

CUTEC

Informationen
Ressourcen
Energie

Bruno Gelato GmbH
Schumacherstraße 26
D-26817 Rhaderfehn



Untersuchung von Möglichkeiten zur Optimierung des Energieverbrauchs und -managements bei der Lebensmittelherstellung am Beispiel einer Speiseeis-Fabrik

Abschlussbericht über eine Studie,
gefördert unter dem Az: 30910 von der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt



von

Bruno Gelato GmbH

Bruno Lucchetta
Stefano Lucchetta
Peter Flügge

CUTEC Institut GmbH

Oliver Keich
Dr. Andreas Lindermeir
Dr. Bernd Benker

März 2015

Herausgeber und Bezugsmöglichkeit

Bruno Gelato GmbH
Schumacherstraße 26
D-26817 Rhauderfehn
Tel.: + 49 4952 95299-0
Fax.: + 49 4952 95299-20
Internet: www.brunogelato.de
E-Mail: info@brunogelato.de

CUTEC-Institut GmbH
Leibnizstraße 21+23
D-38678 Clausthal-Zellerfeld
Tel.: + 49 5323 933-0
Fax.: + 49 5323 933-100
Internet: www.cutec.de
E-Mail: cutec@cutec.de

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	30910	Referat	24	Fördersumme	84.616,-€
Antragstitel		Untersuchung von Möglichkeiten zur Optimierung des Energieverbrauchs und –managements bei der Lebensmittelherstellung am Beispiel einer Speiseeis-Fabrik			
Stichworte					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
15 Monate	15.09.2013	14.12.2014	1/1		
Zwischenberichte	Kurzbericht, Januar 2014				
Bewilligungsempfänger		Bruno Gelato GmbH		Tel	04952
		Schumacherstr. 26			95299 10
		26817 Rhauderfehn		Fax	04952
					95299 10
				Projektleitung	
				Peter Flügge	
				Bearbeiter	
				Peter Flügge	
Kooperationspartner		Clausthaler Umwelttechnik Institut GmbH (CUTEC)			
		Leibnizstr. 21 + 23			
		38678 Clausthal-Zellerfeld			

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens soll am Beispiel einer Speiseeisfabrik untersucht werden, wie der Verbrauch an Strom, Erdgas und tiefkalt verflüssigten Stickstoff reduziert werden kann, um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern und eine Reduzierung der produktionsbedingten CO₂-Emissionen zu erreichen. Neben Maßnahmen zur Energieeinsparung soll darüber hinaus geprüft werden, ob bzw. wie zukünftig ein Teil der Energieversorgung des Unternehmens auf Basis regenerativer Energieformen umgestellt werden kann. Durch die Umsetzung der geplanten Maßnahmen werden erhebliche positive Auswirkungen auf die Umwelt erwartet. Eine Verringerung des Energieverbrauchs ist neben den rein wirtschaftlichen Vorteilen auch unter Umweltaspekten wünschenswert, da damit eine Verringerung der spezifischen CO₂-Emissionen einhergeht. Werden neben den reinen Effizienzsteigerungsmaßnahmen zusätzlich auch erneuerbare Energieträger in das Energieversorgungskonzept integriert, kann eine weitere Reduktion an klimaschädlichen Gasen erreicht werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Als Grundlage für die verfahrenstechnische Optimierung wurden die Verbrauchswerte ermittelt und in einem einfachen physikalischen Model verglichen. Auf diese Weise ließ sich das Optimierungspotenzial von Einzelprozessen erkennen. Hinweise auf Verbesserungsmöglichkeiten bei der Kopplung von Wärmeströmen lieferte eine „Pinch-Analyse“, bei der warme und kalte Ströme erfasst und in einem Diagramm gegenübergestellt werden. Die zeitaufgelösten Verbrauchsdaten wurden verwendet, um die Effizienz von alternativen Formen der Energieerzeugung zu ermitteln, insbesondere im Fall der Photovoltaik.

Die zurzeit praktizierte Verwendung von flüssigem Stickstoff zum Schockgefrieren wurde kritisch geprüft. In diesem Zusammenhang wurde auch - über den Stand der Technik hinaus - der Einsatz von Kryotechnik zur Energiespeicherung betrachtet.

Der finanzielle Kosten und Nutzen der Maßnahme wurde ebenso abgeschätzt wie die Minderung der CO₂-Emissionen.

Ergebnisse und Diskussion

Die Gegenüberstellung von Heiz- und Kühlbedarfs zeigte deutlich Einsparungsmöglichkeiten durch Wärmetausch an. Da die Produktion als Batchprozess erfolgt, muss die Wärme zwischengespeichert werden. In gleicher Weise lässt sich auch der CIP-Reinigungsprozess verbessern.

Als Verbesserungsvorschlag für die Energiebereitstellung wurden schwerpunktmäßig ein erdgasbetriebenes BHKW und eine Photovoltaik-Anlage ausgelegt. Da die elektrische Energie in hohem Maße zur Kälteerzeugung mittels Kompressoren dient, wurde nicht nur die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sondern auch die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) berücksichtigt.

Erwartungsgemäß haben aufgrund ihrer einfachen Bauweise Wärmetauscher und -speicher das höchste kostenspezifische CO₂-Einsparpotenzial (CO₂/Euro). Ein deutlich höheres CO₂-Einsparpotenzial in absoluten Zahlen hat die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, noch übertroffen durch die Kombination von Wärmeaustauscher/-speicher plus BHKW und PV. Als wirtschaftlich und technisch umsetzbare Lösung empfehlen sich ein stromoptimiertes BHKW sowie Wärmetauscher/-speicher in der Produktions- und Reinigungsanlage.

Eine Kompressionskältemaschine als Ersatz für die Verwendung von flüssigem Stickstoff ist thermodynamisch und energetisch vorteilhaft, amortisiert sich aber bei dem betrachteten KMU aufgrund der hohen Investitionskosten nicht. Die ursprünglich angedachte Energiespeicherung mittels flüssigem Stickstoff entfällt aus dem gleichen Grund.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse wurde bisher intensiv mit dem KMU diskutiert unter Einbeziehung der Geschäftsführung sowie allen Mitarbeitern aus dem technischen und kaufmännischen Bereich. Es ist davon auszugehen, dass die vorgeschlagenen Maßnahmen umgehend umgesetzt werden.

Eine erste Veröffentlichung soll in der „Chemie Ingenieur Technik“ erfolgen, weitere Beiträge in entsprechenden Branchen-Journalen sind vorgesehen.

Da innovative Ergebnisse des Projektes eher für größere Betriebe interessant sind, wird eine zweite Veröffentlichung vorbereitet, die sich mit den Randbedingungen beschäftigt, unter denen die lokale Produktion von Kälte für das Schockgefrieren vorteilhaft ist.

Fazit

Als Ergebnis dieses Projektes wurde für das KMU eine Reihe von Optimierungsmöglichkeiten erarbeitet und in einem Fall bereits umgesetzt. Die unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte verbleibenden Vorschläge haben eher konservativen Charakter. Innovative Kryotechnologie mit ihren hohen Investitionskosten scheitern im konkreten Fall an der kleinen Betriebsgröße und an der Teilauslastung (Produktionspause im Winter, kein 3-Schicht-Betrieb).

Das angewendete Berechnungsverfahren lässt sich leicht auf andere Fälle anpassen, einschließlich Produktionserweiterungen und veränderter Preisstrukturen bei den Energieträgern. Es kann mit entsprechenden Anpassungen auch für andere Betriebe verwendet werden.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt £ An der Bornau 2 £ 49090 Osnabrück £ Tel 0541/9633-0 £ Fax 0541/9633-190 £

<http://www.dbu.de>

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	3
Zusammenfassung	9
1 Einleitung	11
2 Ist-Zustand	12
2.1 Prozesskette	12
2.2 Stromverbrauch	13
2.3 Erdgasverbrauch	14
2.4 Stickstoffverbrauch	16
2.5 CO ₂ -Äquivalente	17
2.6 Energiekosten	17
2.7 Zusammenfassender Vergleich der Energieträger	18
3 Optimierung	18
3.1 Analyse des Gesamtprozesses	19
3.1.1 Spezifische elektrische Energie	19
3.1.2 Pinch-Analyse zur Optimierung des Wärmeaustauschpotenzials.....	21
3.2 Funktion und Optimierungspotenziale der Einzelapparate	22
3.2.1 Mixer und Kochanlage	22
3.2.2 Eismaschinen.....	24
3.2.3 Stickstofftunnel.....	24
3.2.4 Spiralkühler	25
3.2.5 Kühllager	25
4 Nutzung alternativer Energiequellen zur Energieversorgung	27
4.1 Windkraft.....	27
4.2 Photovoltaik	27
4.3 Biogas	29
4.4 Solarthermie.....	29
4.5 Geothermie	29
4.6 Kraft-Wärme-Kopplung	30
4.6.1 Stromgeführtes BHKW.....	31
4.6.2 Wärmegeführtes BHKW.....	31
4.6.3 Stromoptimiertes BHKW	31
4.6.4 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung.....	32
5 Techniken mit gesteigertem Forschungscharakter	32
5.1 Kryogene Speicherung	32
5.2 Einsatz einer Gas-Kältemaschine	33
5.3 Power-to-Gas.....	36
6 Simulation zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung	37
7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	40
8 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	41
8.1 Wärmerückgewinnung	41
8.2 BHKW zur Abdeckung der elektrischen Basislast.....	42
8.3 Photovoltaik	43
8.4 BHKW und Photovoltaik	43
8.5 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung	44
8.6 Kraft-Wärme-Kopplung in Abhängigkeit der Wärmenutzungsoptimierung	45
8.7 Wärmegeführtes BHKW	46
9 Ökologische Bewertung	47
10 Fazit und Empfehlungen für das KMU	48
Literaturverzeichnis	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Abhängigkeit der Kristallgröße von der Gefriertemperatur [Fay01]	12
Abbildung 2:	Prozesskette der Speiseeisherstellung	13
Abbildung 3:	Tagesverlauf Stromverbrauch (15 Minuten-Stromverbrauchswerte) für Produktionstage	13
Abbildung 4:	Tagesverlauf Stromverbrauch (15 Minuten-Stromverbrauchswerte) für Leertage zu unterschiedlichen Jahreszeiten	14
Abbildung 5:	Bestimmung des produktionsabhängigen spezifischen Erdgasverbrauchs	15
Abbildung 6:	Produktionsunabhängiger Erdgasverbrauch (entspricht Heizbedarf) mit rot markierten Ausreißern	16
Abbildung 7:	Zusammenfassender Vergleich der beim KMU eingesetzten Energieträger....	18
Abbildung 8:	Jahresverlauf der spezifischen (auf die produzierte Eismenge bezogenen) elektrischen Arbeit	19
Abbildung 9:	Jahresverläufe der Produktivität	19
Abbildung 10:	Jahresverläufe der Produktivzeit	20
Abbildung 11:	Normierte Produktivzeit (Produktionsstunden pro Tag) mit blau markierten erwünschten und rot markierten unerwünschten Bereichen	20
Abbildung 12:	Normierte Produktivität (produzierte Eismenge pro Zeit) mit blau markierten unvermeidbaren und rot markierten vermeidbaren Streuungen	21
Abbildung 13:	Pinch-Analyse zur Optimierung des Wärmeaustauschpotenzials	22
Abbildung 14:	Integration des Plattenwärmetauscher der Kochanlage	22
Abbildung 15:	Auswirkung der Reduzierung der Mischertemperatur	23
Abbildung 16:	Optimierter Einsatz eines Wärmerekuperators nach der Kochanlage	23
Abbildung 17:	Austrittsbereich des Stickstofftunnels	25
Abbildung 18:	Lamellenvorhang im Tiefkühlager	26
Abbildung 19:	Durchschnittliche Stromproduktion der PV-Anlage für unterschiedliche Stellwinkel	28
Abbildung 20:	Tageszeitabhängige Leistungskurven der PV-Anlage für unterschiedliche Stellwinkel und Monate	29
Abbildung 21:	Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Anlagengröße [ASU11]	30
Abbildung 22:	BHKW mit Wärmespeicher als zentrales Element des Wärmenutzungskonzeptes	31
Abbildung 23:	Kennlinie einer Stirling-Kältemaschinen gemäß Herstellerprospekt [Sti15].....	34
Abbildung 24:	Statische Amortisierungsdauer einer Gaskältemaschine für zwei Szenarien...	36
Abbildung 25:	Eingabemaske des Modells.....	38

Abbildung 26: Vereinfachtes Programmablaufschaema	39
Abbildung 27: Investitionskosten und interner Zinsfuß eines stromoptimierten BHKW.....	42
Abbildung 28: Investitionskosten und interner Zinsfuß einer PV-Anlage	43
Abbildung 29: Investitionskosten und interner Zinsfuß für den gleichzeitigen Betrieb von BHKW und 100 kW _{Peak} -PV	44
Abbildung 30: Amortisierungszeit der KWKK in Abhängigkeit der Gesamtinvestitionskosten	45
Abbildung 31: Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit des BHKW in Abhängigkeit der Prozesswärme-Einsparung	46
Abbildung 32: Amortisierungszeit wärmegeführtes BHKW inkl. Wärmeeinsparung.....	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Ergebnisse	10
Tabelle 2: Spezifischer Wärmeverbrauch.....	15
Tabelle 3: Nutzbare Energie des tiefkalt verflüssigten Stickstoffs	17
Tabelle 4: CO ₂ -Äquivalente aus GEMIS-Datenbank	17
Tabelle 5: Investitionsrechnung Luftschleieranlage.....	26
Tabelle 6: Randbedingungen der betrachteten PV-Anlage.....	28
Tabelle 7: Fallbeispiele für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Gaskältemaschine.....	35
Tabelle 8: Investitionskosten und Einsparpotenzial an Prozesswärme	41
Tabelle 9: Kostenaufstellung BHKW.....	42
Tabelle 10: Zusammenfassung der Maßnahmen mit ökologischer Bewertung.....	47

Begriffe, Abkürzungen und Definitionen

A	Investitionsauszahlung
Base	Flüssige Eismischung
BHKW	Blockheizkraftwerk
CIP	Cleaning-In-Place-Anlage (Reinigungsanlage)
C_o	Kapitalwert
i	Kalkulationszinssatz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
kW_{Peak}	Nennleistung einer Photovoltaikanlage unter Standard-Testbedingungen
Leertag	Tage, an denen keine Produktion stattfand
$N_{2,fl}$	Flüssiger, tiefkalter Stickstoff
Normiert	Auf das jeweilige Maximum bezogen
Produktivität	Hergestellte Eismenge pro Produktionszeit in Hektoliter pro Stunde/Tag
Produktivzeit	Produktionsstunden pro Arbeitstag
PV	Photovoltaik
\dot{Q}_0	Kälteleistung
R_n	Resterlös am Ende der Nutzungsdauer
Spezifische elektrische Arbeit	Die auf die Produktionsmenge bezogene elektr. Arbeit
τ	Betrachtungszeitraum
T_{ein}	Umgebungstemperatur
T_{soll}	Solltemperatur des Kühlmittels
Z	Saldo zwischen Ein- und Auszahlungen

Zusammenfassung

Die Herstellung von Speiseeis ist ein vergleichsweise energieintensiver Prozess, bei dem die kühl angelieferte Milch in einem mehrstufigen Verfahren zunächst auf die Pasteurisierungstemperatur erhitzt und anschließend nach Durchlaufen der Eismaschine tiefgefroren wird. Im Rahmen des Projektes wurde am Beispiel eines mittelständischen Unternehmens untersucht, wie der Energieverbrauch durch verfahrenstechnische Maßnahmen gesenkt werden kann und wie sich der verbleibende Bedarf ökonomisch und ökologisch sinnvoll bereitstellen lässt.

Dazu wurden die Verbrauchswerte der verwendeten Energieträger Erdgas, Strom und Flüssigstickstoff für die letzten drei Jahre aus Versorgerdaten zusammengetragen und durch Auswertung von betriebsinternen Zählern erfasst.

Als Grundlage für die energetische Optimierung wurden die Verbrauchswerte zu zwei typischen Tageslastgangkurven (Tage mit und ohne Produktionstätigkeit) zusammengefasst und in einem verfahrenstechnischen Modell beschrieben. Auf diese Weise ließ sich das Optimierungspotenzial von Einzelprozessen erkennen. Hinweise auf Verbesserungsmöglichkeiten bei der Kopplung von Wärmeströmen lieferte eine „Pinch-Analyse“, bei der warme und kalte Ströme erfasst und in einem Diagramm gegenübergestellt werden. Die zeitaufgelösten Verbrauchsdaten wurden verwendet, um die Effizienz von alternativen Formen der Energieerzeugung zu ermitteln, insbesondere im Fall der Photovoltaik.

Als Einzelmaßnahme wurde die Verwendung von flüssigem Stickstoff (kurz: $N_{2,fl}$) zum Schockgefrieren größerer Verpackungseinheiten kritisch geprüft. In diesem Zusammenhang wurde auch - über den marktüblichen Stand der Technik hinaus - der Einsatz von Kryotechnik zur Energiespeicherung betrachtet. In beiden Fällen zeigt sich, dass der Einsatz von Kompressionskältemaschinen thermodynamisch und energetisch günstig ist, sich aber bei dem betrachteten KMU aufgrund der hohen Investitionskosten nicht in vertretbaren Zeiträumen amortisiert.

