Flexibilisierungen liegt die durchschnittliche Auslagerungstemperatur unter der Auslagerungstemperatur für die übliche Betriebsweise. In allen Fällen wird eine CO₂-Emissionseinsparung (negative Änderungen) erreicht. Die Einsparung fällt für niedrige untere Produktgrenztemperaturen, bei gleicher unterer Zieltemperatur der Luft, größer aus. Niedrigere Zieltemperaturen der Luft haben, bei gleicher unterer Produktgrenztemperatur, geringere Emissionseinsparungen.

Die Einsparungen der Stromkosten sind geringer als die Einsparungen der CO₂-Emissionen, teilweise entstehen geringere Mehrkosten für den Strombezug.

6.5.4 Lkw-Transport

Für den Lkw-Transport sind die Diesel-bedingten Emissionen und Kosten von Bedeutung. In beiden Fällen werden nur die kühlungsbedingten Emissionen und Kosten berücksichtigt und nicht die Emissionen für die Fahrt selbst, da diese identisch sind und nicht verändert werden.

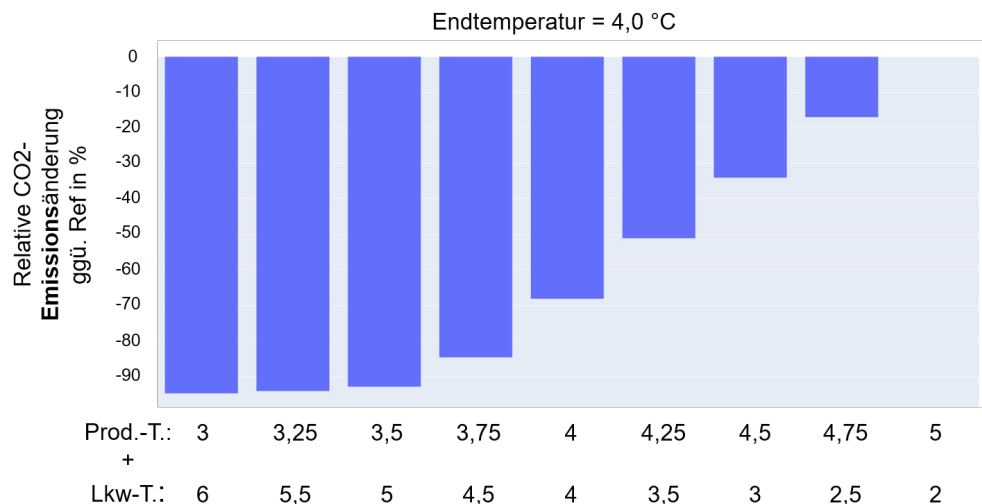


Abbildung 78: Relative CO₂-Emissionsänderung gegenüber der Referenz in % für den Testdatensatz Mai

Abbildung 78 zeigt die relative CO₂-Emissionsänderung gegenüber der Referenz in % für den Monat Mai aus dem Testreferenzjahr (Deutscher Wetterdienst 2017). Die Werte beziehen sich auf den monatlichen Verbrauch für den täglichen zehnstündigen Transport einer vollen Lkw-Ladung jeweils beginnend um 07:00 Uhr. Die Wettereinflüsse sind für alle betrachteten Szenarien somit identisch. Es wird die Lkw-Laderaumtemperatur (Lkw-T.) an die durchschnittliche Produkttemperatur (Prod.-T.) angepasst, damit in allen betrachteten Szenarien die durchschnittliche Temperatur bei der Auslieferung 4 °C beträgt.

Die Ergebnisse zeigen, dass umso weniger CO₂ ausgestoßen wird, je höher die Lkw-Laderaumtemperatur ist, da weniger Kühlleistung durch den Lkw bereitgestellt werden muss. Die Emissionen können für den betrachteten Fall (Monat Mai, Fahrtzeitpunkt, Dauer) um über 90 % reduziert werden. Es zeigt sich zudem, dass der Verlauf der Kurve zwischen einer Produkttemperatur von 3,5 °C und 3,75 °C bzw. einer Lkw-Laderaumtemperatur von 5 °C und 4,5 °C einen Knickpunkt besitzt. Links von diesem Knickpunkt (Produkttemperatur sinkt weiter bzw. Lkw-Laderaumtemperatur steigt) bewirkt eine weitere Abkühlung der Produkte geringere weitere Emissionseinsparungen als rechts des Knickpunkts (links des Knickpunkts ist die

Steigung der Kurve geringer). Der Grund liegt darin, dass bei hohen Lkw-Laderaumtemperaturen nur sehr wenig Kühlleistung seitens des Lkws bereitgestellt werden muss. Die Emissionen fallen hauptsächlich für die Temperierung der Isolierung an.

Die Ergebnisse für die Einsparung von Diesel und/oder Einsparung von Kosten sehen identisch zu den Einsparungen der Emissionen aus, da zwischen diesen Werten ein konstanter Umrechnungsfaktor besteht.

6.6 Ergebnisse Flexibilisierung der gesamten Kühlkette

In den Abschnitten 6.5.1, 6.5.2, 6.5.3 und 6.5.4 wurden die Auswirkungen der Flexibilisierung auf die einzelnen Glieder der Kühlkette dargestellt. Die einzelnen Glieder der Kette haben jedoch Auswirkungen auf die nachfolgenden Glieder, insbesondere, wenn in einem Schritt weniger gekühlt wird, d. h. die Produkte besitzen eine höhere Produkttemperatur zu Beginn des nachfolgenden Schritts.

Daher werden im Folgenden die Ergebnisse (z. B. CO₂-Emissionen) als Gesamtes betrachtet. Theoretisch ergibt sich eine große Anzahl an möglichen Gesamtflexibilisierungen, wenn jegliche Einzelflexibilisierung kombiniert wird. Jedoch können gewisse Kombinationen bereits im Voraus ausgeschlossen werden.

So ist es nicht sinnvoll, wenn die Produktaustrittstemperatur aus dem Kühltunnel z. B. bei ca. 3-8 °C liegt, die Produktgrenztemperaturen im Kühlhaus jedoch bei 4-5,5 °C. Fast jede Palette, die in das Kühlhaus eingelagert wird, würde somit außerhalb der Produktgrenztemperaturen liegen, das Kühlhaus wird somit seiner Flexibilität beraubt, da es keine Freiheitsgrade besitzt. Diese nicht sinnvollen Kombinationen werden vor Berechnung der Ergebnisse eliminiert.

6.6.1 Kühlkette mit Kühlhaus zur Temperaturhaltung

Im Folgenden wird die Kühlkette mit Vorkühlung und Kühlhaus zur Temperaturhaltung betrachtet.