Im Gegensatz dazu ergeben sich durch Änderungen im Verfahrensablauf drei auch ökonomisch realisierbare Möglichkeiten für größere Energieeinsparungen. Die erste, bereits während der Projektlaufzeit realisierte Maßnahme, besteht in der Herabsenkung der Mischertemperatur. Durch die Absenkung von 70 °C auf 50 °C wurde eine Reduzierung des produktionsabhängigen Erdgasverbrauchs um 43,2 % pro Jahr ermöglicht. Als zweite Maßnahme wird die Erwärmung der einströmenden kalten Frischmilch durch die für den Pasteurisierungsprozess erhitzte Eisbase empfohlen. Zur zeitlichen Entkopplung der Prozesse ist zum Wärmetauscher lediglich ein weiterer ein Wärmepufferbehälter nötig. Als dritte Verbesserungsmaßnahme wird das gleiche Vorgehen für die aus hygienischen Gründen regelmäßig eingesetzte Anlagenreinigung CIP vorgeschlagen. Insgesamt kann der Energiebedarf für die Wärme- und Kälteerzeugung dadurch um 64 % reduziert werden.

Als Verbesserungsvorschlag für die Energiebereitstellung wurden schwerpunktmäßig ein erdgasbetriebenes BHKW sowie eine Photovoltaik-Anlage ausgelegt. Da im vorliegenden Beispiel die elektrische Energie in hohem Maße zur Kälteerzeugung mittels elektrischer Kompressoren dient, wurden zur Optimierung des ökologischen und ökonomischen Nutzens verschiedene Möglichkeiten zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) berücksichtigt.

Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Ausgewählte Ergebnisse

Maßnahme	Investitions- kosten	Amortisations- zeit [Jahre]	CO ₂ - Einsparung [t CO ₂ /a]	Euro / kg CO ₂
Wärmepufferung (Milch + CIP)	70.000 €	7,1	78,3	0,9
Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung ¹	ca. 200.000 €	3,6	172,4	1,2
Wärmepufferung + Stromoptimiertes BHKW	226.500 €	4,2	139,1	1,6
Wärmepufferung + BHKW + Photovoltaik	350.500 €	5,8	187,8	1,9

¹nicht am Markt verfügbar; Kostenschätzung durch Herabskalieren von Großanlagen

Erwartungsgemäß haben Einsparmaßnahmen durch den Einsatz von Wärmetauschern bzw. Wärmespeichern das höchste kostenspezifische CO₂-Einsparpotenzial (CO₂/Euro). Ein deutlich höheres CO₂-Einsparpotenzial in absoluten Zahlen hat die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, noch übertroffen durch die Kombination von Wärmetauscher/Speicher plus BHKW und PV. Als wirtschaftlich und technisch umsetzbare Lösung empfiehlt sich der Wärmetausch und der Einsatz eines stromoptimierten BHKW.

Als Ergebnis dieses Projektes wurden für das KMU eine Reihe von Optimierungsmöglichkeiten gefunden und in einem Fall bereits umgesetzt. Die unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte verbleibenden Vorschläge haben eher konservativen Charakter. Innovative Technologien mit ihren hohen Investitionskosten scheitern im konkreten Fall an der kleinen Betriebsgröße und an der Teilauslastung (Produktionspause im Winter, kein Dreischicht-Betrieb).

Das entwickelte Berechnungsverfahren lässt sich leicht auf andere Fälle anpassen, einschließlich Produktionserweiterungen und veränderter Preisstrukturen bei den Energieträgern.

Diese Ergebnisse wurden in enger Zusammenarbeit zwischen der Bruno Gelato GmbH und der CUTEC Institut GmbH erarbeitet. Wir bedanken uns für die Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 30910.

1 Einleitung

Das Unternehmen Bruno Gelato GmbH ist ein mittelständischer Familienbetrieb, der hochwertiges Speiseeis herstellt und damit am deutschen Markt als Zulieferer von Eiscafés aber auch für Supermärkte und Discounter sehr erfolgreich ist. Die Produktion ist stark saisonal geprägt und läuft nachfrageorientiert im Ein- oder Zweischicht-Betrieb.

Aufgrund der in den letzten Jahren ständig steigenden Nachfrage wurden die Produktionskapazitäten sukzessive erhöht. Weitere anstehende Erweiterungen im Anlagenpark sollen genutzt werden, um den hohen Verbrauch an Strom, Erdgas und Flüssigstickstoff durch Optimierungsmaßnahmen und Erhöhung der Energieeffizienz zu reduzieren und so eine verbesserte Wirtschaftlichkeit und gleichzeitig eine Reduzierung der umweltrelevanten Emissionen der Produktion zu erreichen.

Neben reinen Maßnahmen zur Energieeinsparung soll darüber hinaus geprüft werden, welche Optionen gegeben sind, um zukünftig einen Teil der Energieversorgung auf regenerative Energieformen umzustellen. Dazu soll im Rahmen dieser Studie im Besonderen untersucht werden, welche Energieeinsparpotenziale bei der vorliegenden Anlagenkonfiguration vorliegen und

- welche Maßnahmen erforderlich sind, um diese umzusetzen,
- inwieweit der Einsatz innovativer und effizienter Verfahren der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung den großen Bedarf an (externer) elektrischer Energie und Kühlenergie der Eisproduktion verringern kann,
- welche Möglichkeiten zur Integration erneuerbarer Energien (z. B. Überschuss-Strom aus der Windenergie und Photovoltaik) bestehen und ob bzw. wie diese perspektivisch umsetzbar sind.

Insgesamt sind Ansätze zu untersuchen, die aus ökologischer Sicht vorteilhaft im Vergleich zum jetzigen Stand sind und gleichzeitig eine Absenkung der Energiekosten und damit eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ermöglichen.

Es soll ermittelt werden, welche Verfahrenskombination am besten geeignet ist, eine Minderung des mittleren Energieverbrauchs und eine Absenkung der Spitzenlast zu erzielen, ohne tiefe Eingriffe in den Produktionsablauf vornehmen zu müssen. Gleichzeitig soll das Energiekonzept eine verstärkte Integration erneuerbarer Energie aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen berücksichtigen, indem Möglichkeiten zur Zwischenspeicherung der fluktuierend anfallenden regenerativen Energie genutzt werden. Als Ergebnisse der Studie sollen Handlungsempfehlungen vorliegen, die dem Firmeninhaber dazu befähigen, eine fundierte Entscheidung über die im Rahmen der Produktionserweiterung zu realisierenden Maßnahmen zu treffen.

In Bezug auf Aufgabenstellung und Lösungsansätze kann die Firma Bruno Gelato GmbH als typisch für die gesamte mittelständisch geprägte Speiseeis-Branche angesehen werden und darüber hinaus für KMU mit gleichzeitigem hohem Bedarf an Kühlleistung, Wärme und elektrischer Leistung. Das Vorhaben besitzt somit Modellcharakter und kann einfach und zeitnah auf viele ähnliche Prozesse und Unternehmen übertragen werden.

Im Prozess der Eiscremeherstellung ist der Produktionsschritt der Tiefkühlung der Schritt der die finale Textur des Eises festlegt. Die Qualität des Produktes und im besonderen dessen glatte Textur wird durch die Verteilung, Größe und Form der Luftbläschen und Eiskristalle beeinflusst [Cai03]. Eiscremes mit kleinen Eiskristallen werden als qualitativ hochwertig empfunden, die Größe der Eiskristalle wird hierbei maßgeblich durch die Gefrieretemperatur beeinflusst, siehe Abbildung 1.

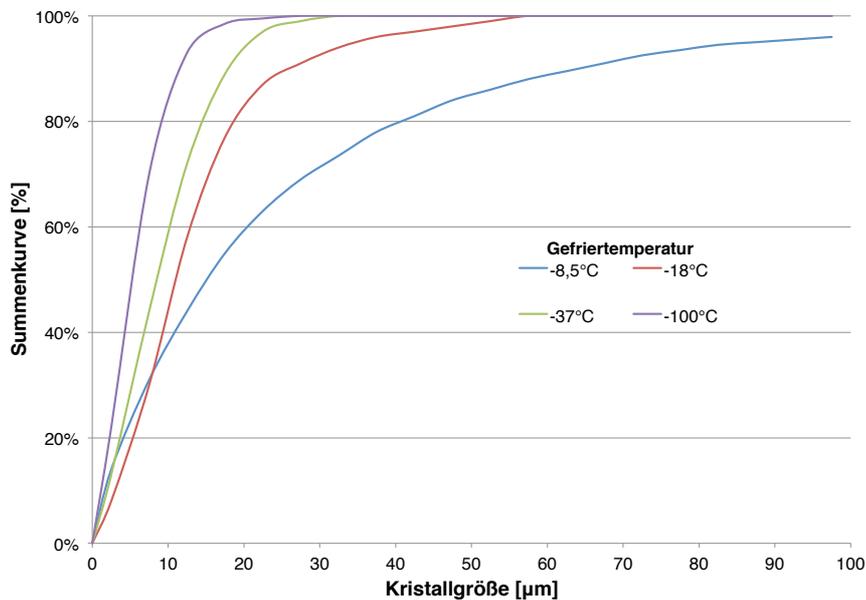


Abbildung 1: Abhängigkeit der Kristallgröße von der Gefriertemperatur [Fay01]

2 Ist-Zustand

2.1 Prozesskette

Die Prozesskette ist in Abbildung 2 dargestellt, zusammen mit den zu dem jeweiligen Apparat gehörenden Ein- und Ausgangstemperaturen und den benötigten Leistungen. Die Produktion des Speiseeises erfolgt in folgenden Anlagen:

- Zutatenlagerung (Milchtanks, Zuckertanks, Tiefkühlager (Zutaten))
- Mischanlage (Mixer, Mischtank)
- Kochanlage (Erhitzer, Homogenisator, Wasserkühler)
- Reifetanks
- Eismaschinen
- Tiefkühlung (Spiralkühler, Stickstofftunnel)
- Verpackungsanlage
- Produktlager

Zur Reinigung und Spülung von Rohren und Behältern wird eine CIP (Cleaning-In-Place)-Anlage genutzt.

Zu diesen direkt für die Produktion benötigten Anlagen kommen noch die Heizung und Klimatisierung der Produktionshalle und der Büroarbeitsplätze als Energieverbraucher hinzu.

Die Milch wird alle zwei Tage angeliefert und in großen Tanks bei etwa 5 °C gelagert. Für einen Ansatz an Milcheismischung (Base) werden etwa 1400 l Milch mit den nötigen Zutaten für 30 min bei 70 °C gemischt. Aus der Mischanlage wird die Base in die Vorlage der Kochanlage gepumpt, in der die Base zum Pasteurisieren auf 85 °C erhitzt und über eine Hochdruck-Zerstäubung homogenisiert wird. Mittels zweistufiger Wasserkühlung wird die Base nachfolgend auf etwa 3 °C gekühlt und bis zum nächsten Tag zum Reifen in Tanks gelagert. Parallel dazu wird die am Vortag angesetzte Base durch fünf Eismaschinen zu Speiseeis gefroren. Die Tiefkühlung erfolgt je nach Packungsgröße in einem mittels flüssigen Stickstoff gekühlten Tun-

nels oder in einem elektrisch gekühlten Spiralkühler. Die fertige Ware wird auf Paletten verpackt und in einem Tiefkühlager bei -25 °C bis zur Warenabholung gelagert.

Sämtliche Anlagen, in denen die Base erwärmt wird, sowie die CIP werden mit Dampf aus einem zentralen erdgasbetriebenen Dampferzeuger geheizt. Die Kühlung für Zutatenlager, Produktlager, Eismaschine und Spiralkühler erfolgt elektrisch mittels Kompressoren. Im Gegensatz dazu wird für das Schockgefrieren größerer Gebinde der Stickstofftunnel genutzt.

Energieeinsatz und die damit verbundenen Kosten sind für die verschiedenen Energieformen in der folgenden Tabelle 2 als Jahreswerte einander gegenübergestellt. In den folgenden Abschnitten wird ihr zeitlicher Verlauf näher betrachtet.

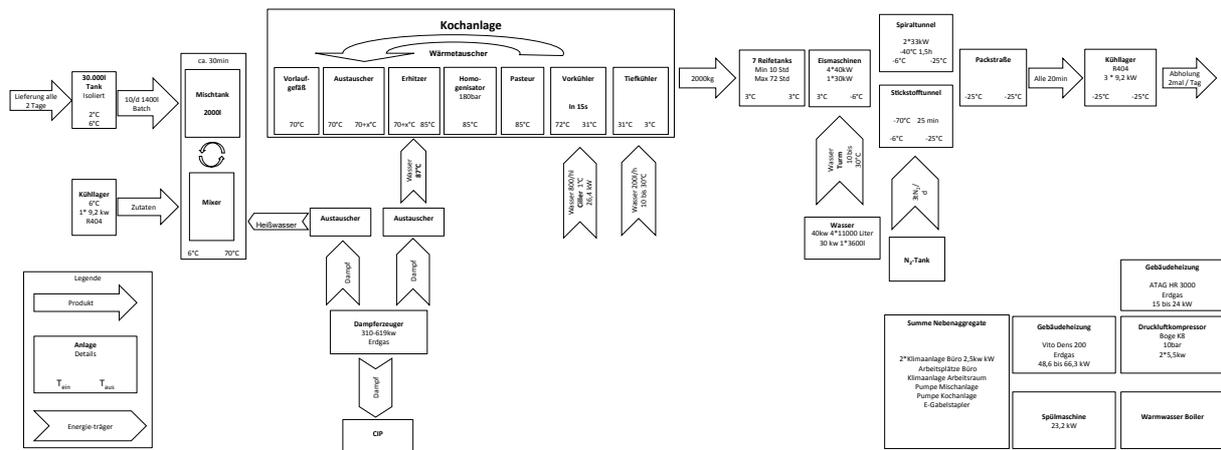


Abbildung 2: Prozesskette der Speiseeisherstellung

2.2 Stromverbrauch

Der Stromverbrauch besteht aus einem produktionsunabhängigen Basisverbrauch, der maßgeblich von den Kühltagern stammt, sowie einem produktionsabhängigen Anteil. Zur Analyse des Lastganges wurden die 15 Minuten-Stromverbrauchswerte für die Jahre 2012, 2013 und 2014 ausgewertet. Aufgrund des Tagesganges dieser Werte lassen sich Feiertage, Tage ohne Produktion (Bürotätigkeit, Reparaturen) und Produktionstage gut unterscheiden.

Trägt man die zeitaufgelösten Mittelwerte an benötigter elektrischer Leistung für die reinen Produktionstage über einen 24-Stunden-Zeitraum auf, so folgt Abbildung 3.

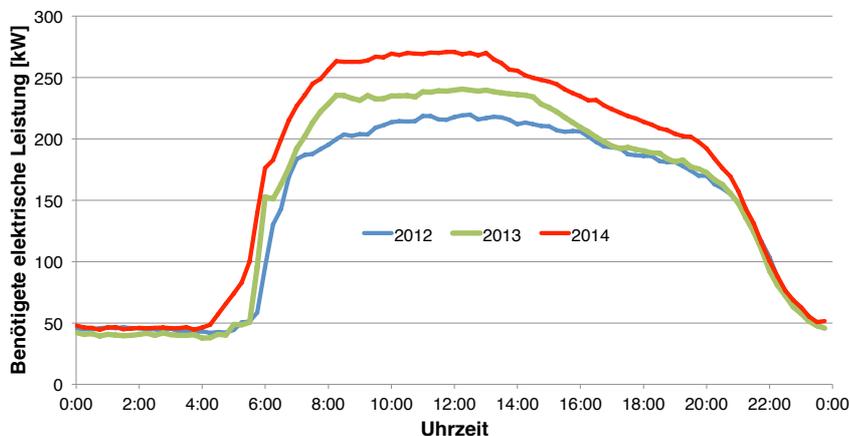


Abbildung 3: Tagesverlauf Stromverbrauch (15 Minuten-Stromverbrauchswerte) für Produktionstage

Der Vergleich der Kurven für die Jahre 2012 bis 2014 lässt deutlich die schon erwähnte stetige Erhöhung der Jahresproduktionsmenge erkennen. Bei weitestgehend unveränderter Produktivzeit stieg die benötigte elektrische Leistung wegen des Zukaufs von Eismaschinen an.

An einem typischen Arbeitstag beginnt nach etwa einer Stunde Vorlaufphase um 7 Uhr die Produktion. Der Stromverbrauch ist dann bis etwa 14 Uhr weitgehend konstant. Das danach erkennbare kontinuierliche Absinken des Verbrauchs rührt daher, dass das Kochen der Basen für den nächsten Tag abgeschlossen ist. Ab etwa 21 Uhr werden die Anlagen wieder heruntergefahren.

An produktionsfreien Tagen (Leertagen) ergibt sich ein über das Jahr gemittelter elektrischer Leistungsbedarf von etwa 40 kW. Dieser entsteht fast ausschließlich durch die Kühlhäuser (5 Kompressoren mit je 9,2 kW elektrischer Leistung). Durch die Wärmeverluste an die Umgebung ist die benötigte Kühlleistung abhängig von der Außenlufttemperatur und damit von der Jahreszeit, wie in Abbildung 4 erkennbar.