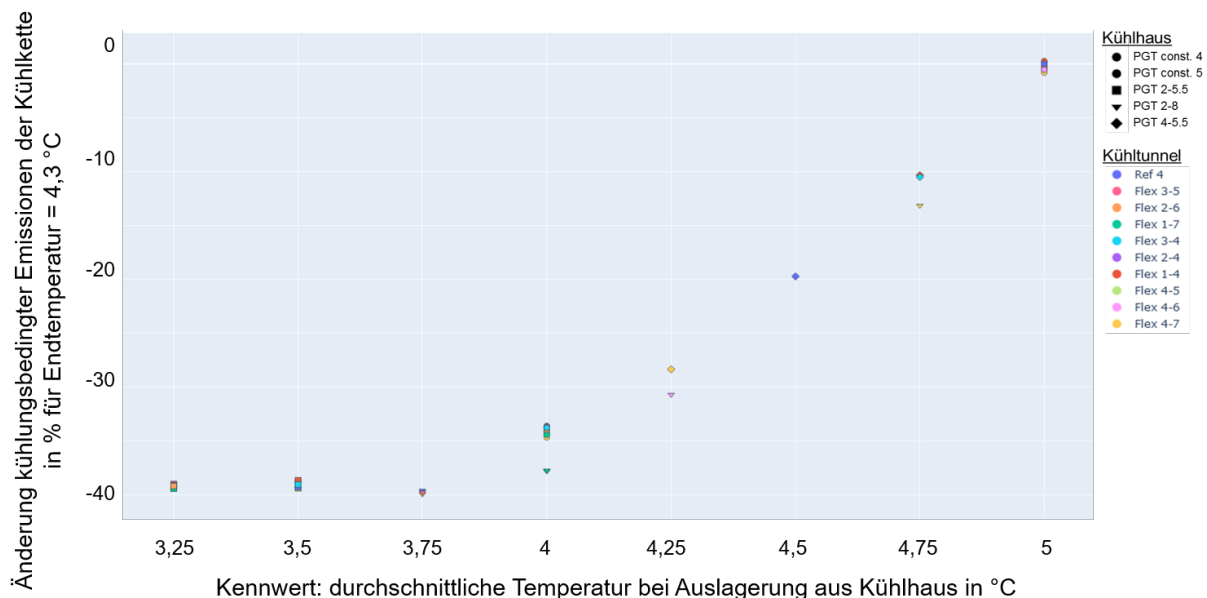


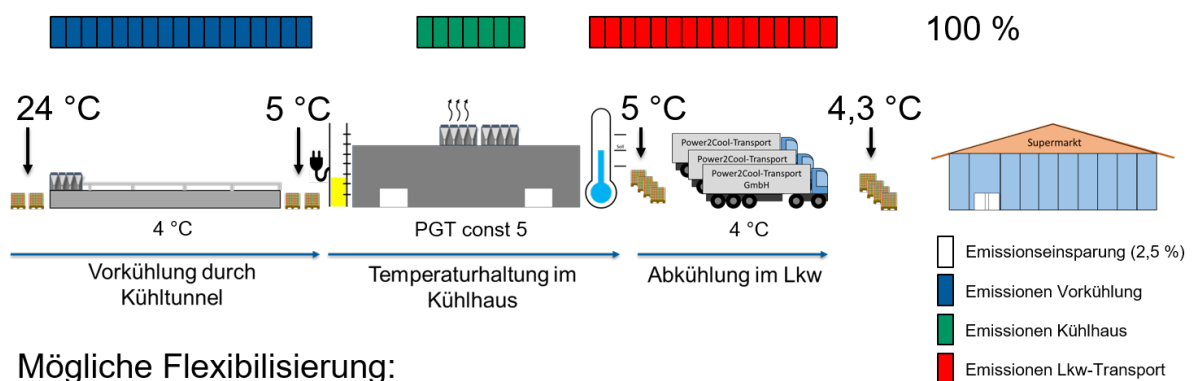
Abbildung 79: Ergebnisse der relativen Änderung der kühlungsbedingten Emissionen der Kühlkette in % für eine Endtemperatur bei Auslieferung von 4,3 °C für den Untersuchungszeitraum Mai 2021

Abbildung 79 zeigt die relative Emissionsänderung der kühlungsbedingten Emissionen der gesamten Kühlkette für eine Endtemperatur bei Auslagerung von 4,3 °C für den

Untersuchungszeitraum Mai 2023 in Abhängigkeit der durchschnittlichen Temperatur bei Auslagerung aus dem Kühlhaus. Da die Ergebnisse der kühlungsbedingten Emissionen aus dem Lkw-Transport nur in 0,25-K-Schritten vorhanden sind, werden die Auslagerungstemperaturen nach dem Kühlhaus auf die in der Abbildung dargestellten Werte gerundet. Die Form der dargestellten Werte (Kreis, Quadrat, ...) stellt die Betriebsweise des Kühlhauses dar. Die Farbe steht für die Betriebsweise des Kühltunnels.

Aus Abbildung 79 ist erkenntlich, dass mit Verringerung der Temperatur der ausgelagerten Produkte bis zu einer bestimmten Temperatur eine Minderung der CO₂-Emissionen einhergeht. Zwischen 3,75 °C und 4 °C besteht ein Wendepunkt der Kurve. Rechts des Knickpunkts bewirkt eine Temperatursenkung eine Verminderung der CO₂-Emissionen. Links des Knickpunkts bewirkt eine weitere Absenkung einen leichten Anstieg der CO₂-Emissionen. Dieser Knickpunkt ist ähnlich zum Knickpunkt in Abbildung 78. Für den dargestellten Monat und die dargestellte Fahrt bewirkt eine weitere Absenkung der Produkttemperaturen nur sehr geringe CO₂-Minderungen, da nur noch ein sehr geringer Kühlbedarf besteht. Eine weitere Absenkung der Produkttemperatur verursacht mehr CO₂-Emissionen in der Kette davor als die Absenkung im Lkw-Transport an Einsparungen bringt.

Normale Betriebsweise:



Mögliche Flexibilisierung:

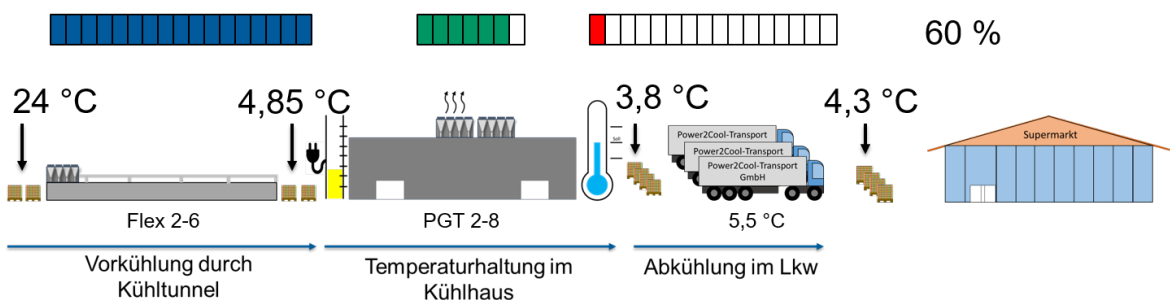


Abbildung 80: Gegenüberstellung der Aufteilung der Emissionen auf die einzelnen Glieder der Kühlkette mit Vorkühlung für normale Betriebsweise und eine mögliche Flexibilisierung für den Untersuchungszeitraum Mai 2021

Abbildung 80 stellt die Emissionen der einzelnen Glieder der Kühlkette für eine normale Betriebsweise und eine mögliche Flexibilisierung für den Untersuchungszeitraum Mai 2021, gegenüber. Es sind die kühlungsbedingten Emissionen dargestellt. Die übliche Betriebsweise besteht aus einem Kühltunnel mit einer Lufteintrittstemperatur von 4 °C, einer konstanten Temperatur von 5 °C im Kühlhaus und einer Lkw-Temperatur von 4 °C.

In diesem Zeitraum entfallen für die übliche Betriebsweise (oben in Abbildung 80) 42,8 % der Emissionen auf die Vorkühlung, 16,3 % auf das Kühlhaus und 41,0 % auf den Lkw-Transport.

Die Aufteilung ist abhängig von den durchgeführten bzw. angenommenen Fahrten und der Innentemperatur des Lkw-Transports.

Unten in Abbildung 80 ist die flexible Betriebsweise mit Flex 2-6 für den Kühl tunnel, PGT 2-8 für das Kühlhaus und einer Lkw-Temperatur von 5,5 °C dargestellt. Hierbei entfallen 42,5 % auf die Vorkühlung, 14,4 % auf das Kühlhaus und 3,2 % auf den Lkw-Transport.

Die Einsparungen für den Kühl tunnel sind im Einzelnen als auch in der gesamten Kühlkette sehr gering. Für das Kühlhaus bewirkt eine Emissionsminderung von 12 % im Einzelnen für PGT 2-8 (siehe Abbildung 76), eine Emissionsminderung von 1,9 % in der Kühlkette. Die größte Emissionsminderung wird im Lkw-Transport erzielt. Dort können die Emissionen von 60 % Anteil in der Kühlkette auf 3 % gesenkt werden.

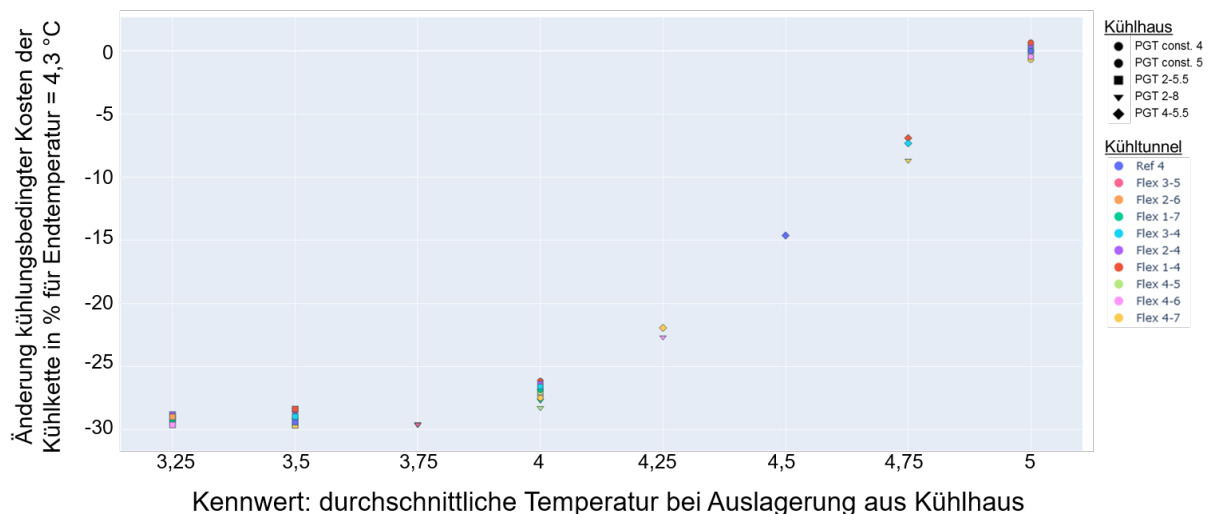


Abbildung 81: Ergebnisse der relativen Änderung der kühlungsbedingten Kosten der Kühlkette in % für eine Endtemperatur bei Auslieferung von 4,3 °C für den Untersuchungszeitraum Mai 2021