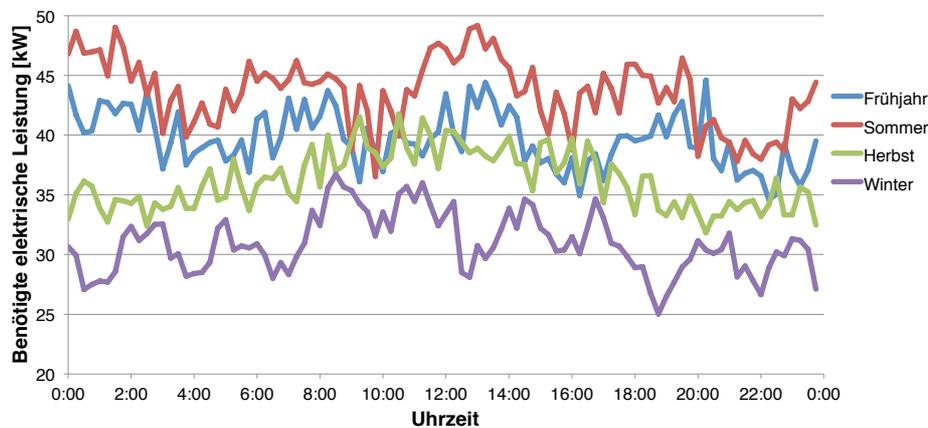


Abbildung 4: Tagesverlauf Stromverbrauch (15 Minuten-Stromverbrauchswerte) für Leertage zu unterschiedlichen Jahreszeiten

2.3 Erdgasverbrauch

Der Gasverbrauch ergibt sich aus dem produktionsunabhängigen Bedarf für die Beheizung der Büroräume, sowie den Verbräuchen des für die Produktion eingesetzten Dampfkessels, der Milcherwärmung sowie der CIP-Anlage. Um den produktionsabhängigen Anteil zu ermitteln wird der Erdgasverbrauch pro produzierten Liter Eis über das Jahr aufgetragen. Da die Gebäudeheizung im Sommer ausgeschaltet blieb kann das Verbrauchsminimum als produktionsabhängiger Anteil des Erdgasverbrauchs angesehen werden.

Für die Jahre 2012 und 2013 ergibt sich für den produktionsabhängigen Erdgasverbrauch ein Wert von ca. $0,08 \text{ kWh}_{\text{Gas}}/\text{l}_{\text{Eis}}$, siehe Abbildung 5. Wie viel Wärme davon für die Eisherstellung benötigt wird, und wie viel des Energiebedarfs aus Wärmeverlusten resultiert, lässt sich über die Wärmekapazitäten abschätzen.

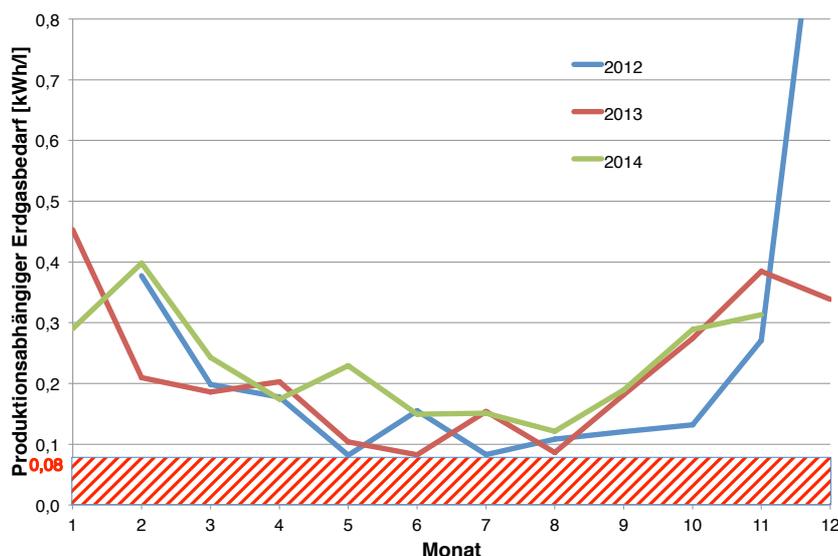


Abbildung 5: Bestimmung des produktionsabhängigen spezifischen Erdgasverbrauchs

Mit einem Ansatz von 2000 kg (Dichte etwa 1,03 kg/l) Base werden im Mittel 2865 l Eis (Dichte: 0,67 kg/l) hergestellt. Mit der berechneten Energiemenge von 183 kWh/Batch aus Tabelle 2 ergibt das einen rechnerischen Wert von 0,064 kWh/l Speiseeis.

Tabelle 2: Spezifischer Wärmeverbrauch

	T_{ein}	Masse	Wärme- kapazität	T_{aus}	Wärme- menge
Erwärmung Mixer	5 °C	2000 kg	3,291 kJ/(kg*K)	70 °C	119 kWh
Erwärmung Kochanlage	70 °C	2000 kg	3,397 kJ/(kg*K)	85 °C	28 kWh
Rückgewinnung Wärmetauscher	85 °C	2000 kg	3,397 kJ/(kg*K)	72 °C	- 25 kWh
CIP	15 °C	700 kg	4,193 kJ/(kg*K)	80 °C	61 kWh
Summe					183 kWh

Der produktionsunabhängige Erdgasverbrauch (entspricht dem Heizbedarf) ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Gesamtverbrauch und dem produktionsabhängigem Verbrauch. Entsprechend den vorherigen Aussagen kann der produktionsabhängige Verbrauch über den spezifischen Erdgasverbrauch von 0,08 kWh/l, multipliziert mit der im betrachteten Zeitraum produzierten Eismenge, bestimmt werden.

Abbildung 6 zeigt einen ungewöhnlich hohen Erdgasverbrauch für das erste Halbjahr 2014. Der Grund für den erhöhten Verbrauch war ein Defekt eines Ventils am erdgasbetriebenen Dampfkessels, der über mehrere Monate unerkannt blieb. Der Mehrverbrauch wurde mit dem zeitgleich erfolgten Anstieg der Produktion zwar qualitativ plausibel erklärt, aber nicht quantitativ geprüft. Eine regelmäßige Berechnung und Überprüfung von spezifischen, also produktionsmengenbezogenen Kennwerten, kann in Zukunft genutzt werden, um derartige Probleme zeitnah zu erkennen und einzugrenzen.

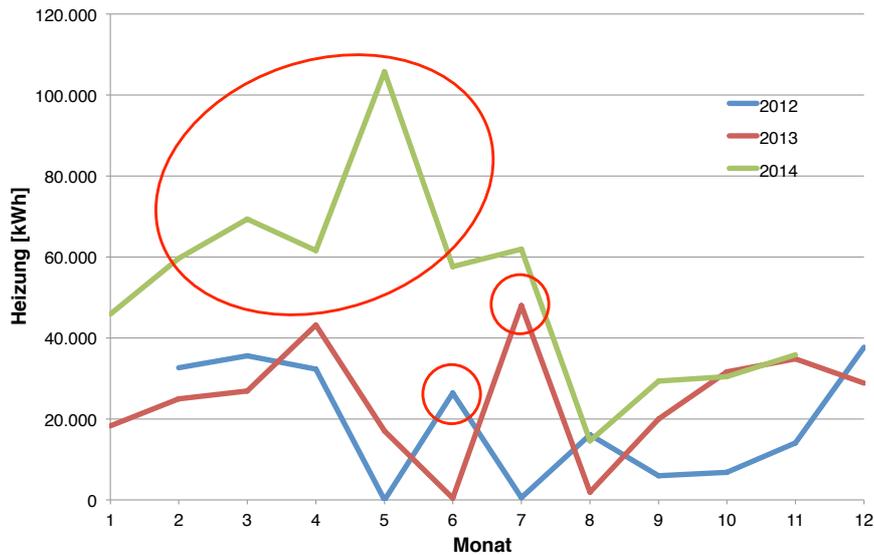


Abbildung 6: Produktionsunabhängiger Erdgasverbrauch (entspricht Heizbedarf) mit rot markierten Ausreißern

Die zwei mit roten Kreisen markierten Ausreißer in Abbildung 6 hingegen haben keine Betriebsstörung als Ursache. Sie konnten auf im jeweiligen Zeitraum durchgeführte größere Reinigungsaktionen mit erhöhtem Warmwasserverbrauch zurückgeführt werden.

2.4 Stickstoffverbrauch

Um eine kleine Eiskristallgröße und damit hohe Qualität der Eiscreme sicherzustellen ist ein schnelles Herabkühlen der Eisbase unabdingbar (siehe auch Abbildung 1). Dazu wird bei der Bruno Gelato GmbH flüssiger, tiefkalter Stickstoff (-196 °C) in einem Kühltunnel versprüht, um eine Umgebungstemperatur von -70 °C zu erreichen. Die Eisbehälter durchfahren diesen Stickstofftunnel und werden so in ca. 25 Minuten auf die Zieltemperatur von -25 °C gekühlt. Pro Produktionstag werden hierfür etwa 3000 kg flüssiger Stickstoff benötigt.

Der zum Kühlen nutzbare Energieinhalt des flüssigen Stickstoffs besteht aus zwei Beiträgen: Der zur Verdampfung des Stickstoffs aus der Umgebung entnommenen Wärmemenge (Verdampfungsenthalpie) sowie der Wärmemenge für die Temperaturerhöhung des Gases bis zum maximal nutzbaren Wert. Mittels des verfahrenstechnischen Simulationsprogrammes ChemCad® (Version 5.5.x) wurde für eine maximale Nutzttemperatur von 0 °C ein nutzbarer Energieinhalt von 115 kWh/t_{N₂,fl} errechnet. Weitere Vergleichspunkte sind in Tabelle 3 in Abhängigkeit des nutzbaren Temperaturbereiches aufgeführt. Wenn nicht anders darauf hingewiesen, wird im Folgenden 0 °C als Referenztemperatur angenommen. Für die Erzeugung einer Tonne Flüssig-Stickstoff wird in [Cen13] ein elektrischer Energiebedarf in Höhe von 549 kWh_{el} angegeben.

In Tabelle 3 wird außerdem der Wirkungsgrad dieser Art der Kühlmittel-Bereitstellung angegeben. Dieser ergibt sich als Quotient aus der nutzbaren Kälte bezogen auf die für die Herstellung eingesetzte Energie von 549 kWh/t_{N₂,fl} (Wert aus GEMIS-Datenbank [IIN15]). Dieser ist mit rund 20 % sehr gering. Die Verwendung von flüssigem Stickstoff für Kühlzecke ist somit zwar ein einfaches, aber energetisch aufwendiges und damit auch teures Verfahren. In Kapitel 5 wird dieses Thema erneut aufgegriffen und Alternativen im Detail betrachtet.

Tabelle 3: Nutzbare Energie des tiefkalt verflüssigten Stickstoffs

Herstellung		
549 kWh/t _{N₂,fl}		
Nutzbarer Temperaturbereich	Nutzbare Energiemenge	Energetischer Nutzungsgrad
Nutzkälte -196 °C bis 25 °C	122 kWh/t _{N₂,fl}	22,2 %
Nutzkälte -196 °C bis 0 °C	115 kWh/t _{N₂,fl}	20,8 %
Nutzkälte -196 °C bis -25 °C	108 kWh/t _{N₂,fl}	19,6 %
Nutzkälte -196 °C bis -70 °C	94 kWh/t _{N₂,fl}	17,2 %

2.5 CO₂-Äquivalente

Neben den energetischen Betrachtungen sind auch die damit verbundenen Emissionen an klimaschädlichen Gasen zu berücksichtigen. Dies erfolgt über die Ermittlung von CO₂-Äquivalenten für die Stromerzeugung (Annahme: Deutscher Strommix), die Heizwärmeerzeugung mit Erdgas und die Bereitstellung von flüssigem Stickstoff. Im Vorgriff auf Kapitel 9 wird in der Tabelle auch der Wert für die Bereitstellung elektrischer Energie mittels Photovoltaik angegeben. Die entsprechenden Zahlenwerte wurden der GEMIS-Datenbank [IIN15] entnommen und sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: CO₂-Äquivalente aus GEMIS-Datenbank

Name	Prozessname	Jahr	CO ₂ -Äquivalent	Quelle
Strommix	Netz-el-lokal-HH/KV-2013	2013	0,6168 kg CO _{2,äq} /kWh	IINAS
Erdgas Heizen	Gas-Heizung-DE-2010	2010	0,2856 kg CO _{2,äq} /kWh	IINAS
Solar-PV	Solar-PV-multi-Rahmen-mit-Rack-DE-2010	2010	0,0625 kg CO _{2,äq} /kWh	Öko-Institut
Stickstoff (flüssig)	Xtra-generisch\N2 (flüssig)	2000	0,3745 kg CO _{2,äq} /kg _{N₂,fl}	Öko-Institut

2.6 Energiekosten

Die Bestimmung der Energiekosten erfolgt über die Abrechnungen der Energieversorger, die den Projektpartnern zur detaillierten Analyse vom Energieversorger übermittelt wurden.

2.7 Zusammenfassender Vergleich der Energieträger

Für den Betrachtungszeitraum ergibt sich die in Abbildung 7 dargestellte Verteilung der jeweiligen Verbräuche, der dadurch entstandenen Bezugskosten und der damit verbundenen CO₂-Äquivalente.

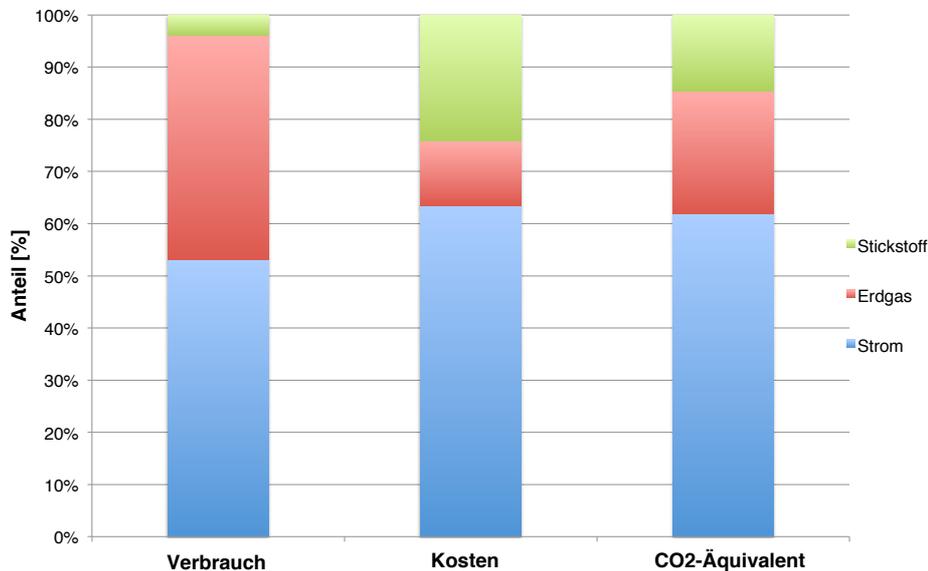


Abbildung 7: Zusammenfassender Vergleich der beim KMU eingesetzten Energieträger

Der Flüssigstickstoff trägt aus energetischer Sicht mit rund 4 % nur einen kleinen Teil zur Energieversorgung der Firma bei, verursacht dabei aber etwa 24 % der gesamten Energiekosten und rund 15 % des CO₂-Äquivalents.

Bei diesen Berechnungen wurde für N_{2,fl} beim Energieverbrauch die thermische „Kühl“-Leistung zu Grunde gelegt (Referenztemperatur 0 °C, s. Tabelle 3). Zur Erzeugung des kryogenen Kühlmittels ist ein hoher mechanischer bzw. elektrischer Energieaufwand nötig, der sich in den Kosten und im CO₂-Äquivalent widerspiegelt. Dieser Aufwand, bzw. seine Minimierung, sind das Thema von Kapitel 5.

3 Optimierung

Im Fokus der Prozessoptimierung steht die Reduzierung des Energieverbrauchs pro produzierter Eismenge mittels Maßnahmen, die für das KMU wirtschaftlich sinnvoll sind. Im Rahmen des hier dargestellten Projektes wurden zwei Wege beschritten. Zunächst werden die Verbrauchsdaten detaillierter analysiert, um günstige und ungünstige Produktionsphasen genauer zu identifizieren. Auf diese Weise wird vor allem die Organisation des Arbeitsablaufs bewertet.

Darüber hinaus wird geprüft, wie gut die so ermittelten günstigen Werte mit den theoretisch ermittelten Energiebedarfen übereinstimmen. Dafür wird die in Abbildung 2 dargestellte Prozesskette mit einem grundlegenden verfahrenstechnischen Modell hinterlegt. Das Optimierungspotenzial ergibt sich sowohl durch Einzelbetrachtung von Teilprozessen, wie im Falle des Kühltunnels, als auch durch geschickte Zusammenschaltung von Prozessen, wie im Falle der Pinch-Analyse zur Nutzung von Abwärme und „Abkälte“.

3.1 Analyse des Gesamtprozesses

Zunächst gilt es anhand der Datenanalyse festzustellen, unter welchen Bedingungen bisher die geringsten spezifischen Verbrauchswerte erreicht wurden und aus diesen Punkten Regeln für einen optimierten Betriebsablauf abzuleiten.

3.1.1 Spezifische elektrische Energie

Die spezifische elektrische Energie ergibt sich aus dem Quotienten des elektrischen Energieverbrauchs der Produktionsmaschinen und der damit hergestellten Eismenge (siehe Abbildung 8).