Abbildung 81 zeigt die relative Änderung der kühlungsbedingten Kosten der Kühlkette für den Untersuchungszeitraum. Die kühlungsbedingten Kosten setzen sich aus den Stromkosten für die Vorkühlung und das Kühlhaus sowie den Dieselanteil der Kühlung im Lkw-Transport zusammen. Die Stromkosten setzen sich aus dem Strombörsenpreis sowie den Netzentgelten und Umlagen zusammen (BDEW Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V. 2022). Die Dieselpreise sind Nettopreise für 2021 (Statista Research Department 2023). Der Kurvenverlauf ist ähnlich dem der relativen Änderungen der Emissionen aus Abbildung 79.

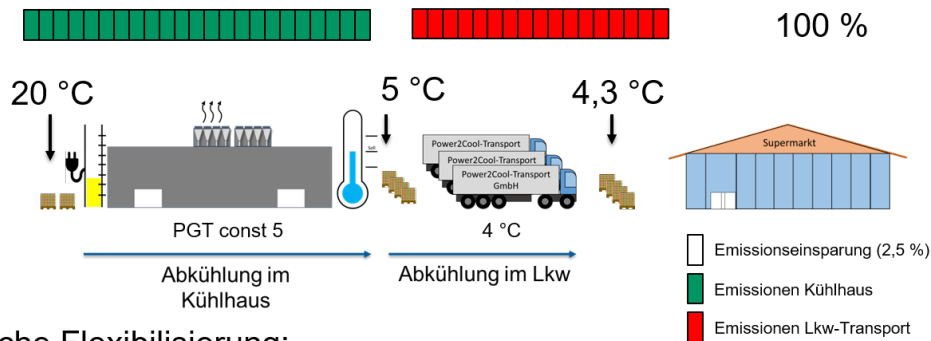
6.6.2 Kühlkette mit Kühlhaus zur Abkühlung

Abbildung 82 stellt die Emissionen der einzelnen Glieder der Kühlkette ohne Vorkühlung für eine normale Betriebsweise und eine mögliche Flexibilisierung, für den Untersuchungszeitraum Mai 2022, gegenüber. Es sind die kühlungsbedingten Emissionen dargestellt. Die übliche Betriebsweise besteht aus einer konstanten Temperatur von 5 °C im Kühlhaus und einer Lkw-Temperatur von 4 °C.

In diesem Zeitraum entfallen für die übliche Betriebsweise (oben in Abbildung 82) 57,5 % der Emissionen auf das Kühlhaus und 42,5 % auf den Lkw-Transport. Die Aufteilung ist abhängig von den durchgeführten bzw. angenommenen Fahrten und der Innentemperatur des Lkw-Transports.

Die flexible Betriebsweise besteht aus einer Zieltemperatur von 1-9 und PGT 2-5.5 im Kühlhaus sowie der Lkw-Laderaumtemperatur von 5 °C. Die flexible Betriebsweise besitzt 58 % der Emissionen aus der üblichen Betriebsweise. 55 Prozentpunkte dieser 58 % fallen im Kühlhaus an. Die restlichen 3 % werden im Lkw-Transport verursacht. Ebenso wie in Abschnitt 6.6.1 entfällt der größte Teil der Emissionseinsparung auf den Lkw-Transport.

Normale Betriebsweise:



Mögliche Flexibilisierung:

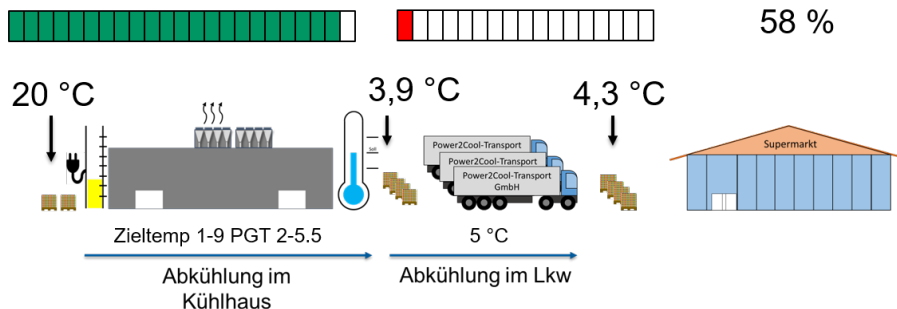


Abbildung 82: Gegenüberstellung der Aufteilung der Emissionen auf die einzelnen Glieder der Kühlkette ohne Vorkühlung für normale Betriebsweise und eine mögliche Flexibilisierung für den Untersuchungszeitraum Mai 2022

6.7 Einordnung der Ergebnisse

- Aufgrund der Vielzahl an Daten (z. B. Monate) und Flexibilisierungsoptionen ist für jede Kühlketten-Variante ein bestimmter Untersuchungszeitraum im Detail untersucht worden. Für Kühlkettenvariante 1 ist dies Mai 2021 und für Variante 2 Mai 2022.
- Der Lkw-Transport wurde stellenweise noch vereinfacht betrachtet. Aufgrund des höheren Rechenaufwands konnten nicht palettengenaue Temperaturen verwendet werden, sondern es musste die Palettentemperatur vor „Einlagerung“ in den Lkw gerundet werden. Ebenso beziehen sich die Emissionen auf den monatlichen Durchschnittswert für das Testreferenzjahr.

6.8 Zwischenfazit

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Aspekte der Kühlkette und deren Optimierung untersucht.

Praktische Versuche haben gezeigt, dass es nach wie vor Diskrepanzen zwischen den theoretischen Modellierungen und den tatsächlichen Beobachtungen gibt. Ein beobachtetes Phänomen war, dass bei einem erhöhten Kälteeintrag die Lufttemperatur weniger stark sank als ursprünglich angenommen. Dies könnte möglicherweise auf eine erhöhte Wärmetauscher-Fähigkeit der Produkte hinweisen.

Unter dem Gesichtspunkt von Industrie 4.0 ergeben sich zusätzliche Herausforderungen und Möglichkeiten. Die Regelung der Kälteleistung erfordert, insbesondere für große

Zieltemperaturbereiche und Produktgrenztemperaturen, eine kontinuierliche Berechnung der Produkttemperaturen. Darüber hinaus ist es für die Lkw-Beladung unerlässlich, die Temperatur jeder einzelnen Palette zu kennen. Die Generierung und Verarbeitung einer Vielzahl von Messdaten und Simulationsdaten führt zur Notwendigkeit, Big Data-Ansätze in den Fokus zu nehmen. Ein weiterer Aspekt ist die Integration eines flexiblen Stromeinkaufs als Teil der Energiebeschaffungsstrategie. Die Flexibilisierung der gesamten Kühlkette kann signifikante Emissions- und Kostenreduktionen mit sich bringen. Dabei sind die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Gliedern der Kühlkette von besonderer Bedeutung.

Ein entscheidender Faktor ist die Auslagerungstemperatur aus dem Kühlhaus. Die Untersuchungen zeigten, dass der Großteil der Emissions- und Kostenreduktion durch die Einsparung von Diesel erreicht wird. Es wurde festgestellt, dass eine Absenkung der Auslagerungstemperatur nur bis zu einem bestimmten Wert sinnvoll ist. Eine weitere Reduktion führt nicht zu zusätzlichen Emissions- und Kostensenkungen.

Es ist wichtig zu betonen, dass die Ergebnisse stark von den örtlichen Gegebenheiten, wie Anlagentechnik und durchgeführten Fahrten, abhängen. Daher sind die identifizierten Potenziale im Einzelfall genau zu prüfen. Abschließend zeigt dieses Projekt, dass die Optimierung der Kühlkette ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Faktoren darstellt, wobei sowohl technologische als auch betriebswirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden müssen.

7 Zusammenfassung: Systemeffizienz in der Molkerei

In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Kapitel 4, 5 und 6 zusammengefasst.

Tabelle 22: Zusammenfassung der Ergebnisse für Reinigungsanlagen

Ziel	Maßnahme	Energieeffizienz	Flexibilität	Systemeffizienz	Ökonomisches Fazit
Abkühlung verhindern	Isolierung	++	0	Kein SE-Effekt, CO ₂ -Senkungspotential	Energiekosteneinsparung, überschaubarer Aufwand
Abkühlung verhindern	Vorwärmen der Rohre (Nutzung der Abwärme)	+	0	Kein SE-Effekt, CO ₂ -Senkungspotential	Senkung Energiekosten, Nennenswerter Aufwand
Verluste vermeiden	Wärmerückgewinnung (Gully)	++	+	Bei Einsatz WP SE-Effekt, CO ₂ -Senkungspotential	Hohes Potenzial, hoher Aufwand, WP erhöht Potential
Energiebedarfszeitpunkt optimieren	Lastverschiebung	0/-	+	SE-Effekt eintreten, CO ₂ -Senkungspotential	Hoher Aufwand, Effekt relevant in Kombination mit BHKW

Tabelle 23: Zusammenfassung der Ergebnisse für Energiebereitstellung AMS

Ziel	Maßnahme	Energieeffizienz	Flexibilität	Systemeffizienz	Ökonomisches Fazit	
Strombörsenpreisorientierter BHKW-Betrieb	größeres BHKW	- bis +	0 bis ++	SE-Effekt, Erdgasbedarf, höhere Minderung	mehr aber CO ₂ -	Kann Emissionen senken, Energieversorgungskosten reduzieren bzw. stabilisieren
Emissionen senken durch gezieltere Wärmenutzung	größere BHKW sinnvoll mit angepassten Wärmekonzepten ergänzen	+ bis ++	0 bis ++	SE-Effekt, Effizienz steigt	die	Kann Emissionen und Energiebedarf und somit -kosten senken, Aufwand variiert stark, nicht an jedem Standort realisierbar
Resilienteres System ggü. steigender Volatilität in der Energieversorgung (€ + KW)	Strombörsenpreisorientierte flexible Stromspeisung und Strombezug	+	+	SE-Effekt eintreten	kann	Abhängig von zukünftiger Entwicklung der Rahmenbedingungen und Energiepreise

Tabelle 24: Zusammenfassung der Ergebnisse für Kühlhaus / Hochregallager

Ziel	Maßnahme	Energieeffizienz	Flexibilität	Systemeffizienz	Ökonomisches Fazit
Zeit des (el.) Leistungsbedarfs optimieren	Temperaturbereich oder ggf. Leistungsfähigkeit Kälteanlage anpassen	- bis +	++	SE-Effekt, dadurch CO2-Minderung steigerbar	Kann Emissionen und Energiebedarf ändern und Energiekosten sparen, Aufwand variiert stark
Emissionen senken durch Flexibilität (Grenze Molkerei)	Produktgrenztemperatur ausnutzen; Lufttemp. verändern; Kälteleistung verändern	- bis +	+	SE-Effekt	Kann Emissionen und Energiekosten sparen, Aufwand variiert stark
Emissionen senken durch Produkttemperatur für Transport	Effiziente Kühlung im Kühlhaus für die Produkte im Transport	++	0	SE-Effekt, z.T. Energiebedarf in der Kühlung, Einsparung durch Diesel	Kann Emissionen sehr stark senken; geringer bis hoher Aufwand (abhängig ob flexibel oder nicht)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Systemeffizienz in Molkereien durch Mobilisierung der möglichen Temperaturniveaus erhöht werden kann (siehe auch Abbildung 83):

- BHKW + Flexibilisierung des Strombezugs:
 - Intelligente Integration von Wärmemengen
 - Angepasste Wärmenutzungskonzepte durch geschickte Nutzung des Temperaturniveaus
- Reinigungsanlagen:
 - Verhindern von Absinken der Temperaturen (Isolierung)
 - Nutzung von ungenutzten Temperaturniveaus (Abwärmennutzung) durch Integration von Wärmemenge mit entsprechenden Temperaturniveaus
 - Integration von Wärmemengen mit niedrigen Temperaturniveaus
 - Effiziente Erhöhung der Temperaturniveaus durch Wärmepumpen (mit Zugewinn von Flexibilität: CO₂-arme Erhöhung)
- Kühlhaus / Hochregallager:
 - Ein Nutzen der zulässigen Produktgrenztemperaturen ermöglicht die Systemeffizienz und dadurch ein Einsparen von Emissionen
 - Ein Erhöhen der zulässigen Produktgrenztemperaturen führt zu einer Steigerung die Emissionseinsparungen

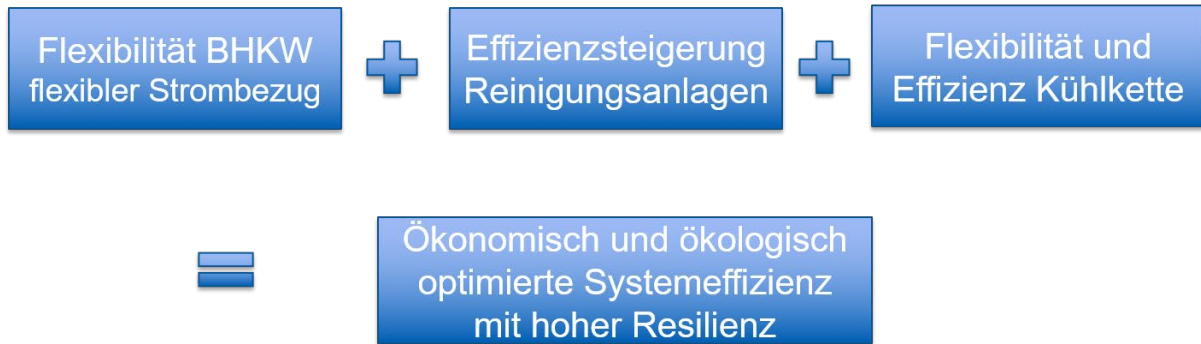


Abbildung 83: Zusammenfassung der Ergebnisse

Die milchverarbeitende Industrie steht an einem entscheidenden Punkt, an dem sie nicht nur auf die Energiewende reagieren, sondern auch eine aktive Rolle in ihrer Gestaltung übernehmen kann. Durch ihre spezifische Infrastruktur und Prozessgestaltung bringt sie ideale Voraussetzungen mit, diesen Wandel nicht nur zu begleiten, sondern ihn proaktiv mitzugestalten und so nicht lediglich passiv von den Veränderungen betroffen zu sein.

Trotz eines sich stark wandelnden Energieversorgungssystems eröffnen sich für die Branche Chancen zur CO₂-Reduzierung und zur Stabilisierung des Energiekostenanteils. Dies zeigt sich insbesondere im Hinblick auf die Betriebsweise von Kühlhäusern, einem zentralen Prozessschritt in der Kühlkette. Änderungen in diesem Bereich können nicht nur den Energiebedarf des Kühlprozesses selbst beeinflussen, sondern haben auch Auswirkungen auf nachgelagerte Prozesse, wie den Transport der Produkte. Insbesondere im Kontext aufstrebender Technologien, wie den E-Lkw, kann dies die Reichweite solcher Transportmittel signifikant beeinflussen.

Dennoch ist die Thematik komplex und erfordert weitere Untersuchungen. Einige der relevanten Forschungsfelder sind:

- Die Digitalisierung der Prozessschritte: Um die Effizienz und Nachhaltigkeit zu maximieren, ist es unerlässlich, die Prozesse in der milchverarbeitenden Industrie weiter zu digitalisieren. Dadurch können noch mehr Daten in Echtzeit erfasst und analysiert werden, was wiederum eine präzisere Steuerung und Optimierung ermöglicht.
- Big-Data-Management: Angesichts der enormen Datenmengen, die in modernen Produktionsumgebungen anfallen, ist die effiziente Verwaltung und Analyse dieser Daten von entscheidender Bedeutung. Hierin liegt ein erhebliches Potential, um bisher verborgene Optimierungsmöglichkeiten zu erkennen und zu nutzen.

Abschließend ist zu betonen, dass eine verstärkte Forschung und Begleitung in diesen Bereichen unerlässlich sind, um die milchverarbeitende Industrie in diesem Transformationsprozess bestmöglich zu unterstützen. Es gilt, die vorhandenen Chancen zu erkennen, Herausforderungen zu adressieren und somit einen nachhaltigen und wirtschaftlichen Pfad in die Zukunft der Branche zu ebnen.