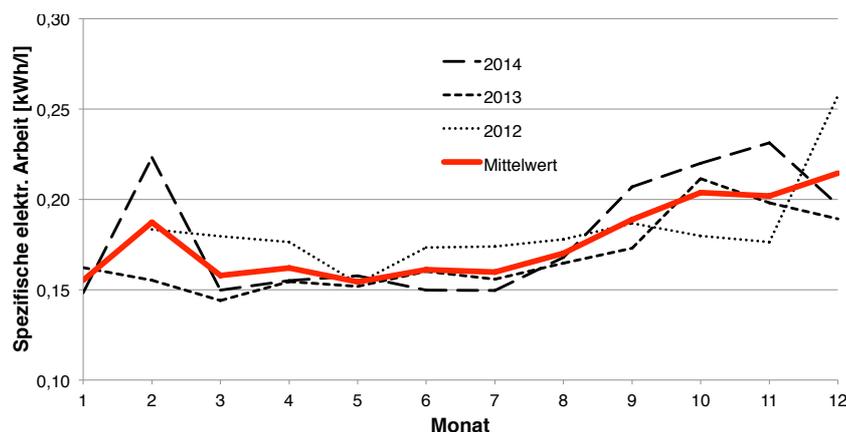


Abbildung 8: Jahresverlauf der spezifischen (auf die produzierte Eismenge bezogenen) elektrischen Arbeit

Vergleicht man die erhaltene Kurve mit der Produktivität (Abbildung 9) und der Produktionszeit eines Arbeitstags (Abbildung 10) zeigt sich, dass beide möglichen Parameter über das Jahr betrachtet einen ähnlichen Verlauf haben.

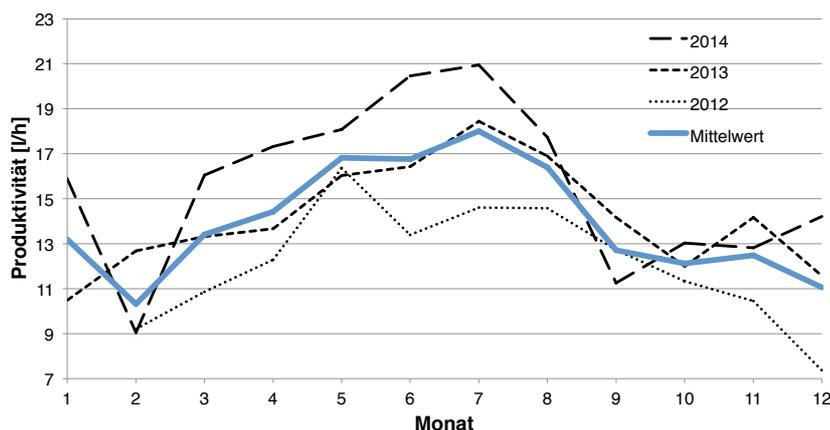


Abbildung 9: Jahresverläufe der Produktivität

Durch Normierung der Produktivzeit auf den Maximalwert von 18,5 h/a und Auftragen der Punkte gegen die spezifische elektrische Arbeit (Abbildung 11) lassen sich die Zusammenhänge deutlicher herausarbeiten. Der Schwerpunkt der so erzeugten Punktwolke liegt bei einer normierten Produktivzeit von 0,78, d. h. 14,4 h/d mit einer zugehörigen spezifischen Energiebedarf von 0,175 kWh/l. Die Standardabweichung der normierten Produktivzeit beträgt 2,4 h/a. Der Zusammenhang zwischen Produktivzeit und spezifischen Kosten lässt sich, wie in der

Abbildung zeigt, in guter Näherung durch eine Gerade beschreiben. In den Randbereichen der Punktwolken liegen die ungünstigen bzw. günstigen Produktionsbedingungen.

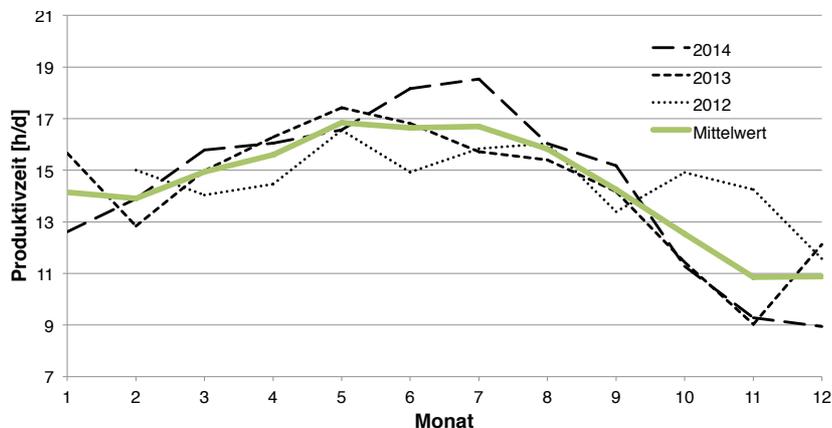


Abbildung 10: Jahresverläufe der Produktivzeit

Durch Abgleich mit den detaillierten Produktionsdaten zeigt sich, dass die besonders ungünstigen Produktionstage durch eine hohe Anzahl von Produktwechseln gekennzeichnet waren. Die damit verbundenen Maschinenstillstände können durch eine geeignete Produktionsplanung vermieden oder zumindest reduziert werden. Zur Vermeidung des ungünstigen, rot markierten Bereichs genügt das Einhalten weniger Regeln: **Vermeiden von kurzen Produktivzeiten** unter 14 h/a und **Vermeiden von Produktwechsel**.

Bei der Umsetzung dieser Regeln ist zu beachten, dass dies geschehen muss, ohne den Anteil an hocheffizienten Arbeitstagen (mit wenig Produktwechseln) wesentlich zu reduzieren. Diese scheinbar widersprüchlichen Anforderungen lassen sich lösen, wenn kleine Chargen nicht „on demand“ unter häufiger Störung des Arbeitsablaufs hergestellt werden, sondern in einer Mindestmenge. Der momentane Überschuss wird eingelagert. Ebenso ist es sinnvoll, kurze Produktionstage zu vermeiden, zum Beispiel indem häufig geordnete Eissorten auf Lager produziert werden.

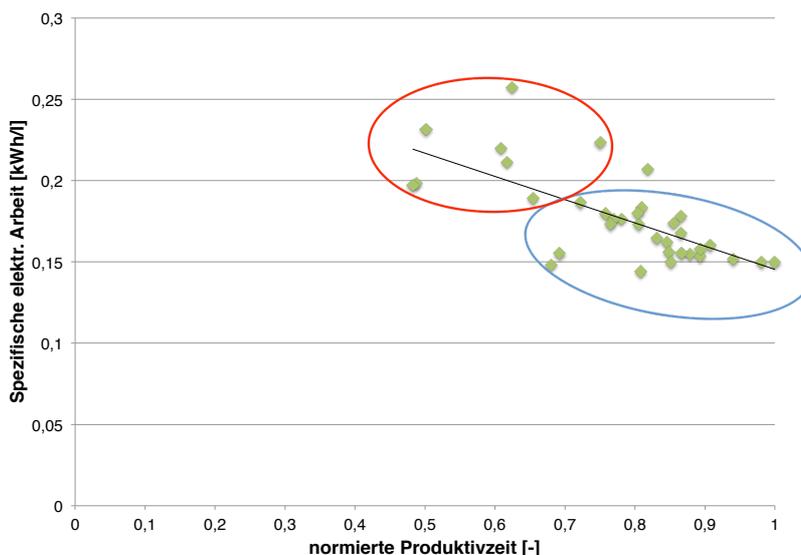


Abbildung 11: Normierte Produktivzeit (Produktionsstunden pro Tag) mit blau markierten erwünschten und rot markierten unerwünschten Bereichen

Derartige Optimierungs-Fragestellungen werden in vielfältigen Variationen in der Mathematik (einschließlich Operations Research) bearbeitet, z. B. als Stundenplanoptimierung, in der „Warteschlangentheorie“, als „Rucksack-Problem“ oder „Problem des Handlungsreisenden“. Eine Vertiefung dieser Planungsaufgaben würde den Rahmen dieses Projektes sprengen. Sie könnte aber Thema einer weiteren Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern werden, entsprechende Ansätze dazu werden aktuell geprüft.

Über die planungsbedingten Schwankungen hinaus gibt es unvermeidbare Schwankungen, die aus der Variation der Stoffparameter herrühren. So unterscheiden sich die spezifischen Wärmekapazitäten der Eisbasen in Abhängigkeit vom Wasser-, Alkohol- und Fettgehalt um bis zu 40 %. Die unterschiedlichen Wärmekapazitäten bedingen unterschiedliche Volumenströme in den Eismaschinen mit entsprechend variierendem Durchsatz und spezifischem Energieaufwand (Abbildung 12). Diese Streuung ist unvermeidbar und der planungsbedingten (statistisch unabhängig) überlagert.

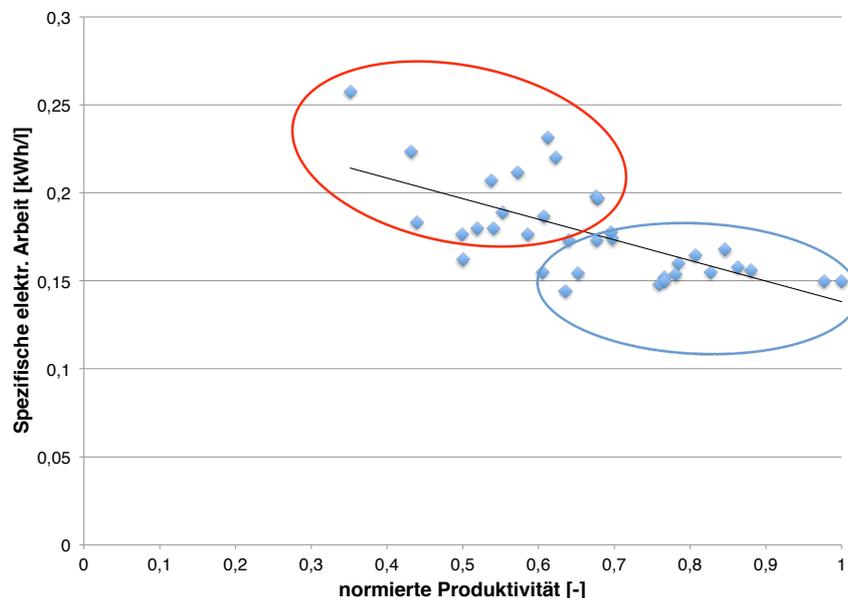


Abbildung 12: Normierte Produktivität (produzierte Eismenge pro Zeit) mit blau markierten unvermeidbaren und rot markierten vermeidbaren Streuungen

3.1.2 Pinch-Analyse zur Optimierung des Wärmeaustauschpotenzials

Bei der Pinch-Analyse werden Energieflüsse von kalten und warmen Strömen mit ihrer Temperatur und Energiemenge aufgenommen und in einem Diagramm aufgetragen, um den idealen Einsatz von Wärmetauschern zu bestimmen.

Die warmen Ströme (rote Linie in Abbildung 13) ergeben sich aus dem Wärmebedarf beim Erhitzen der Milch von 5 °C aus dem Milchtank auf 85 °C im Pasteur. Die kalten Ströme, blau dargestellt, stellen den Kältebedarf dar. Von rechts nach links betrachtet zeigt das Diagramm zunächst den zweistufigen Wasserkühler, dann die Eismaschine(n) und zuletzt die Tiefkühlung.

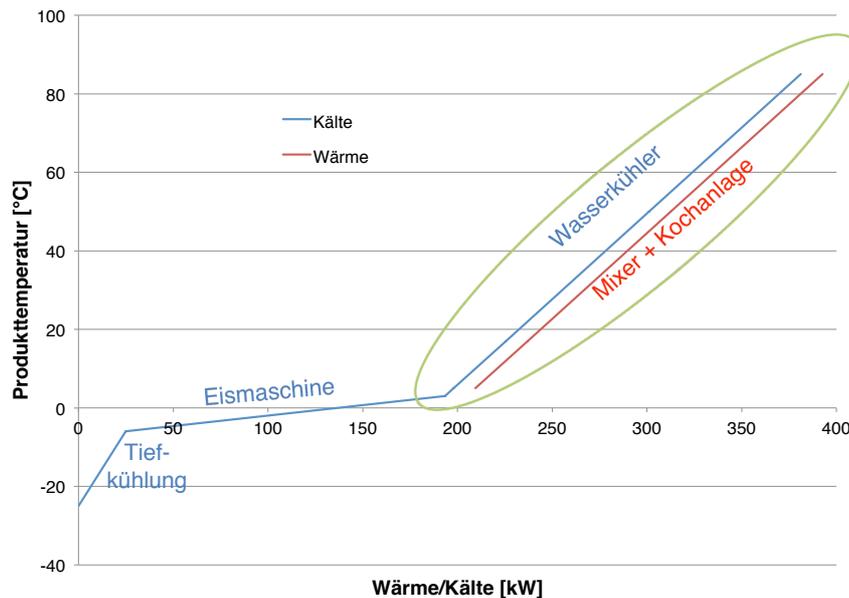


Abbildung 13: Pinch-Analyse zur Optimierung des Wärmeaustauschpotenzials

Die zusammengesetzte Kurve aus warmen und kalten Strom zeigt das im Prozess nutzbare Wärmeaustauschpotenzial. Dieses kann aber nur im kontinuierlichen Betrieb, bei dem Wärme zwischen heißen und kalten Strömen direkt getauscht werden kann, voll ausgenutzt werden.

3.2 Funktion und Optimierungspotenziale der Einzelapparate

3.2.1 Mixer und Kochanlage

Wie in Abbildung 14 gezeigt, wird die Milch mit einer Temperatur von ca. 6 °C in einem 2000 l Behälter vorgelegt und zirkuliert durch einen Mischer in dem die Zutaten zudosiert werden. Dabei wird die Base über den zentralen Dampferzeuger und einen Plattenwärmetauscher auf etwa 70 °C erhitzt. Der Vorgang dauert etwa 30 min. Die Base wird nach dem Mischvorgang in den Vorlagebehälter der Kochanlage überführt. Aus der Kochervorlage wird sie durch einen Wärmetauscher gepumpt, über den zentralen Dampferzeuger und einen weiteren Plattenwärmetauscher auf 85 °C nacherhitzt, homogenisiert und pasteurisiert. Die Wärme der pasteurisierten Base wird dann genutzt, um die Base aus der Kochvorlage vorzuwärmen. Aus dem Wärmetauscher kommt die Base mit etwa 75 °C und wird durch einen zweistufigen Wasserkühler auf etwa 3 °C gekühlt, bevor sie über Nacht in Reifetanks gelagert wird.

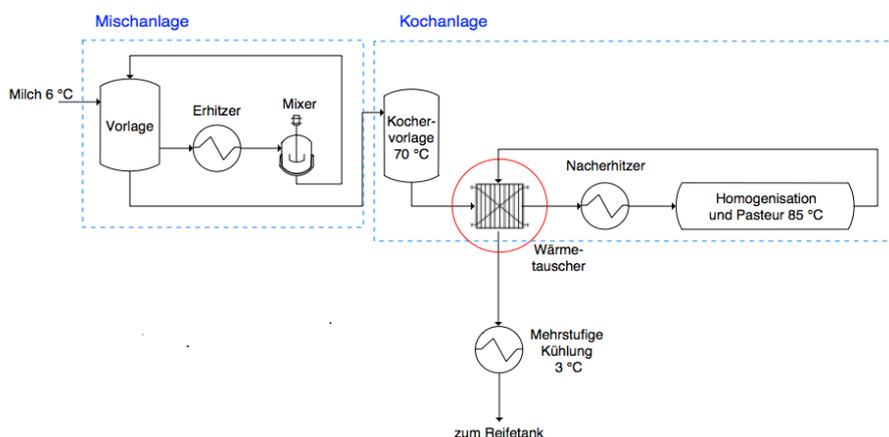


Abbildung 14: Integration des Plattenwärmetauscher der Kochanlage

- **Herabsetzen der Mischertemperatur**

Es hat sich gezeigt, dass ein Absenken der Mischertemperatur von 70 °C auf 50 °C bei den meisten Eismischungen ohne Qualitätsverlust möglich ist.

Ohne Änderung der Verschaltung lässt sich so der Bedarf an Heiz- und Kühlleistung (s. Abbildung 15) senken. Aufgrund der einfachen Umsetzbarkeit wurde diese Maßnahme sofort umgesetzt, leider konnte der Erfolg der Maßnahme nicht gemessen werden, da ein spät erkannter Defekt die Bedarfskurven verschoben hat (s. Abbildung 6).

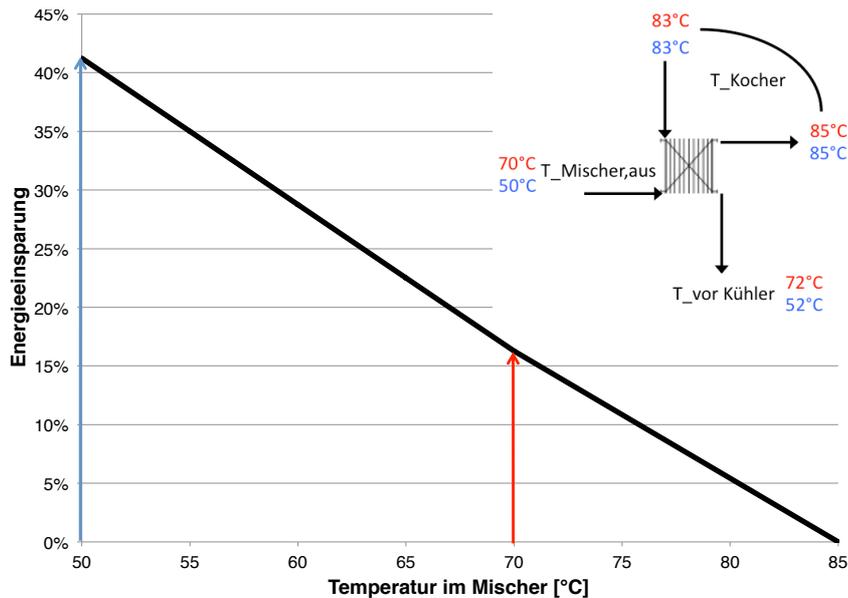


Abbildung 15: Auswirkung der Reduzierung der Mischertemperatur

Der in Abbildung 14 gekennzeichnete, bereits installierte Wärmetauscher wird durch diese Absenkung deutlich besser ausgenutzt.

- **Wärmerückgewinnung Misch- und Kochanlage mittels Wärmepuffer**

Die Wärmerückgewinnung in Abbildung 14 ist extrem ineffizient und führt dadurch zusätzlich zu erhöhten Kühlmittelkosten (hier: Wasser). Der Wärmetauscher ist in der Anlagenverschaltung an der falschen Stelle angeordnet. Er tauscht nur die Wärme der Base aus dem Mischer (ca. 70 °C) gegen die Temperatur aus der Kochanlage (85 °C). Optimal ist eine Wärmekopplung der kalten Milch aus den Lagertanks (5 °C) mit der Ausgangstemperatur aus dem Kocher (s. Abbildung 16).

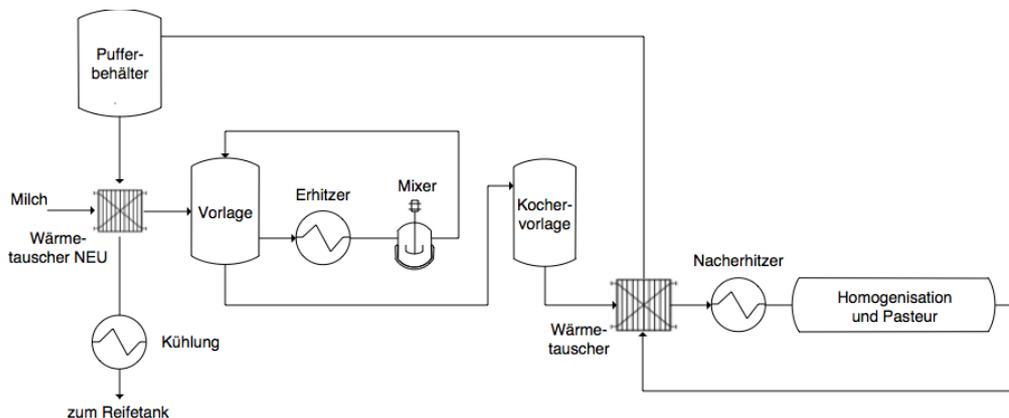


Abbildung 16: Optimierter Einsatz eines Wärmerekuperators nach der Kochanlage

Durch Zwischenpuffern der heißen Milch nach der Kochanlage kann die Wärme mit der kalten Milch, die in die Vorlage gepumpt wird, ausgetauscht werden. Der Zwischenpuffer wird durch die Taktung von Misch-, Koch- und Reinigungsvorgängen nötig.

Bei relativ geringen Investitionskosten für eine Erweiterung der Verrohrung, einem weiteren Wärmetaucher und einem Pufferbehälter könnte so, abgesehen von Wärmeverlusten über die Rohre und nicht-idealem Wärmetaucher-Verhalten, die gesamte Wärmemenge eingespart werden. Durch die eingesparte Wärmemenge zum Erhitzen fällt auch der entsprechende Energiebedarf zur Kühlung weg. Diese Darstellung gilt für den laufenden Betrieb. Beim Anfahren der Produktion steht noch keine Wärme aus dem Pasteur zur Verfügung und analog fehlt für den letzten Batch des Tages die Kühlung durch die kalte Milch. Im Jahresschnitt wurden 2014 neun Chargen pro Tag gekocht, d. h. in acht von neun Batches ließe sich der Großteil der Wärmeenergie einsparen. Das Maximum lag 2014 bei 18 Chargen pro Tag.

Die Rückgewinnung der zum Kochen der Milch erzeugten Wärme kann den produktionsabhängigen Erdgasverbrauch um 43 % senken.

- **Wärmerückgewinnung der CIP mittels Wärmepuffer**

Analog zu der im vorherigen Kapitel dargestellten Wärmerückgewinnung der heißen Milch im Kocherausgang kann durch Installation eines Zwischenpuffers für die warme benutzte Reinigungslauge in einem Pufferbehälter aufgefangen werden und mit ihr über einen Wärmetaucher die Energie rückgewonnen werden.

Zusammen mit der Wärmerückgewinnung der Milch ergibt sich ein energetisches Einsparpotenzial von 64 %.

3.2.2 Eismaschinen

Nach dem Reifeprozess hat die Eismischung eine Temperatur von etwa 3 °C. In der nachfolgenden Eismaschine wird sie elektrisch auf - 6 °C heruntergekühlt. Basen mit höherer Wärmekapazität (z. B. alkoholhaltige Eissorten) erfordern eine längere Verweildauer, d. h. die Anlage wird mit angepasstem Durchsatz im optimalen Anlagenbetrieb gefahren. Eine weitere Optimierungsmöglichkeit konnte nicht aufgezeigt werden. Speiseeis hat im Unterschied zu Wasser keinen eindeutigen Gefrierpunkt, sondern einen Gefrierbereich. Bei einer Temperatur von - 6 °C ist das Speiseeis noch fließfähig und kann so gut in Verkaufsschalen abgefüllt werden.

Auch wenn das Produkt im Ausgang der Eismaschine noch fließfähig ist, so ist schon ein großer Teil der Erstarrungswärme, die ihrerseits einen großen Teil der gesamten benötigten Kälte darstellt, entzogen.

3.2.3 Stickstofftunnel

Der Stickstofftunnel wird hauptsächlich für die für den Verkauf an die Gastronomie vorgesehenen Eisschalen (2,5 l bis 8 l) genutzt. Er besteht aus einem umhausten Transportband in dem ein kalter, hochturbulenter Gasstrom im Gegenstrom die Eisschalen herunterkühlt sowie der Flüssigstickstoff-Eindüsung, vier Ventilatoren und einem Abluftgebläse. Abbildung 17 zeigt den Austrittsbereich des Stickstofftunnels in der Produktion.



Abbildung 17: Austrittsbereich des Stickstofftunnels

Die Eindüsung des $N_{2,fl}$ erfolgt nach ca. 2/3 der Tunnellänge, ohne dass das Produkt flüssig berieselt wird. Durch Leckage-Verluste im Ein- und Ausgangsbereich gelangt Umgebungsluft ungewollt in den Tunnel. Der Stickstoffstrom ist so eingestellt, dass die mittlere Tunneltemperatur - 70 °C beträgt. Das kalte Luft/Stickstoff-Gemisch wird im Bereich der Produktaufgabe durch ein Abluftgebläse abgesaugt und über das Hallendach abgegeben. Im Tunnel sorgen vier Ventilatoren für eine Durchmischung der Stickstoff/Luft-Atmosphäre, um den Wärmeaustausch an den Produktbehältern zu verbessern. Die Aufenthaltsdauer der Produktschalen im Tunnel beträgt ca. 30 Minuten.

3.2.4 Spiralkühler

Im elektrisch betriebenen Spiralkühler werden die für private Haushalte bestimmten, kleineren Eisschalen (900 ml) innerhalb einer isolierten Umhausung auf Gurten gefördert. Die Aufenthaltszeit beträgt 1,5 h. Die Temperatur beträgt - 40 °C, wobei Ventilatoren für eine Verwirbelung der Luft sorgen, um den Wärmeübergang zu verbessern.

3.2.5 Kühllager

Es werden zwei Kühllager genutzt. Die frischen Zutaten werden im kleineren und das auf Paletten verpackte Produkt im größeren Tiefkühlager bei - 25 °C gelagert. Da die eingehende Ware eine Temperatur von - 40 °C hat, brauchen nur Tür- und Wandverluste ausgeglichen zu werden. Die Kühlung erfolgt durch zwei bzw. drei Kompressionskälteanlage mit einer elektrischen Anschlussleistung von jeweils 9,2 kW.

Die Transportpaletten werden etwa alle 10 min vom Produktionsbereich durch das sogenannte Innentor in das Produkt-Kühlager verschoben. Die Ware wird zwei- bis dreimal pro Tag abgeholt. Das dafür genutzte Außentor des Tiefkühlagers bleibt dabei jeweils etwa 45 min offen. Weiterhin steht das Tor für ca. eine Stunde pro Tag für Kontroll- und Distributionsaufgaben offen.

Außen- und Innentor des Lagers sind einfache Rolltore, die sich direkt gegenüberliegen, so dass „Durchzug“ entsteht, wenn beide Tore zur gleichen Zeit offen sind. Der „Durchzug“ wird durch zwei installierte Lamellenvorhänge spürbar reduziert (s. Abbildung 18).



Abbildung 18: Lamellenvorhang im Tiefkühlager

Zur Reduzierung des Energiebedarfs von Tiefkühlager können Luftschleieranlagen beitragen. Bei einer Luftschleieranlage wird mittels eines Gebläses kalte Luft aus dem Kühlraum angesaugt und durch Düsen oder Lamellen derart ausgeblasen, dass sich vor dem Tor eine Luftwalze ausbildet, die ein Einströmen von warmer Außenluft verhindert. Eine nachvollziehbare Herstellerangabe zum Nutzen liegt nicht vor, so dass dieser im folgenden abgeschätzt wird.

Im geschlossenen Zustand verbrauchen die Kühlager etwa 36 kW (Jahresmittelwert). Die elektrische Gesamtanschlussleistung beträgt 45,5 kW. Da es in der bis-herigen Praxis keine Probleme gab, kann durch Öffnen des Außentores also die benötigte Leistung maximal vorübergehend um 9,5 kW erhöht werden. Für den Ventilatorantrieb einer Luftschleieranlage wird eine Anschlussleistung von ca. 0,5 kW [Tek15] angesetzt. Der vermiedene elektrische Kühlleistungsbedarf beträgt dann 9 kW.

Tabelle 5: Investitionsrechnung Luftschleieranlage

Öffnungszeit	3 h/d
Produktionstage / Jahr	200 d/a
Vermiedener elektr. Kühlleistungsbedarf	9 kW
Stromkosten	22 cent/kWh
Vermeidbare Kosten / Jahr	1.188 €/a
Investitionskosten ¹	5.000 €
Statische Amortisierungsdauer	4,2 Jahre

¹Mündliches Angebot

Unter den genannten Randbedingungen ergibt sich eine statische Amortisationszeit von rund 4 Jahren. Zu beachten ist, dass der maximale Nutzen der Luftschleieranlage hier nach dem Ausschussverfahren abgeschätzt wurde. Darüber hinaus wurde der unvermeidliche Wärmeeintrag durch den Luftschleier ebenso wenig berücksichtigt wie Wartungskosten, die beide die Amortisierungsdauer verlängern würden. Die gemachten Abschätzungen bilden also

den maximalen wirtschaftlichen Nutzen ab, welche Amortisationsdauern real erreichbar sind muss anhand von konkreten und belastbaren Daten geprüft werden. Es wird empfohlen, verschiedene Anbieter solcher Anlagen zu kontaktieren und deren technische Vorschläge kritisch zu prüfen. Da das Potenzial dieser Maßnahme jedoch lediglich 0,3 % des gesamten Energieverbrauchs ausmacht, hat sie eine geringe Priorität und wird im Rahmen des Projektes nicht weiter analysiert.

4 Nutzung alternativer Energiequellen zur Energieversorgung

Zusätzlich zu der Ausschöpfung von Optimierungspotenzialen der eingesetzten Anlagen ermöglicht die Einbindung von regenerativen Energiequellen eine Verbesserung der Gesamtökobilanz des Unternehmens. Die folgenden Techniken wurden auf ihrer Eignung für das KMU geprüft:

- Windkraft
- Photovoltaik
- Biogas
- Solarthermie
- Geothermie
- Kraft-Wärme-Kopplung
- Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Es handelt sich um eigenständige Verfahren zur Strom- bzw. Wärmeerzeugung sowie deren Kopplung nach dem Stand der Technik.

Darüber hinaus wird in einem weiteren Abschnitt das Thema Kryotechnik untersucht. Über die Möglichkeit einer effizienten Kälteerzeugung hinaus wird dabei geprüft, ob tiefkalt verflüssigtes Gas als Energiespeicher dienen kann. Dies wäre für das KMU von hohem Interesse, da sich so das zurzeit eingesetzte Kältemittel $N_{2,fl}$ aus fluktuierenden regenerativen (firmeneigenen oder externen) Quellen bereitstellen ließe.

4.1 Windkraft

Windkraftanlagen sind nach Aussage des KMU derzeit in der Gemeinde Rhaderfehn laut Raumordnungsprogramm des Landkreises Leer nicht genehmigungsfähig. Weiterhin ist auf dem Firmengelände auch nicht ausreichend Platz um in hinreichendem Abstand zu Gebäuden eine Windkraftanlage zu errichten. Eigeninitiierte Maßnahmen des KMU auf diesem Gebiet sind also zurzeit ausgeschlossen und werden hier folglich nicht weiter betrachtet.

4.2 Photovoltaik

Der hohe Strombedarf des Unternehmens (s. Kapitel 2.2) legt nahe, das von keinerlei Abschattung betroffene Dach der Produktionshalle für die Installation von Photovoltaik-Modulen zu nutzen und so den Strombedarf über eine Eigenerzeugung abzudecken bzw. den Fremdbezug zu vermindern. Das Institute for Energy and Transport (IET) des Joint Research Center (JRC) der Europäischen Union stellt mit dem Photovoltaik Geographical Information System (PVGIS) Daten zur Auslegung von Solaranlagen zur Verfügung [JRC12]. Die folgenden Berechnungen beruhen auf den in Tabelle 6 dargestellten Annahmen:

Tabelle 6: Randbedingungen der betrachteten PV-Anlage

Ort	Rhauderfehn, Schumacherstr.
Dachneigung	5 °
Azimut	-21 °
Gesamtverluste der PV-Anlage ^{1,2}	23,3 %
Material	Siliziumzellen
Datenbasis	Climate-SAF PVGIS

¹ Standardwert des Moduls [JRC12]

² Verluste aufgrund von Temperatureinflüssen, Winkelabhängige Reflexion, Leitungs- und Umwandlungsverlusten

Durch Optimierung des Stellwinkels der PV-Anlage lässt sich der jährliche Gesamtertrag für eine Beispiel-Anlage mit 100 kW_{Peak} von 831 kWh/a (5° Dachneigung) auf 924 kWh/a (37° Stellwinkel PV) erhöhen (s. Abbildung 19).

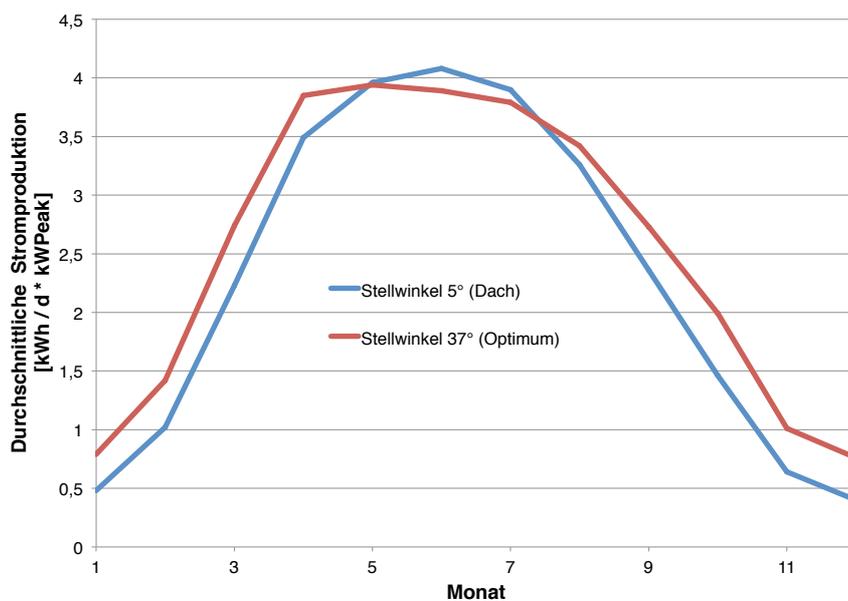


Abbildung 19: Durchschnittliche Stromproduktion der PV-Anlage für unterschiedliche Stellwinkel

Mit Hilfe des PVGIS-Datenbank wurden für das im Rahmen des Projektes zu erstellende Modell tageszeitabhängige Leistungswerte ermittelt (Beispiele s. Abbildung 20).