8 Wissenstransfer

8.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Im Rahmen des Forschungsprojekts „BlueMilk“ sind mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen entstanden.

Peer-reviewed-Veröffentlichungen:

Folgende peer-reviewed-Veröffentlichungen mit Ergebnissen aus dem Projekt wurden veröffentlicht:

System Efficiency Rating of Industrial Utilities in Electricity Grids with a high share of Variable Renewable Energies (Selleneit et al. 2019b)

Die Veröffentlichung beschäftigt sich mit der Zusammenstellung von technischen und ökonomischen Parametern zur Beschreibung der Systemeffizienz von Energiewandlungsanlagen. Hierzu wurden bereits bestehende Veröffentlichungen zur Flexibilität ((Uwe Abraham Holzhammer 2015), (Dotzauer et al. 2019)) herangezogen und mit der Effizienz zur Systemeffizienz erweitert.

An Approach to Calculate Electricity Costs for the German Industry for a System Efficient Design by Combining Energy Efficiency and Demand Response (Stöckl et al. 2019)

Inhalt dieser Veröffentlichung ist die Beschreibung der Stromkostenbestandteile des deutschen Strompreises (Stand 2019) und wie diese u. a. von der Strommenge (Grundlage für Effizienz) und der maximalen Leistungsaufnahme aus dem öffentlichen Stromnetz (ggf. Grundlage für Flexibilität) abhängen. Dies liefert wichtige Erkenntnisse zur ökonomischen Bewertung der Systemeffizienz.

System efficiency – Methodology for rating of industrial utilities in electricity grids with a high share of variable renewable energies – A first approach (Selleneit et al. 2020e)

Diese Veröffentlichung stellt eine Erweiterung der Veröffentlichung (Selleneit et al. 2019b) dar. In dieser Veröffentlichung werden sowohl die Aspekte und Parameter zur Beschreibung der Systemeffizienz erweitert als auch eine neue Methodik eingeführt, um die Systemeffizienz von Energiewandlungsanlagen zu Bewertung durchzuführen zu können. Die Bewertung basiert darauf, dass vom Energiesystem Anforderungen an die Flexibilität und Effizienz gestellt werden. Diese Anforderungen werden jährlich aus den Day-Ahead-Strombörsenzeitreihen abgeleitet. Aus diesen Anforderungen wird ein Bewertungsschema erstellt. Die technischen Parameter der Energiewandlungsanlagen (z. B. Reaktionszeit) fließen in die Bewertung ein und sind die Grundlage für die Bewertung der Anlagen.

Weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen:

“Method to describe and rate the ability to provide flexibility of residual power providers in electricity grids with a high share of variable renewable energies” (Selleneit et al. 2020a)

In der Begutachtung und geplante Veröffentlichungen:

- *“Using Flexibility to Reduce Greenhouse Gas Emissions of the Entire Cold Chain for Storing, Cooling, and Transporting Dairy Products - A Case Study”* in der Special Issue “Sustainable Production and the Role of Industry in the Energy Transition and Carbon Neutrality” des Journals Sustainability im Verlag “MDPI” (im September 2023 zur Begutachtung eingereicht)
- *“System Efficiency – Do flexible and efficient energy supply concepts for SME dairy companies work? – A detailed Case Study”* in der Special Issue “Sustainable Production and the Role of Industry in the Energy Transition and Carbon Neutrality” des Journals Sustainability im Verlag “MDPI”

Fachzeitschriften:

“Sektorenkopplung: Zukunft betriebliche Energieversorgung - Eigenenergieversorgung oder mehr Resilienz durch Flexibilisierung?” (Fachaufsatz im Fachmedium „BWK Energie.“, eingereicht, noch unveröffentlicht.)

Poster:

BlueMilk – Höherer Einsatz von Erneuerbaren Energien in der Milchindustrie durch Systemeffizienz (Selleneit et al. 2019a)

Das Poster gibt einen Überblick über das Forschungsprojekt „BlueMilk“. Es stellt die Motivation – Erreichen der Klimaschutzziele durch Erhöhen der Stromversorgung aus Erneuerbaren Energien – vor und zeigt die wichtigsten Forschungsfragen. Zu diesen Forschungsfragen gehören die Bewertung der Energiewandlungsanlagen nach Kriterien der Systemeffizienz und nach ökonomischen Kriterien. Es werden zwei von drei im Projekt untersuchten Ansätze bei den Molkereien vorgestellt (Gesamtbetrieblicher Ansatz der Energiebereitstellung und Fokus Reinigungsanlagen). Der Gesamtbetriebliche Ansatz wird ersten Ergebnissen (Energieversorgungskosten für verschiedene Szenarien der Energiebereitstellung) detaillierter vorgestellt.

BlueMilk: Preparation of dairy processing for modified energy systems within the energy transition towards renewables. Implementation by energy efficiency measures and use of flexibility of electrical components (FKZ: 281A103616) (Selleneit et al. 2020d)

Das Poster gibt einen Überblick über das Forschungsprojekt „BlueMilk“. Es stellt die Motivation und die Forschungsfragen sowie die gemeinsamen Ansätze bei den Molkereien vor. Für die drei im Projekt untersuchten Teilbereiche – flexible Energiebereitstellung mit dem BHKW, Reinigungsanlagen und Flexibilisierung des Kühlhauses – werden die Ansätze und teilweise erste Ergebnisse präsentiert.

BlueMilk – Kaskadierte und flexible Nutzung von thermischer Energie in milchverarbeitenden Betrieben mit Schwerpunkt auf die Steigerung der Energieeffizienz von Reinigungssystemen (FKZ: 281A103616) (Selleneit et al. 2020c)

Dieses Poster stellt die deutsche Übersetzung von „BlueMilk: Preparation of dairy processing [...] (FKZ: 281A103616)“ (Selleneit et al. 2020c) dar.

Method to Describe and Rate the Ability to Provide Flexibility of Residual Power Providers in Electricity Grids with a High Share of Variable Renewable Energies (Selleneit et al. 2020b)

Poster zur Veröffentlichung (Selleneit et al. 2020a).

Wissenschaftliche Vorträge:

Auf folgenden Konferenzen wurden wissenschaftliche Vorträge gehalten und mit den anwesenden Wissenschaftlern diskutiert:

22nd Conference on Process Integration, Modelling, and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, PRES'19, Agios Nikolaos, Kreta, 20.-23. Oktober 2019

Auf dieser Konferenz wurden die Inhalte zweier wissenschaftlichen Veröffentlichungen vorgestellt: (Selleneit et al. 2019b) und (Stöckl et al. 2019)

CIRED Workshop 2020: How to Implement Flexibility in the Distribution System? Berlin, 22.-23 September 2020

Vorstellung des Posters (CIRED 2020 Berlin Workshop Poster Session 2020).

DFBEW-Webkonferenz zum Thema Energieeffizienz in der Industrie in Deutschland und Frankreich: Preparation of dairy processing for modified energy systems within the energy transition towards renewables. Implementation by energy efficiency measures and use of flexibility of electrical components, 30. September 2020, Online

Vorstellung des Posters (Selleneit et al. 2020d).

17th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, SDEWES2022, Paphos, Zypern, 06.-10. November 2022

Auf dieser Konferenz wurden Ergebnisse mit dem Titel "Using Flexibility to Utilize Varying Grid Emission Factor to Reduce Greenhouse Gas Emissions of Cold Storage Warehouses" vorgestellt.

8.2 Beteiligungsworkshops und Online-Konferenzen

Zur Integration der Öffentlichkeit und Diskussion der Ansätze und Ergebnisse wurden mehrere Workshops und Online-Konferenzen durchgeführt. Ursprünglich waren die Online-Konferenzen als Präsenzveranstaltungen geplant, mussten jedoch aufgrund der Corona-Pandemie in Online-Veranstaltungen geändert werden.

Beteiligungsworkshops:

Um möglichst früh alle Beteiligten in das Projekt zu integrieren, wurden zwei Beteiligungsworkshops durchgeführt. Der eine in Andechs mit der Gemeinde vor Ort und den Energieversorgern und Netzbetreibern der Firma Andechser Molkerei Scheitz. Der andere bei Zott in Mertingen ebenfalls mit der Gemeinde und den zuständigen Energieversorgern. Durch die frühzeitige Integration in das Projekt sollen vorhandene Ideen, Gemeinsamkeiten und Interessenslagen bereits in der Anfangsphase aufgedeckt werden, um diese in das Vorhaben mitaufzunehmen.