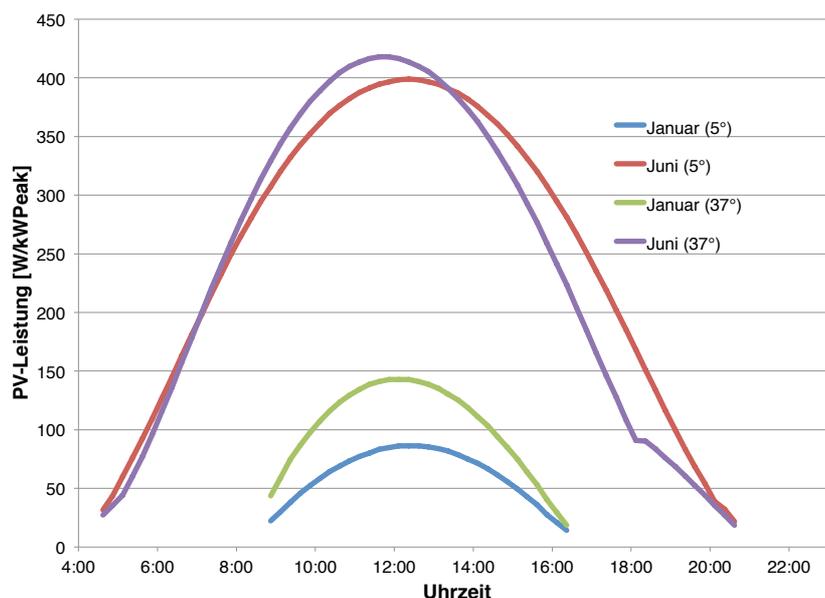


Abbildung 20: Tageszeitabhängige Leistungskurven der PV-Anlage für unterschiedliche Stellwinkel und Monate

Bei der Stromerzeugung konkurriert die Photovoltaik z. B. mit dem BHKW. Die wirtschaftliche Optimierung wird in Kapitel 8 beschrieben.

4.3 Biogas

Die im Produktionsprozess anfallenden Bioabfälle sind mengenmäßig zu gering, um sie wirtschaftlich verwenden zu können und werden entsorgt. In räumlicher Nähe zum Produktionsstandort werden keine Biogasanlagen betrieben. Interessante Ansätze für eigenständige Maßnahmen des KMU sind also nicht vorhanden.

4.4 Solarthermie

Thermische Energie wird während der Eisproduktion zum Erhitzen der Milch und der Reinigungslauge der CIP genutzt. Die Betriebstemperatur von handelsüblichen Vakuumröhrenkollektoren liegt mit 150 °C deutlich über der benötigten Arbeitstemperatur von CIP und Homogenisator (85 °C), so dass Solarthermieanlagen unter technischen Gesichtspunkten durchaus geeignet sind, um die benötigte Wärme ganz oder teilweise zur Verfügung zu stellen.

Nachteilig ist, dass sich der Einsatz von Solarthermie und KWK gegenseitig ausschließen. Für die KWK des geplanten BHKW (s. Kapitel 4.6) muss eine sinnvolle Nutzung der Abwärme erfolgen, um wirtschaftlich Strom erzeugen zu können. Wird die Wärme jedoch anderweitig z. B. durch Solarthermie bereitgestellt, fährt das BHKW herunter oder schaltet sich ganz ab, wenn keine ausreichenden Wärmeabnehmer verfügbar sind.

Da in der Gesamtbetrachtung die KWK das größte wirtschaftliche Potenzial hat, wird der Einsatz von Solarthermie nicht weiter verfolgt. Die Dachfläche steht stattdessen vollständig für Photovoltaik zur Verfügung, bei der es eine Konkurrenz zur KWK-Technologie gibt.

4.5 Geothermie

Oberflächennahe Geothermie nutzt die Erdwärme bis Bohrtiefen von etwa 400 m. Mittels einer Wärmepumpe kann im Winter der Heizbedarf des Bürogebäudes gedeckt und im Sommer eine Abkühlung der Arbeitsräume erreicht werden.

Nachteilig ist, wie bei der Solarthermie, dass die Wärme erzeugende Geothermie und die Koproduktion von Strom und Wärme mittels KWK sich gegenseitig ausschließen.

Aufgrund der Priorität KWK wird die Geothermie im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

4.6 Kraft-Wärme-Kopplung

Die KWK wird durch die gleichzeitige Gewinnung von mechanischer Energie (Kraft) und Heiz- bzw. Prozesswärme charakterisiert. Die mechanische Energie wird hierbei zumeist in elektrische Energie umgewandelt. Der niedrige Brennstoffverbrauch und der hohe Gesamtnutzungsgrad sind gegenüber konventioneller Wärme- bzw. Stromversorgung ökologisch und, durch staatliche Förderung, auch ökonomisch vorteilhaft.

Verfügbare KWK-Anlagen unterscheiden sich nach

- Anlagengröße
- Brennstoff (Gas, Biogas, Öl, Holz)
- Betriebsart (strom-/wärmegeführt, stromoptimiert) [KWK12]
- Verbrennungsteil (Verbrennungsmotor, Turbine, Brennstoffzelle,...)

Als Brennstoff wurde Erdgas gewählt, da am Produktionsstandort bereits ein Anschluss vorhanden ist und somit keine weiteren Maßnahmen zu Brennstoffversorgung und -lagerung notwendig sind. In der anvisierten Anlagengröße von 50 kW (Anlagenauslegung s. Kapitel 0) ist eine genügend große Auswahl an BHKWs mit Erdgasmotoren erhältlich. Die optimale Anlagengröße wurde mit einem Berechnungsmodell ermittelt, das Energiebedarf und Wirtschaftlichkeitsberechnung kombiniert. Für die energetische Betrachtung müssen Angaben zu den elektrischen und thermischen Wirkungsgraden in Abhängigkeit der Anlagengröße vorliegen, diese wurden aus [ASU11] bestimmt (siehe Abbildung 21). Es zeigt sich, dass mit kleinerer Anlagengröße der elektrische Wirkungsgrad abnimmt, während der thermische Wirkungsgrad steigt. Der durchschnittliche elektrische Wirkungsgrad eines erdgasbetriebenen BHKW in der 50 kW_{el}-Leistungsklasse liegt bei rund 32 %, der thermische Wirkungsgrad zwischen 52 und 65 %. Die detaillierten Ergebnisse zur BHKW-Auslegung sind in Kapitel 9 dargestellt.

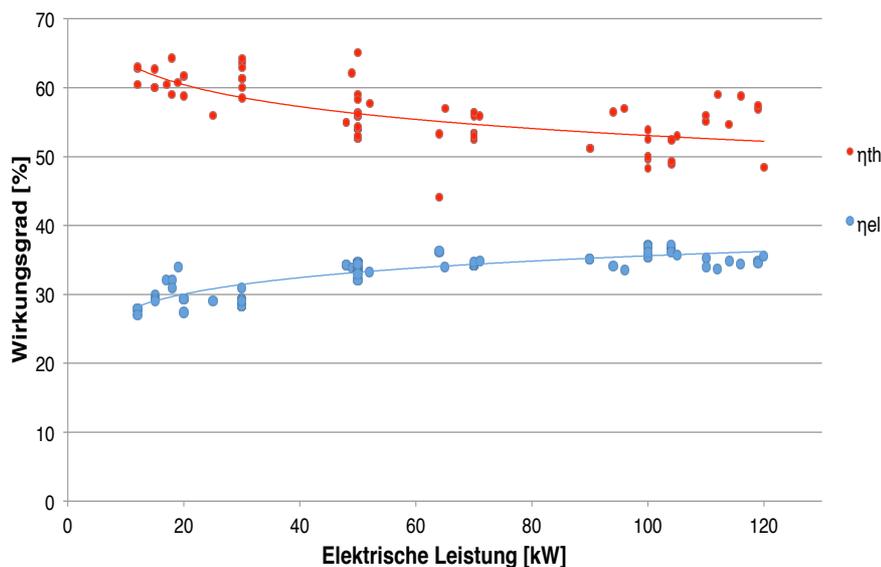


Abbildung 21: Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Anlagengröße [ASU11]

4.6.1 Stromgeführtes BHKW

Ein stromgeführtes BHKW hat als Führungsgröße den Strombedarf des Endverbrauchers. Wird die dabei erzeugte Wärme nicht im Prozess oder in der Gebäudeheizung benötigt und stehen keine weiteren Wärmesenken zur Verfügung, geht das BHKW in den Teillastbetrieb oder die Wärme bleibt ungenutzt und muss durch eine externe Kühlung abgeführt werden. Diese Anlagenführung ist nur kurzfristig sinnvoll, da die Kriterien für eine hocheffiziente Anlage nach KWK-Gesetz nicht eingehalten werden und dadurch die Förderwürdigkeit entfällt.

4.6.2 Wärmegeführtes BHKW

Bei dieser Auslegungsart wird das BHKW nach dem aktuellen Wärmebedarf geregelt. Diese Anlagenfahrweise ist prädestiniert für die Produktionszeit, in der Koch- und Reinigungsanlagen mit dem entsprechenden Wärmebedarf laufen. Der Strombedarf ist in der Zeit ebenfalls hoch, so dass die Anlage mit maximalem Gesamtwirkungsgrad betrieben werden kann. Bei 8 bis 10 Stunden Kochzeit pro Tag und etwa 200 Produktionstagen pro Jahr ergibt sich aber nur eine vergleichsweise geringe Jahresbetriebsdauer unter 2000 h/a. Um eine gute Wirtschaftlichkeit zu erreichen, werden überschlägig Jahresbetriebsdauern von mindestens 5000 Volllaststunden empfohlen.

4.6.3 Stromoptimiertes BHKW

Einen Mittelweg bietet die stromoptimierte Betriebsweise: Strom- und Wärmeproduktion werden durch einen entsprechend dimensionierten Wärmespeicher (teil-)entkoppelt. Ziel ist die ökonomisch interessante Stromproduktion mit möglichst vielen Jahresvolllaststunden zu erreichen, ohne dass Wärme ungenutzt bleibt. Die Zusatzkosten für den Wärmespeicher müssen durch die Ersparnis gegenüber dem wärmegeführten Betrieb kompensiert werden. Der stromoptimierte Betrieb eines Mini-BHKW mit ca. 40 kW_{elektrisch} eignet sich zur Deckung des Basisbedarfs des hier betrachteten KMU (s. Kapitel 2.2).

Zentrales Element der Wärmenutzung ist die Pufferung der Wärme in einem Speicher. Die Art der Speicherung, ob sensibel, latent oder thermochemisch, ist nur von geringer Relevanz; Abbildung 22 geht von einem einfachen Warmwasserspeicher aus. Die vom BHKW abgegebene Wärme wird an diesen Speicher abgegeben. Zeigt der Sensor LIC1 einen hohen Füllstand aber TIC1 eine zu geringe Temperatur wird das Wasser des Speichers erneut durch das BHKW erwärmt. Ein dem Speicher nachgeschalteter Brenner sorgt für die von allen drei Verbrauchern (CIP, Pasteur, Misch-Anlage) benötigte Temperatur von etwa 90 °C (bivalenter BHKW Betrieb).

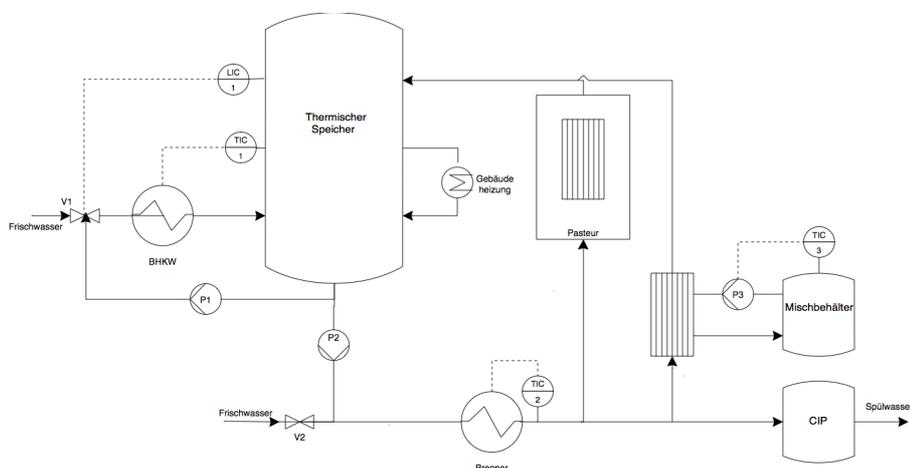


Abbildung 22: BHKW mit Wärmespeicher als zentrales Element des Wärmenutzungskonzeptes

4.6.4 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Die KWKK wandelt die Wärme der KWK durch Nutzen der Verdunstungskälte in einem Ab- oder Adsorptionsteil in Prozesskälte. Die KWKK ist als Erweiterung der KWK zu begreifen. Sie ermöglicht eine, von Wartungsstillständen abgesehen, 100%ige Auslastung eines BHKW die sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Bei Einsatz von Ammoniak/Wasser-Gemischen als Arbeitsmedium liegen die tiefsten mit dieser Technologie erreichbaren Temperaturen bei - 60 °C [ASU11]. Dadurch ist die Technologie als Ersatz für den Tiefkühltunnel (erforderliche Temperatur unter - 70°C) ungeeignet und der mögliche Einsatzbereich im vorliegenden Fall auf die Kühlung der Lagerräume (erforderliche Temperatur - 25 °C) begrenzt.

5 Techniken mit gesteigertem Forschungscharakter

In diesem Projekt sollte auch geprüft werden, welche deutlich über den Stand der Technik hinausgehenden Lösungen aktuell oder in näherer Zukunft für eine energieeffiziente und emissionsarme Produktion in Frage kommen.

Im Verlaufe des Projektes wurde untersucht welche alternativen Formen der Energiebereitstellung sich innerhalb des Betriebes sinnvoll ergänzen lassen. Als Erweiterung dieses Ansatzes wurde angedacht, die Beteiligung an regionalen Projekten zur Nutzung fluktuierender regenerativer Energiequellen zu prüfen. Ein zweiter Ansatz besteht darin, das Thema moderne Kältetechnik vertieft zu behandeln.

Bei der Bearbeitung des Projektes zeigte sich, dass die Größe des benötigten BHKW und insbesondere die einer KWKK-Anlage an der unteren Grenze von marktüblichen Geräten liegt (siehe Kapitel 8.5). Der Einstieg in regionale Projekte zu Energieerzeugung (Stichworte: Power-to-Gas, Power-to-Liquid) sprengt also deutlich den Rahmen des für das KMU Umsetzbaren.

Realistischer und grundsätzlich zu empfehlen ist eine Kooperation von Betrieben innerhalb des Gewerbegebietes. Ein großes Potenzial dafür war aber nicht zu erkennen.

Für ein breites Engagement der Firma auf dem Gebiet der Energieerzeugung in regionalem Maßstab fehlt also die Basis. Stattdessen zeigte sich, dass eine vertiefte Betrachtung der Kryotechnik zielführender und praxisnäher ist.

5.1 Kryogene Speicherung

Im Antrag angedacht war eine eigenständige Vor-Ort-Produktion von flüssigem Stickstoff mit folgenden Vorteilen:

- Kältemaschinen lassen sich bedarfsgerecht ein- und ausschalten.
- N_{2,fl} lässt sich mit akzeptablen Energieverlusten über mehrere Tage lagern.
- Die Herstellung des Kältemittels kann somit zu Zeiten niedriger Strompreise „auf Vorrat“ erfolgen.

Diese Form der Energiespeicherung wird zurzeit im großen Stil am Centre for Low Carbon Futures untersucht [Cen13]. Sie erfordert, neben der Kälteerzeugung und der Lagerung des Kältemittels, eine Technik für die Rückverwandlung von Kälte in mechanische Energie. Dies kann mit Kälte-getriebenen Kolbenmotoren geschehen (Dearman-Motor), die sich gemäß des oben zitierten Berichts aus dem Jahr 2013 jedoch noch im Konzeptstadium befinden.

Eine effiziente Rückverwandlung von Kälte in mechanische Energie wäre für die Eisfabrik sehr wichtig, weil die Siedetemperatur von $N_{2,fl}$ im Vergleich zu -80 °C Solltemperatur im Kühltunnel -196 °C beträgt. Diese Temperaturdifferenz ist nach Maßstäben der Kältetechnik sehr groß. Ihre Nutzung in einem Dearman-Motor wäre thermodynamisch sinnvoll, ist aber technisch noch nicht verfügbar.

Alternativ lässt sich die Solltemperatur im Kühltunnel auf einfachste Weise durch Mischen von $N_{2,fl}$ mit der im Kreislauf geführten Kühlluft einstellen. Man verzichtet dabei aber auf die oben beschriebene produktive Nutzung der Temperaturdifferenz.

Die Bereitstellung eines lagerfähiges Kältemittel für -80 °C erfordert also einen technischen Umweg, dessen Mehraufwand sich zurzeit nicht zurückgewinnen lässt.

Durch Verflüssigung von Methan (Siedepunkt: -162 °C) ließe sich dieser Mehraufwand geringfügig mindern. Durch die Brennbarkeit dieses Gases entstehen jedoch zu viele zusätzliche technische Probleme, insbesondere für einen Betrieb der Lebensmittelherstellung.

Die Nutzung eines verflüssigten Gases zur Kältespeicherung scheitert zurzeit also an folgenden Problemen:

- Kein Gas mit günstigem Siedepunkt verfügbar.
- Keine Technik verfügbar, um $N_{2,fl}$ thermodynamisch sinnvoll in den gewünschten Temperaturbereich zu bringen.

Wie sich im nachfolgenden Abschnitt über Gaskältemaschinen zeigt, sind die Investitionskosten für eine Anlage zur Erzeugung von -80 °C so hoch, dass ein wirtschaftlicher Betrieb für das KMU (in Teillast) nicht möglich ist. Für die energetisch aufwendigere Produktion von $N_{2,fl}$ bei -196 °C gilt dieses Argument (leider) auch.

Die Nutzung eines verflüssigten Gases zur Kältespeicherung ist für das betrachtete KMU aufgrund der hohen Investitionskosten nicht darstellbar.

5.2 Einsatz einer Gas-Kältemaschine

Zu untersuchen bleibt die Möglichkeit, die gewünschte Temperatur von -80 °C mit Gaskältemaschinen direkt bedarfsgerecht zu produzieren. Viele konventionelle Kältemaschinen nutzen die Verdampfungsenthalpie eines Kältemittels, um dem Kühlgut Wärme zu entziehen. Der Siedepunkt des Arbeitsmediums muss also im vorliegenden Fall für akzeptable Druckwerte (Über- oder Unterdruck) bei etwa -100 °C liegen. Auch dieser Ansatz scheitert, analog zu dem oben schon Gesagten, am Fehlen von Gasen mit geeignetem Siedepunkt. Als Kältemittel muss demnach ein heruntergekühltes, nicht-kondensierendes Gas genutzt werden.

Komprimierte Gase können (oberhalb der Inversionstemperatur) durch Expansion gekühlt werden. Eine Maschine, die dies leistet, entspricht einem Motor, der in umgekehrter Laufrichtung betrieben wird. Während im Verbrennungsmotor die Expansion von erhitztem Gas Arbeit verrichtet, wird einer Kältemaschine Energie zugeführt, um ein Gas zu expandieren und es so zu kühlen.

Die am Markt verfügbaren „Inverse Stirling“-Kältemaschinen erreichen den gewünschten Temperaturbereich von -80 °C problemlos und könnten darüber hinaus auch zur Verflüssigung von Luft eingesetzt werden. Ihre Arbeitsweise lässt sich thermodynamisch vereinfacht mit einem (inversen) Carnot-Prozess beschreiben.

Für „linkslaufende“ thermodynamische Prozesse, d. h. für Kälteanlagen, wird statt des Carnot-Wirkungsgrades üblicherweise die sogenannte Leistungszahl angegeben. Sie beschreibt das Verhältnis der resultierenden Kälteleistung \dot{Q}_0 zur eingesetzten elektrischen Leistung [Wik15]:

$$\epsilon_{KA} = \frac{\dot{Q}_0}{P_{el}} \quad \text{Gl. 1}$$

Da hochwertige elektrische Energie in „minderwertige“ Wärme umgewandelt wird, kann dieser Quotient größer als Eins sein. Es gilt:

$$\epsilon_{KA} < \frac{T_{soll}}{T_{ein} - T_{soll}} \quad \text{Gl. 2}$$

T_{ein} : Umgebungstemperatur in K

T_{soll} : Solltemperatur des Kühlmittels in K

Deutlicher wird die problematische Erzeugung tiefer Temperaturen, wenn man den Kehrwert des Wirkungsgrades betrachtet.

$$\eta_C = \frac{1}{\epsilon_{KA}} > \frac{T_{ein}}{T_{soll}} - 1 \quad \text{Gl. 3}$$

Für linkslaufende Kreisprozesse hat der Carnot-Wirkungsgrad die Bedeutung eines Mindestaufwandes an elektrischer (bzw. mechanischer) Energie, die für die Kälteerzeugung aufzubringen ist (Größer-Zeichen in der Definition beachten!).

Offensichtlich nimmt der Aufwand beliebig große Werte an, je näher die Zieltemperatur T_{soll} am absoluten Nullpunkt liegt.

In der Praxis spiegelt sich dieser Zusammenhang in den Leistungsdaten eines Stirlingkühlers in Abbildung 23 wieder. Man erkennt aus dem Verlauf der „shaft-power“-Kurve (mechanische Leistungsaufnahme, grüne Linie) den aus Gl. 2 oder Gl. 3 erwarteten überproportionalen Leistungsbedarf für eine gewünschte Kühlleistung (rote Kurve) mit sinkendem Temperaturniveau.

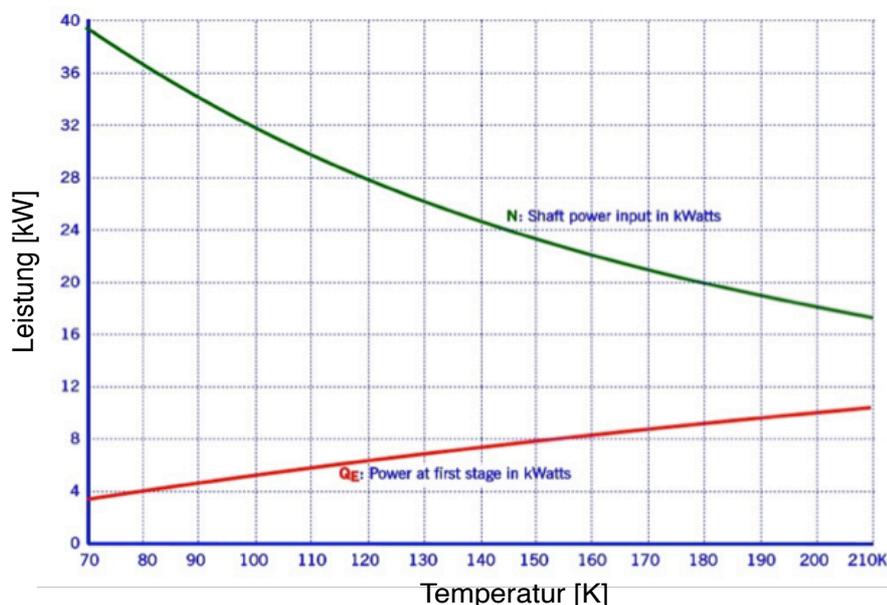


Abbildung 23: Kennlinie einer Stirling-Kältemaschinen gemäß Herstellerprospekt [Sti15]

Aus diesen Kennlinien folgt, dass es energetisch sehr ungünstig ist, die Temperatur von - 200 °C herzustellen und durch Mischen auf wieder auf - 80 °C zu bringen. In Zahlen ausgedrückt:

Bei - 80 °C (193 K), werden etwa 19 kW_{el} für 10 kW_{therm} benötigt. Bei - 196 °C (77 K) sind es 37 kW_{el} für 4 kW_{therm}. Bezogen auf den gleichen „Wärme“strom ist die Bereitstellung auf dem tieferen Temperaturniveau also mit etwa den doppelten elektrischen Energiekosten verbunden.

Der Energieaufwand für die Bereitstellung der im Kühltunnel benötigten Temperatur von -80 °C sinkt also um etwa 50 %, wenn die Kälte vor Ort mit einer Stirling-Maschine erzeugt wird anstatt die äquivalente Menge N_{2,fl} bei einem Zulieferer herstellen zu lassen. Eine Berücksichtigung von Transportaufwand und Abdampfverlusten bei der Lagerung würde diesen Wert noch weiter zu Ungunsten der zentralen Lösung verschieben.

Den wirtschaftlichen Berechnungen liegt ein Richtpreis zu Grunde, den der Hersteller [Sti15] übermittelte. Es wurde betrachtet, wie die Wirtschaftlichkeit durch die Auslastung der Kältemaschine sowie das Verhältnis von Stickstoff- zu Strompreis beeinflusst wird. Dabei wurden zwei Szenarien (KMU-1, KMU-2) betrachtet, die sich in den jährlichen Produktivstunden unterscheiden.

Tabelle 7: Fallbeispiele für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Gaskältemaschine

	KMU-1	KMU-2
Arbeitstage	200 d/a	300 d/a
Produktivstunden	16 h/d	24 h/d
Stickstoffverbrauch	3000 kg/d	4500 kg/d
El. Leistungsaufnahme	48 kW	
Investitionskosten	600.000 €	
Wartungskosten	12.000 €	
Strompreis / Stickstoffpreis	Variabel (siehe Abbildung 24)	

In Abbildung 24 ist die statische Amortisationsdauer für die unterschiedlichen Fälle in Abhängigkeit von dem Preisverhältnis zwischen Stickstoff und Strom dargestellt. Die beiden Kurven gelten für die gleiche Kältemaschine, aber bei unterschiedlicher Auslastung gemäß Tabelle 7.

Das im Projekt untersuchte KMU entspricht dem Fallbeispiel KMU-1. Das Verhältnis von Stickstoff- zu Strompreis beträgt 0,45, die zugehörige Amortisationszeit liegt entsprechend außerhalb des berücksichtigten Rahmens. Eine Investition ist aus wirtschaftlicher Sicht also nicht zu empfehlen.

Für ein Unternehmen dessen Profil eher dem KMU-2 entspricht, kann der Einsatz einer Gaskältemaschine aber durchaus zu attraktiven Amortisierungszeiten führen.

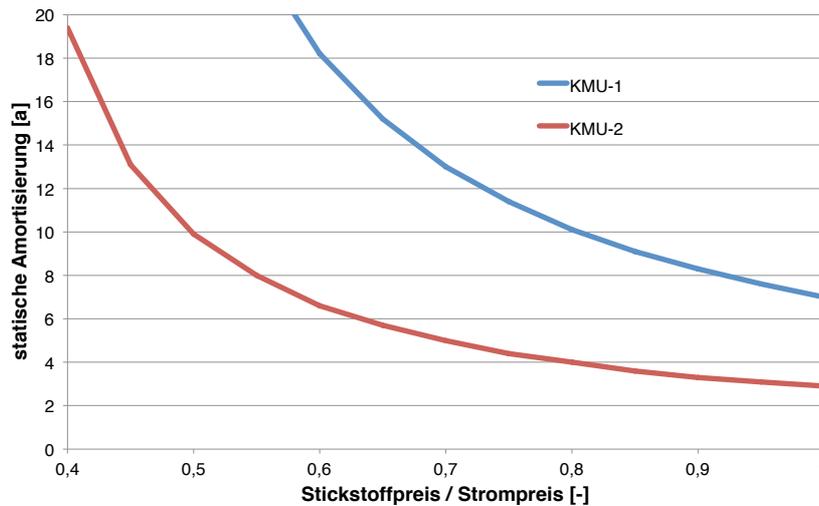


Abbildung 24: Statische Amortisierungsdauer einer Gaskältemaschine für zwei Szenarien

5.3 Power-to-Gas

Power-to-Gas bezeichnet die Umwandlung von elektrischer Energie zu Methan (CH_4), das als synthetisches Erdgassubstitut (SNG, Substitute Natural Gas, auch: Synthetic Natural Gas) verwendet wird. Dies geschieht in einem mehrstufigen Verfahren, bei dem durch Wasserelektrolyse mit erneuerbarem Strom zunächst Wasserstoff erzeugt wird dieser nachfolgend mit CO_2 in einer katalytischen Synthesereaktion in Methan umgewandelt wird. „Überschüssiger“ Strom aus Windkraftanlagen oder großen Photovoltaik-Parks kann so gespeichert und durch die Einspeisung in das Erdgasnetz transportiert werden.

Die Vorteile des Verfahrens sind leicht erkennbar:

- Saisonale Speicherung von großen regenerativen Energiemengen,
- Nutzung einer vorhandenen Speicher- und Verteilinfrastruktur (Erdgasnetz),
- Möglichkeit zur stofflichen, thermischen und/oder elektrischen Nutzung,
- Beitrag zur Netzstabilisierung durch Bereitstellung von negativer Regelleistung (Wasserelektrolyse).

Nachteile des Verfahrens sind der hohe Investitionsaufwand und damit verbunden die Notwendigkeit großer Anlagenleistungen um positive Größeneffekte („Economy of Scale“) nutzen zu können. So wird in [LBS13] als untere Anlagengröße eine Elektrolyseleistung von 3 MW_{el} betrachtet. Allein schon die Investitionskosten, die für eine entsprechende PV-Anlage anfallen wären für das betrachtete KMU nicht darstellbar. Darüber hinaus befindet sich das Verfahren noch im Entwicklungsstadium. Auch der technische Aufwand für den Betrieb und die Wartung einer solchen Anlage ist hoch. Es ist nicht davon auszugehen, dass beim KMU das nötige Know-how vorhanden ist.

6 Simulation zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung

Im Projektverlauf wurde ein an das KMU angepasstes aber weitgehend flexibles Simulationswerkzeug erstellt, das folgende Ebenen miteinander verknüpft:

- Verwendung realer, detaillierter Verbrauchsdaten,
- Berücksichtigung von Leistungsmerkmalen optionaler zukünftiger Apparate und Anlagen,
- wirtschaftliche Bewertung der technischen Optionen.

Das Simulationswerkzeug bietet somit die Möglichkeit, technisches und wirtschaftliches Optimierungspotenzial aufzuzeigen. Die Auswirkungen von Veränderungen des Produktionsprozesses werden geprüft und verschiedene Szenarien erstellt. Teil der wirtschaftlichen Bewertung ist eine dynamische Investitionsrechnung nach der Kapitalwertmethode.

Grundlage für das Modell sind die vom Energieversorger abgerufenen Verbrauchswerte sowie Angaben der Mitarbeiter und Messwerte an Anlagenteilen.

Die im Kapitel 0 dargestellte Vorauswahl führt zu einer Reduktion der möglichen, neu einzusetzenden Technologien, die im Folgenden detailliert betrachtet werden:

- KWK mittels stromoptimiertem BHKW mit Wärmespeicher,
- KWK mittels wärmeoptimierten BHKW,
- KWKK im Bereich der Tiefkühlager,
- Einsatz eines Sterling Kryo-Kühlers als Ersatz der Stickstoffkühlung,
- Stromerzeugung mittels PV-Anlage.

Die Fokussierung auf Substitutionstechnologien für die Energieversorgung erlaubt die Aggregation der Einzelanlagen und vereinfacht so das Modell ohne an Aussage zu verlieren.

Der vereinfachte Programmablaufplan ist in Abbildung 26 dargestellt. Realisiert werden kann das dargestellte Modell in einem beliebigen Tabellenkalkulationsprogramm, hier wurde Microsoft Excel gewählt. Ein typischer Durchlauf auf einem Büro Desktop-Rechner (64 Bit, 2,5 GHz Taktung) dauert, bei einer Dateigröße von 16 MB, wenige Sekunden.

Das Programm basiert auf den 15 min Stromwerten die vom Stromzulieferer zur Verfügung gestellt werden und tageweise in einer Datei abgelegt werden. Produktions- und Leertage lassen sich nach einfachen Kriterien (z. B. Stromverbrauch über oder unter Basiswert) unterscheiden und werden entsprechend sortiert.

Im Anschluss können mögliche Produktionserweiterungen oder gesteigerte Auslastungen abgebildet werden. Damit verbundene zusätzliche Produktionstage werden im Modell durch Umwandeln eines Leertages in einen Produktionstag erstellt. Da nicht vorhersehbar ist, in welcher Jahreszeit dieser Bedarf entsteht, werden zufällig ausgewählten Leertagen die Produktionsdaten eines durchschnittlichen Arbeitstages zugewiesen. Auch zukünftig zu erwartende Verbrauchsänderungen können berücksichtigt werden. Die Verbrauchsänderungen können z. B. durch zusätzliche Tiefkühlagerkapazitäten, die die Basislast erhöhen, sowie durch Zukauf weiterer Produktionsanlagen, durch die der arbeitsabhängige Verbrauch erhöht wird, entstehen.

Im Anschluss erfolgt die Integration einer KWKK-Anlage. Soll diese betrachtet werden, können die Kompressionskältemaschinen der Tiefkühlhäuser teilweise ersetzt und so die Grundlast reduziert werden.

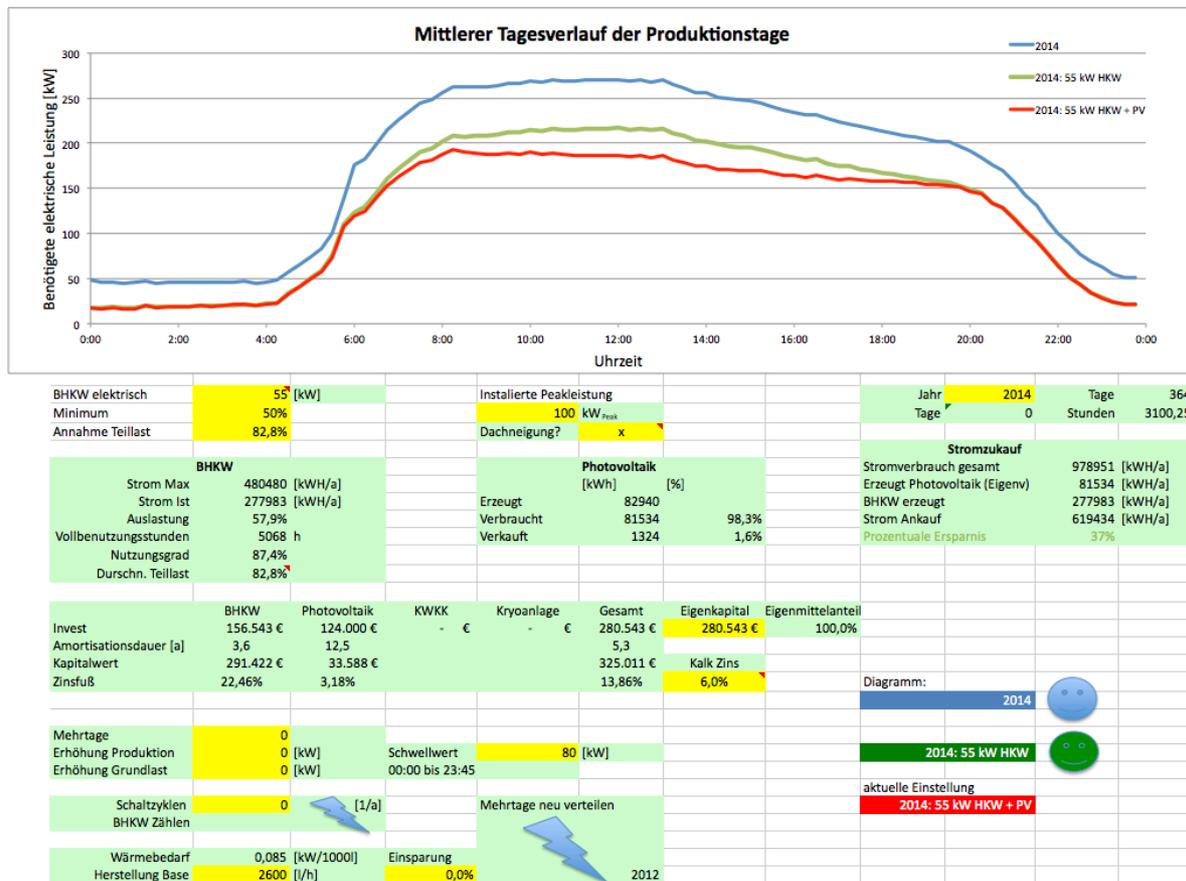


Abbildung 25: Eingabemaske des Modells

Analog erfolgt die Berücksichtigung einer Eigenstromerzeugung mittels PV-Anlage. Die Berechnung der Stromerzeugung einer Photovoltaik ist in Kapitel 4.2 dargestellt. Die momentane Leistung der PV wird im Simulationstool vom Stromverbrauch abgezogen. Übersteigt die Stromerzeugung den Stromverbrauch, wird der überschüssige Strom eingespeist und entsprechend vergütet. Der verbleibende Bedarf an elektrischer Energie geht in die Berechnung des BHKW-Lastzustands ein.