Mertingen

Der erste der zwei Beteiligungsworkshop fand am 06.05.2019 in Mertingen bei Zott im Werk 2 statt. Teilgenommen haben Leiter Energietechnik und Energieeinkauf von Zott, Leiter Industrie/Vertrieb Großkunden des Energieversorgers LEW, Leiternetzzugang Clearing von Netzbetreiber LEW Verteilnetz, Geschäftsführer und Leiter Abteilung Wärme von GP Joule und das Projektteam um BlueMilk des InES.

Das Treffen beinhaltete folgende Agenda:

1. Vorstellungsrunde der anwesenden TeilnehmerInnen
2. Projektvorstellung BlueMilk (InES, Zott)
3. Energiestrategie der Kommune (Gemeinde Mertingen) (entfallen)

4. Preis- und Geschäftsmodelle des aktuellen Energieversorgers (LEW)
5. Preismodalitäten des Stromnetzbetreibers bezogen auf einen flexiblen auf die EE- Erzeugung fokussierten Strombezug (LEW Verteilnetz)
6. Kopplung mit einem überbetrieblichen Wärmenetz (ProTherm, GPJoule)
7. Interaktion zwischen Akteuren

Andechs

Der zweite Beteiligungsworkshop fand am 27.05.2019 in Andechs bei der Andechser Molkerei Scheitz statt. Teilgenommen haben Energie-, Umwelt und Nachhaltigkeitsmanagement der Andechser Molkerei Scheitz, Vertrieb Geschäftskunden der Stadtwerke München, Netzbau Penzberg und Kommunen und Kooperation von Bayernwerk Netz, sowie das Projektteam um BlueMilk des InES.

Das Treffen beinhaltete folgende Agenda:

1. Vorstellungsrunde der anwesenden TeilnehmerInnen
2. Projektvorstellung BlueMilk (InES, AMS)
3. Energiestrategie der Kommune (Landratsamt Starnberg) (entfallen)
4. Preis- und Geschäftsmodelle des aktuellen Energieversorgers (SWM)
5. Preismodalitäten des Stromnetzbetreibers bezogen auf einen flexiblen auf die EE- Erzeugung fokussierten Strombezug (Bayernwerk Netz)
6. Interaktion zwischen Akteuren

Expertenworkshops als Online-Konferenzen:

Die Expertenworkshops fanden zum Ende der ursprünglich geplanten Projektlaufzeit statt. Diese hatten zwei Ziele: zum einen soll der Wissenstransfer in die Breite gewährleistet werden, zum anderen gemeinsam mit den Teilnehmern das Übertragungspotenzial aus praktischer Sicht erarbeitet werden. Aufgrund der Corona-Pandemie wurden Workshops im Gegensatz zur ursprünglichen Planung als Online-Konferenzen durchgeführt. Die Durchführung der Online-Konferenzen erfolgte durch den Medienpartner DLG.

BlueMilk – Mehr Energieeffizienz und Flexibilität in der Milchindustrie

Die erste Online-Konferenz fand am 29.10.2020 und diente vor allem dazu Forschungsansätze und erste Zwischenergebnisse einem Fachpublikum zu präsentieren und mit diesem zu diskutieren.

Die wichtigsten Punkte der Agenda:

- 10:00: Begrüßung und Einführung
- 10:15: Auswirkung der Energiewende auf das Energieversorgungssystem (Prof. Holzhammer, InES)
- 10:35: Effiziente Energieversorgung – Praxisbeispiel: Aktuelle Modernisierungsaktivitäten bei Andechser Molkerei Scheitz (Hr. Scheuermeyer, Andechser Molkerei Scheitz)
- 11:05: Systemeffizienz – Potentialanalyse unter aktuellen und zukünftig möglichen regulatorischen Rahmenbedingungen bei mittelständischen Lebensmittelbetrieben (Hr. Selleneit, InES)
- 13:00: Flexibilität – aktuelle Rolle bei der Planung von Energieversorgungslösungen (Hr. König, AGO GmbH Energie + Anlagen)
- 13:30: Innovative Effizienzmaßnahmen – Biogasverwertung aus Reststoffen und Wärmerückgewinnung (Hr. Nisseler, Zott)

- 14:00: Systemeffizienz – Methodenentwicklung zur Identifikation von Systemeffizienzpotentialen der Reinigungsanlagen in industriellen Betrieben (Hr. Stöckl, InES)
- 15:00: Zusammenfassung und Schlusswort (Prof. Holzhammer, InES)

BlueMilk - Energiewende gestalten: Herausforderungen – Strategien – Umsetzung

Der zweite Expertenworkshop (durchgeführt als Online-Konferenz) fand am 22. September 2021 statt. Der Workshop diente dazu auf bisherige Herausforderungen aus dem Projekt hinzuweisen und wie diese Herausforderungen angegangen werden können. Ein besonderer Fokus lag auf dem Erfahrungsaustausch nach den jeweiligen Präsentationen.

Die wichtigsten Punkte der Agenda:

- 10:00 Begrüßung und Technik-Check
- 10:15: Warum BlueMilk? – Einordnung in die Energiewende (Prof. Holzhammer, InES)
- 10:25: Herausforderungen und Lösungen bei der Datenerhebung zur Erstellung von systemeffizienten Konzepten für Molkereien anhand von Beispielen aus dem Projekt BlueMilk (Hr. Selleneit und Hr. Stöckl, beide InES)
- 10:45: Erfahrungsaustausch 1: Werden im Rahmen von Flexibilisierungsmaßnahmen neue Anforderungen an die Datenerhebung gestellt?
- 11:10: Modellierung flexibler Sektorenkopplungsanlagen zur systemeffizienten Energieversorgung von lebensmittelverarbeitenden Betrieben (Hr. Selleneit, InES)
- 11:50: Erfahrungsaustausch 2: Welche Anlagenkonzepte zur Energieversorgung werden an Bedeutung gewinnen? (Hr. Selleneit, InES)
- 12:10: Hemmnisse und Lösungen bei der flexiblen Fahrweise eines Hochregallagers zur Kühlung von Molkereierzeugnissen (Fr. d'Harcourt Rowold, InES)
- 12:30: Erfahrungsaustausch 3: Lebensmittelsicherheit vs. Treibhausgasminderung – Wie passt das zusammen?
- 12:50: Zusammenfassung und Schlussworte (Prof. Holzhammer, InES)

Ergebnis- und Abschlusspräsentationen:

Die Online-Konferenzen zur Präsentation von Ergebnissen aus Forschungsvorhaben hat sich während der Corona-Pandemie als effizient bewiesen. Daher wurden auch die beiden Präsentationen der Projektergebnisse online durchgeführt.

BlueMilk Ergebnispräsentationen

Die erste Online-Konferenz zur Vorstellung der bis dahin erzielten Ergebnisse fand am 14.12.2021 statt.

Die wichtigsten Punkte der Agenda:

- 13:00: Einführung
- 13:15: Lebensmittelindustrie als Akteure in der Energiewende: Hintergrund und Methodik zur Anwendung der Systemeffizienz (Prof. Holzhammer, InES)
- 13:35: Flexibilisierung durch Sektorenkopplung bei der Eigenenergieerzeugung – Transformationskonzepte: Fallbeispiel Molkereibetrieb (Hr. Selleneit, InES)
- 14:45: Energieeffizienz- und CO₂-Minderungspotentiale von Wärmeverbraucher Reinigungsanlagen in Molkereien (Hr. Stöckl, InES)
- 15:45: Emissions- und Kosteneinsparpotentiale durch Flexibilisierung von Kühllasten bei der Lagerung von Molkereierzeugnissen (Hr. Gaugenrieder, Zott und Fr. d'Harcourt Rowold, InES)

- 16:35: Abschließende Schlussfolgerung zur Systemeffizienz in Molkereien (Prof. Holzhammer, InES)

Verbundprojekt BlueMilk: Abschlusspräsentationen: Lebensmittelindustrie im Transformationsprozess: Mit Flexibilisierung zu mehr Erneuerbaren Energien

Die zweite Online-Konferenz zur Vorstellung der weiteren Ergebnisse fand am 31.01.2023 statt. Dies stellt gleichzeitig den Projektabschluss dar.

Die wichtigsten Punkte der Agenda:

- 10:05: Lebensmittelindustrie als Akteure in der Energiewende: Hintergrund und Methodik zur Anwendung der Systemeffizienz (Prof. Holzhammer, InES)
- 10:20: Flexibilisierung durch Sektorenkopplung und BHKW-Anlagen - Konzeptstudien in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen am Fallbeispiel Molkereibetrieb (Hr. Selleneit, InES)
- 11:05: Emissions- und Kosteneinsparpotentiale durch Flexibilisierung von Kühllasten in der gesamten Kühlkette von Molkereierzeugnissen (Hr. Stöckl, InES)
- 11:50: Schlussfolgerung zur Systemeffizienz in Molkereien (Prof. Holzhammer, InES)

Präsentationen auf externen Veranstaltungen:

Das Projektteam wurde zu Veranstaltungen aus dem Umfeld Molkereien und Lebensmittelherstellung eingeladen, um über das Projekt BlueMilk zu berichten. An folgenden Veranstaltungen wurde teilgenommen und zum Projekt berichtet:

19. Sitzung DLG-Ausschuss Milchtechnologie

Der DLG-Ausschuss zu Milchtechnologie fand am 21. Oktober 2020 von 10:00-12:30 Online in einer Skype-Konferenz statt. Es wurde seitens des InES die Präsentation „Forschungsprojekt BlueMilk – Energieeffizienz in der Milchindustrie“ durch Hr. Stöckl gehalten.

Dialogforum Verarbeitung im Rahmen der Nationalen Strategie zur Reduzierung der Lebensmittelverschwendung: Runder Tisch Molkerei

Das Dialogforum Verarbeitung: Runder Tisch Molkerei fand am 30. Juni 2022 online statt. Es wurde seitens des InES die Präsentation „Flexibilisierung von Kühlhäusern zur Emissionseinsparung der gesamten Kühlkette – auch ein Beitrag gegen Lebensmittelverluste?“ durch Hr. Stöckl gehalten.

Sitzung der AG Umwelt des Milchindustrieverbands

Am 20. September 2022 fand vom 08:30 bis 14:00 in Berlin eine Sitzung der Arbeitsgruppe Umwelt des Milchindustrieverbands statt. Durch das InES (Hr. Stöckl) wurde die Präsentation „BlueMilk“ - Mehr Energieeffizienz und Flexibilität in der Milchindustrie“ gehalten.

Veröffentlichungen mit den Medienpartnern:

Neben den wissenschaftlichen Veröffentlichungen, den Vorträgen auf wissenschaftlichen Konferenzen, Online-Konferenzen und weiteren Veranstaltungen wurde zusammen mit den Medienpartnern DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft) und dmz (Deutsche Molkerei Zeitung) weitere Veröffentlichungen in Branchenzeitschriften platziert. Die folgende Auflistung beinhaltet diese:

- Höherer Einsatz von erneuerbaren Energien in der Milchindustrie (dmz 04/2019)
- BlueMilk: Mehr Energieeffizienz und Flexibilität in der Milchindustrie (dmz 20/2020)
- Mit Fokus auf Systemeffizienz (Lebensmitteltechnik 12/2020)
- BlueMilk: Neue Wege zur Energiewende (DLG-Lebensmittel 01/2021)

- BlueMilk: Neue Wege zur Energiewende (dmz 02/2021)
- Auf der Suche nach Systemeffizienz (DLG-Lebensmittel 06/2021)
- Molkereien setzen Energiewende um (dmz 21/2021)
- Die Suche nach Systemeffizienz (Lebensmitteltechnik Online, 27. Oktober 2021)
- Die energieflexible Molkerei als Treiber der Energiewende (Food-Lab 02/2022, kein Medienpartner des Projekts)
- BlueMilk – Abschlussworkshop (dmz 08/2023) und „Energiewende als Chance begreifen“ (Interview mit Prof. Holzhammer, Hr. Selleneit, Hr. Stöckl (alle InES), Hr. Gaugenrieder (Zott), Hr. Scheuermeyer (Andechser Molkerei Scheitz))

8.3 Studentische Arbeiten

Im Rahmen des Forschungsprojekts „BlueMilk“ sind mehrere Bachelorarbeiten (BA) und Masterarbeiten (MA) entstanden. Die gesamten Abschlussarbeiten können beim Projektleiter angefragt und/oder ggf. in der Bibliothek der Technische Hochschule Ingolstadt ausgeliehen werden, sofern kein Sperrvermerk vorhanden ist. Weiterhin waren Studierende als studentische Hilfskräfte (SHK) eingestellt umso die Arbeiten der wissenschaftlichen Mitarbeiter zu unterstützen. Die Arbeiten der SHK finden hier keine explizite Erwähnung, stellten jedoch ebenso eine unverzichtbare Hilfe für das Projekt dar.

Abschlussarbeiten:

- BA: *„Effiziente Integration von erneuerbarem Strom in den Wärmesektor durch einen flexiblen Einsatz von Großwärmepumpen - eine Analyse technischer und ökonomischer Einflussgrößen“* (Stiglmaier 2020)
- BA: *„Techno-ökonomische Analyse unterschiedlicher Betriebsweisen von Erdgas-BHKW-Anlagen im Kontext der Energiewende anhand eines Beispielbetriebes“* (Steinhart 2020)
- MA: *„Bewertung des systemeffizienten Betriebs von Energiewandlungsanlagen im Hinblick auf CO₂-Emissionen und Energiekosten“* (Rembold 2020)
- BA: *„Untersuchung statistischer Zusammenhänge innerhalb des deutschen Stromnetzes in Bezug auf den Strompreis und erneuerbarer Energien“* (Fuchs 2021)
- MA: *“National and European Emission Trading Systems. Selection of Methods for the Modeling of Price Changes and Investigation of the Influence of Emission Trading on the German Electricity Market and the Electricity Mix”* (Fotina 2021)
- BA: *„Power2Cool – Flexibilisierung von Kühlprozessen in der Lebensmittelindustrie unter Berücksichtigung der Effizienz mit Schwerpunkt auf Eiswasserspeicher“* (Tröstler 2021)
- BA: *„Techno-ökonomische Analyse von flexiblen Energieversorgungssystemen am Beispiel einer Großmolkerei“* (Bartenstein 2022)
- MA: *„Optimierung der systemeffizienten Betriebsweise einer Kälteanlage zur Lagerung von Molkereierzeugnissen hinsichtlich der Treibhausgasminderung“* (Rowold 2023)

Projektarbeit:

„Simulation und Analyse des Energiebedarfs des Kältesystems im Kühltransport von Molkereierzeugnissen“ (Idda 2023)

9 Literaturverzeichnis

AGO GmbH Energie+Anlagen: Herstellerangabe. persönlichem Gespräch an Volker Selleneit.

Agora Energiewende: Agorameter. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/service/agorameter>.

Agora Energiewende (2022): Agorameter.

ASUE Arbeitskreis Brennstoffzellen/BHKW; Klein, Carmen; Rozanski Kostja; Gailfuß, Markus; Kukuk, Jürgen; Beck, Thomas (2014): BHKW-Kenndaten 2014/2015. ASUE.

Baehr, Hans Dieter; Stephan, Karl (2011): Heat and Mass Transfer. With many worked examples and exercises. 3., rev. ed. Berlin: Springer.

Bartenstein, Adam (2022): Techno-ökonomische Analyse von flexiblen Energieversorgungssystemen am Beispiel einer Großmolkerei. Hochschule Konstanz-Technik, Wirtschaft und Gestaltung.

BDEW Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V. (2022): BDEW-Strompreisanalyse Januar 2022. Haushalte und Industrie. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/220124_BDEW-Strompreisanalyse_Januar_2022_24.01.2022_final.pdf, zuletzt geprüft am 21.08.2023.

Beer, M. (2011): KWK als Stromspeicher. Vortrag am energiewirtschaftlichen Seminar des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München, 25.07.2011.

BITO-Lagertechnik Bittmann GmbH: So lagern Sie Lebensmittel richtig: Hygienische Nahrungsmittel- und Kühllager. Online verfügbar unter <https://www.bitto.com/de-de/fachwissen/artikel/so-lagern-sie-lebensmittel-richtig-hygienische-nahrungsmittel-und-kuehllager/>, zuletzt geprüft am 05.09.2023.

VDI-Richtlinie 2067, 09.2012: Blatt 1 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung.

Böckh, Peter von; Wetzel, Thomas (2015): Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis. 6., aktualisierte und ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Lehrbuch).

Bollhöfer, Matthias; Mehrmann, Volker (2004): Numerische Mathematik. Eine projektorientierte Einführung für Ingenieure, Mathematiker und Naturwissenschaftler. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg (Vieweg Studium Grundkurs Mathematik).

Britta Kleinertz; Dr. Christoph Pellinger; Dr. Serafin von Roon; Tobias Hübner (2018): EU Displacement Mix. A Simplified Marginal Method to Determine Environmental Factors for Technologies Coupling Heat and Power in the European Union. The Research Center for Energy Economics (Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.) (FfE).

CIREN 2020 Berlin Workshop Poster Session (2020).

Deutscher Wetterdienst (2017): Testreferenzjahre (TRY). Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html>, zuletzt geprüft am 21.08.2023.

Dotzauer, Martin; Pfeiffer, Diana; Lauer, Markus; Pohl, Marcel; Mauky, Eric; Bär, Katharina et al. (2019): How to measure flexibility – Performance indicators for demand driven power generation from biogas plants. In: *Renewable Energy* 134, S. 135–146. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.021.

EEX (2023): Environmentals market data. Online verfügbar unter <https://www.eex.com/en/market-data/environmentals>, zuletzt geprüft am 22.08.2023.

Eller, Dominik (2015): Integration erneuerbarer Energien mit Power-to-Heat in Deutschland. Potentiale zur Nutzung von Stromüberschüssen in Fernwärmenetzen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (BestMasters).

Fahrmeir, Ludwig; Heumann, Christian; Künstler, Rita; Pigeot, Iris; Tutz, Gerhard (2016): Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. 8., überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Springer-Lehrbuch).

Fotina, Nataliya (2021): National and European Emission Trading Systems. Selection of Methods for the Modeling of Price Changes and Investigation of the Influence of Emission Trading on the German Electricity Market and the Electricity Mix. Masterarbeit. Technische Hochschule Ingolstadt.

Fuchs, Daniel (2021): Untersuchung statistischer Zusammenhänge innerhalb des deutschen Stromnetzes in Bezug auf den Strompreis und Erneuerbarer Energien. Bachelorarbeit. Technische Hochschule Ingolstadt.

Idda, Johannes (2023): Simulation und Analyse des Energiebedarfs des Kältesystems im Kühltransport von Molkereierzeugnissen. Projektarbeit. Technische Hochschule Ingolstadt.

DIN 10508, 03.2022: Lebensmittelhygiene – Temperaturen für Lebensmittel.

Next Kraftwerke: Was ist die Sektorkopplung?, zuletzt geprüft am 30.08.2023.

Pfeifroth, P.; Beer, M. (2023): Primärenergetische Bewertung von Fernwärme aus KWK. Hg. v. FfE, zuletzt geprüft am 31.08.2023.

Rembold, Simon (2020): Bewertung des systemeffizienten Betriebs von Energiewandlungsanlagen im Hinblick auf CO₂-Emissionen und Energiekosten. Masterarbeit. Technische Hochschule Ingolstadt.

Rowold, Michelle (2023): Optimierung der systemeffizienten Betriebsweise einer Kälteanlage zur Lagerung von Molkereierzeugnissen hinsichtlich der Treibhausgasminderung. Masterarbeit. Fachhochschule Burgenland.

Schlosser, Florian; Wiebe, Heinrich; Walmsley, Timothy G.; Atkins, Martin J.; Walmsley, Michael R. W.; Hesselbach, Jens (2021): Heat Pump Bridge Analysis Using the Modified Energy Transfer Diagram. In: *Energies* 14 (1), S. 137. DOI: 10.3390/en14010137.

Schulz, Wolfgang; Brandstät, Christine (2013): Flexibilitätsreserven aus dem Wärmemarkt. Bochum: Ponte Press. Online verfügbar unter http://digitool.hbz-nrw.de:1801/webclient/DeliveryManager?pid=5746267&custom_att_2=simple_viewer.

Selleneit, Volker; Mast, Tanja; Holzhammer, Uwe (2020a): Method to describe and rate the ability to provide flexibility of residual power providers in electricity grids with a high share of variable renewable energies. In: *CIREN - Open Access Proceedings Journal* 2020 (1), S. 154–157. DOI: 10.1049/oap-cired.2021.0294.

Selleneit, Volker; Mast, Tanja; Holzhammer, Uwe (2020b): Method to Describe and Rate the Ability to Provide Flexibility of Residual Power Providers in Electricity Grids with a High Share of Variable Renewable Energies. In: CIREN 2020 Berlin Workshop Poster Session.

Selleneit, Volker; Stöckl, Martin; Holzhammer, Uwe (2019a): BlueMilk – Höherer Einsatz von Erneuerbaren Energien in der Milchindustrie durch Systemeffizienz. In: Wissenschaftstagung Die große Transformation (2019).

Selleneit, Volker; Stöckl, Martin; Holzhammer, Uwe (2020c): BlueMilk – Kaskadierte und flexible Nutzung von thermischer Energie in milchverarbeitenden Betrieben mit Schwerpunkt auf die Steigerung der Energieeffizienz von Reinigungssystemen (FKZ: 281A103616). In: Innovationstage 2020. Für eine starke Landwirtschaft und sichere Ernährung, 20. und 21. Oktober 2020. BLE. Online verfügbar unter <https://www.innovationstage-digital.de/fachsektionen/ressourcenschonende-lebensmittelherstellung/energieeffizienz-von-reinigungssystemen/>.

Selleneit, Volker; Stöckl, Martin; Holzhammer, Uwe (2020d): BlueMilk: Preparation of dairy processing for modified energy systems within the energy transition towards renewables. Implementation by energy efficiency measures and use of flexibility of electrical components (FKZ: 281A103616). In: Energieeffizienz in der Industrie: Prozesse, erneuerbare Energien und Abwärmenutzung, 30. September. DFBEW. Online verfügbar unter https://energie-fr.de.eu/de/veranstaltungen/leser/posterausstellung-zu-energieeffizienzprojekten-in-der-industrie.html?file=files/ofaenr/02-conferences/2020/200929_Energieeffizienz_Industrie/Poster/6_Technische_Hochschule_Ingolstadt_DFBEW_OFATE.pdf, zuletzt geprüft am 03.12.2020.

Selleneit, Volker; Stöckl, Martin; Holzhammer, Uwe (2020e): System efficiency – Methodology for rating of industrial utilities in electricity grids with a high share of variable renewable energies – A first approach. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 130, S. 109969. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109969.

Selleneit, Volker; Stöckl, Martin; Philipp, Matthias; Mast, Tanja; Holzhammer, Uwe; Schlosser, Florian (2019b): System Efficiency Rating of Industrial Utilities in Electricity Grids with a high share of Variable Renewable Energies. In: *Chemical Engineering Transactions* (76), S. 973–978. DOI: 10.3303/CET1976163.

Statista Research Department (2023): Durchschnittlicher Preis für Dieselkraftstoff in Deutschland in den Jahren 1950 bis 2023 (Cent pro Liter). Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuer-dieselmkraftstoff-seit-dem-jahr-1950/>, zuletzt geprüft am 21.08.2023.

Steidle, Susanne (2018): Optimierung der Gesamteffizienz eines Kühltunnelsystems. Bachelorarbeit. Technische Hochschule Nürnberg.

Steinhart, Marcel (2020): Techno-ökonomische Analyse unterschiedlicher Betriebsweisen von Erdgas-BHKW-Anlagen im Kontext der Energiewende anhand eines Beispielbetriebes. Bachelorarbeit. Technische Hochschule Ingolstadt.

Stiglmaier, Luis (2020): Effiziente Integration von erneuerbarem Strom in den Wärmesektor durch einen flexiblen Einsatz von Großwärmepumpen - eine Analyse technischer und ökonomischer Einflussgrößen. Bachelorarbeit. Technische Hochschule Ingolstadt.

Stöckl, Martin; Selleneit, Volker; Philipp, Matthias; Holzhammer, Uwe (2019): An Approach to Calculate Electricity Costs for the German Industry for a System Efficient Design by Combining Energy Efficiency and Demand Response. In: *Chemical Engineering Transactions* (76), S. 1141–1146. DOI: 10.3303/CET1976191.

Tröstler, Andreas (2021): Power2Cool - Flexibilisierung von Kühlprozessen in der Lebensmittelindustrie unter Berücksichtigung der Effizienz mit Schwerpunkt auf Eiswasserspeicher. Bachelorarbeit. Technische Hochschule Ingolstadt.

TÜV SÜD Industrie Service GmbH (2020): Was bedeutet ATP? Online verfügbar unter <https://www.tuvsud.com/-/media/de/industry-service/pdf/broschueren-und-flyer/is/real-estate/technische-gebaeudeausruestung-und-aufzuege/>, zuletzt geprüft am 21.08.2023.

Uwe Abraham Holzhammer (2015): Biogas in einer zukünftigen Energieversorgungsstruktur mit hohen Anteilen fluktuierender Erneuerbarer Energien. Dissertation. Universität Rostock.

Wolf, Stefan (2026): Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme. Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung. Dissertation. Universität Stuttgart.