Parallel zur Feststellung des elektrischen Leistungsbedarfes erfolgt die wärmetechnische Analyse. Die Aufteilung des Gasverbrauchs für die Wärmerzeugung wurde in 2.2.2 dargestellt. Der monatliche Heizbedarf wird gleichmäßig auf die Tage verteilt. Nachts (22 bis 6 Uhr) wird der Heizbedarf um 20 % verringert (Nachtschaltung).

Im Hinblick auf die Prozesswärme wird der produktionsabhängige Wärmebedarf (0,08 kW/l inklusive Reinigung durch die CIP) mit den Produktionsmengen multipliziert und ergibt so den produktionsabhängige Wärmebedarf. Dabei wird sowohl die Dauer für den Ansatz einer Base berücksichtigt, als auch dass die Base bereits am Vortag des Produktionstages angemischt wird. Neben dem Heiz- und Prozesswärmebedarf wird auch die im Wärmespeicher speicherbare Wärme erfasst.

Bei den bisherigen Berechnungen wurden Wärme- und Strombedarfe unabhängig bestimmt. Soll ein BHKW bei den Betrachtungen berücksichtigt werden, wird vom Nutzer zunächst der elektrische Leistungsbereich vorgeben. Da der elektrische Wirkungsgrad eines BHKW von der Anlagengröße und dem Lastzustand abhängt, sind die entsprechenden Wirkungsgrade (s. Abbildung 21) im Programm hinterlegt. Für den Fall, dass die elektrische BHKW-Leistung

überdimensioniert ist und das BHKW somit nur im Teillastbetrieb betrieben wird, reduziert sich der Wirkungsgrad um ca. 1 % je 10 % Absenkung des Lastzustands [Asc13]. Sinkt die Teillast unter 50 % schaltet sich das BHKW aus. Das sich ergebende Optimierungsproblem wird iterativ gelöst.

Der Strom- und Wärmebedarf wird um die Produktionsmengen des BHKW reduziert. Wird mehr Wärme produziert als Bedarf besteht, so wird Wärme eingespeichert und umgekehrt. Die resultierenden Daten werden in Jahreskennlinien und Tagesverläufen dargestellt. Abbildung 26 stellt den Ablauf des Programms in einer vereinfachten Struktur dar.

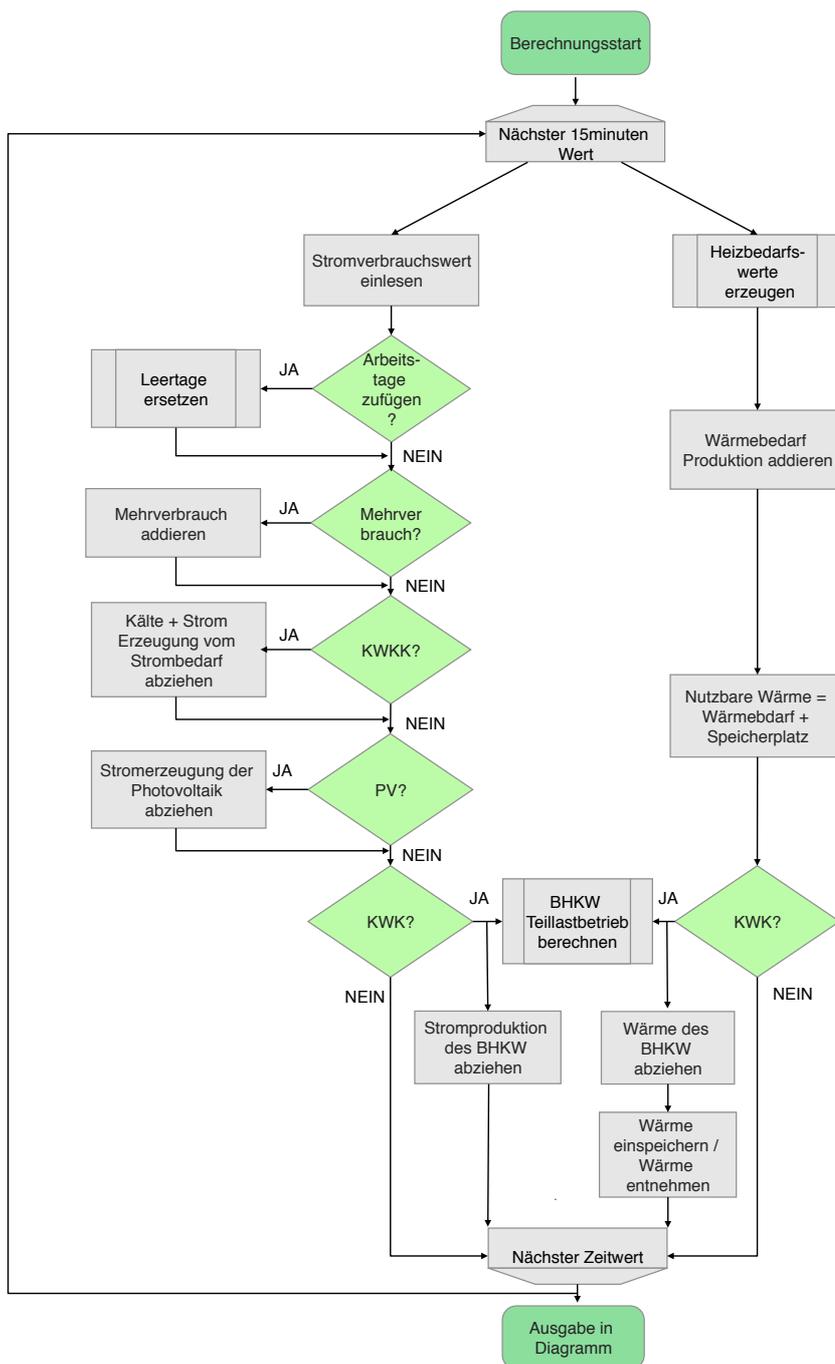


Abbildung 26: Vereinfachtes Programmablaufschemata

7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die wirtschaftliche Betrachtung wurde anhand von Wirtschaftlichkeitsanalysen der einzelnen Alternativen in Anlehnung an VDI Richtlinie 2067 – Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen [VDI12-1] – und VDI Richtlinie 6025 – Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen [VDI12-2] – durchgeführt. Als Vergleichsgrößen wurden die Amortisationsdauer, der Kapitalwert sowie der interne Zinsfuß herangezogen.

Im ersten Schritt zur Berechnung erfolgte eine Gegenüberstellung von Kosten und Erlösen für einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren unter Berücksichtigung einer Inflationsrate von 1,6 %. Die Kosten unterteilen sich in folgende vier Gruppen:

- kapitalgebundene Zahlungen
- verbrauchsgebundene Zahlungen
- betriebsgebundene Zahlungen
- sonstige Zahlungen

Anlagenanschaffungspreise sowie Instandsetzungskosten wurden, soweit verfügbar, direkt vom Hersteller bezogen oder über spezifische Richtpreise [ASU11, Zie15] ermittelt. Erlöse setzen sich aus realen und fiktiven Einnahmen zusammen. Reale Einzahlungen ergeben sich aus den gesetzlichen Strom-Einspeisevergütung sowie -mengen entsprechend dem Erneuerbaren-Energie-Gesetz (EEG, Stand 07/2014) bzw. dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG, Stand 07/2014). Als fiktive Einnahmen werden die durch die Eigenstromerzeugung entstehenden Ersparnisse verstanden. Der Saldo aus Einnahmen und Ausgaben (bereinigt um Abschreibungen) bildet den Cash-Flow, welcher als Grundlage zur Ermittlung des Kapitalwertes dient.

Die Berechnung des Kapitalwertes erfolgt anhand der Kapitalwertmethode über Gleichung 4 [Bieg09]

$$C_0 = -A * \sum_{t=0}^{\tau} Z_t(1+i)^{-t} + R_n(1+i)^{-\tau} \quad \text{Gl. 4}$$

- C_0 : Kapitalwert
 A : Investitionsauszahlung
 Z_t : Saldo Ein- und Auszahlungen
 τ : Betrachtungszeitraum
 R_n : Resterlös am Ende der Nutzungsdauer
 i : Kalkulationszinssatz

Der Kalkulationszinssatz i zur Berechnung des Kapitalwertes C_0 wird mittels des WACC-Wertes (Weighted Average Cost of Capital, gewichteter durchschnittlicher Kapitalkostensatz) ermittelt, der sich nach [Bieg09] wie folgt bestimmen lässt:

$$WACC = r_{EK} \cdot \left(\frac{EK}{EK + FK} \right) + r_{FK} \cdot \left(\frac{FK}{EK + FK} \right) \quad \text{Gl. 5}$$

- r_{EK} : Kosten des Eigenkapitals
 EK : Eigenkapital
 FK : Fremdkapital
 r_{FK} : Kosten des Fremdkapitals

Der interne Zinsfuß bezeichnet denjenigen Zinssatz, der beim Abzinsen der Zahlungsüberschüsse Z_t nach der Betrachtungsdauer zu einem Kapitalwert von Null führt. Eine Investition ist immer dann von Vorteil, wenn der interne Zinsfuß über der geforderten Mindestverzinsung liegt. Im Grenzfall (Kapitalwert gleich Null) gilt Gleichung 6 [Pape11].

$$C_0 = \sum_{t=0}^n \frac{Z_t}{(1+i)^t} = 0 \quad \text{Gl. 6}$$

Die Amortisationsdauer gibt den Zeitraum an, in der das Investitionsvorhaben über den Kapitalrückfluss refinanziert wird. Kalkulationszinssfuß und maximale Amortisationsdauer sind Festlegungen des Unternehmers und unterliegen unter anderem einer Risikobewertung.

8 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit wurden alle Investitionsrechnungen, sofern nicht anders beschrieben, mit folgenden Parametern berechnet

- Inflation: 1,6 %
- Kalkulatorischer Zinssatz: 7 %
- Eigenkapitalanteil: 100 %
- Betrachtungszeitraum: 20 Jahre

Die Ergebnisse sind nicht allgemeingültig, sondern Resultat der Simulationsrechnung für den spezifischen Anwendungsfall, dem die realen Verbrauchsdaten des KMU zugrunde liegen.

8.1 Wärmerückgewinnung

In Kapitel 3.2.1 wurden verschiedene Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung dargestellt. Die Wärmerückgewinnung für das Erhitzen der Eisbase kann in drei Varianten erfolgen. Möglichkeit A nutzt durch Reduzierung der Mischertemperatur den vorhandenen Wärmetauscher in seiner aktuellen Einbausituation ohne bauliche Veränderungen. Diese Maßnahme wurde bereits während der Projektlaufzeit umgesetzt, aufgrund eines Defektes am Dampfkessel kann noch keine Aussage über die tatsächliche Reduktion des Wärmebedarfs gemacht werden. Möglichkeit B ist die Einsparung durch Rückhalten der Base in einem Pufferbehälter nach dem Kochprozess zum Erwärmen der Milch der nächsten Charge. Möglichkeit B nutzt durch Reduzierung der Mischertemperatur den vorhandenen Wärmetauscher in seiner aktuellen Einbausituation ohne bauliche Veränderungen. Die maximale Wärmenutzung (Option C) erreicht man durch zusätzliche (zu der Möglichkeit B) Rekuperation der Wärme der CIP-Anlage. Die berücksichtigten Investitionskosten setzten sich jeweils aus einem Behälter, Wärmetauscher, Armaturen und der Verrohrung zusammen. Die maximal erreichbare Energieeinsparung errechnet sich aus den Wärmekapazitäten, für die Abschätzung wurden Wärmeverluste in Höhe von 20 % berücksichtigt.

Tabelle 8: Investitionskosten und Einsparpotenzial an Prozesswärme

Option	Investitionskosten	Energieeinsparung ¹		Verzinsung
		Maximal	Annahme	
A) Reduzierung der Mischertemperatur	0 €	16 %	12,8 %	NA
B) Wärmepuffer Base	35.000 €	54 %	43,2 %	24,2 %
C) Wärmepuffer CIP	35.000 €	80 %	64 %	17,1 %

¹bezogen auf den jeweiligen Wärmestrom

Die resultierende Verzinsung beträgt 24,2 % bzw. 17,1 %, daraus ergeben sich Amortisationszeiten von 4,5 bzw. 7,1 Jahren, so dass aus wirtschaftlicher Sicht beiden Varianten vorteilhaft sind und die Umsetzung beim KMU konkret geprüft werden sollte.

8.2 BHKW zur Abdeckung der elektrischen Basislast

Die Gesamtinvestitionskosten für ein Erdgas-BHKW setzen sich aus mehreren Positionen zusammen, wobei lediglich die Anschaffungskosten für das BHKW abhängig von der Anlagenleistung sind, wie in folgender Tabelle dargestellt ist.

Tabelle 9: Kostenaufstellung BHKW

Position	Kosten
BHKW ¹	3.976,1*(kW _{el}) ^{1-0,2497} [ASU11]
Engineering	10.000 €
Leittechnik	10.000 €
Speicher + Wärmetauscher	25.000 €
Verrohrung	15.000 €
Fundament + Einhausung	10.000 €
Genehmigungen	5.000 €

¹Die bei [ASU11] angegebenen leistungsabhängigen Kosten enthalten Motor, Generator, Schall und Vibrationsdämmung, Wärmetauscher, Katalysator, Schaltschrank, Regelung, Schmierölvor- und entsorgung, Transport, Montage, Inbetriebnahme.

Die Bestimmung des internen Zinsfußes für das BHKW (siehe Abbildung 27) erfolgt entsprechend Kapitel 7. Als Lebensdauer für ein BHKW werden 15 Jahre oder 80.000 Betriebsstunden angenommen. Kosten für die Generalüberholung sowie für Wartungsverträge sind [ASU11] entnommen und wurden bei der Betrachtung berücksichtigt. In Abbildung 27 sind die erforderlichen Investitionskosten und der aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung resultierende Zinsfuß in Abhängigkeit der elektrischen Leistung des BHKW dargestellt.

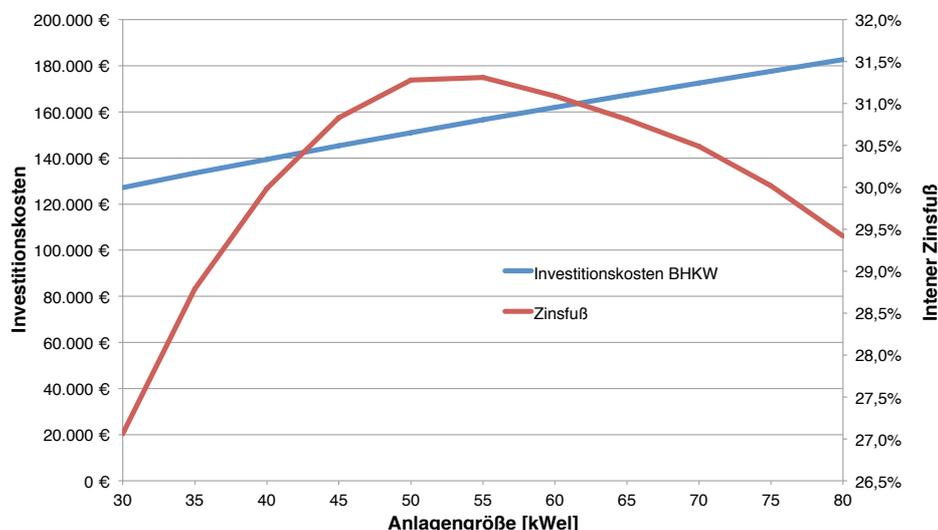


Abbildung 27: Investitionskosten und interner Zinsfuß eines stromoptimierten BHKW

Die größte Verzinsung des Investitionskapitals und damit das wirtschaftliche Optimum ist bei einem 55 kW_{el} BHKW gegeben. Hier wird ein interner Zinsfuß von über 31 % erreicht, die Amortisationszeit beträgt in diesem Fall lediglich 3,5 Jahre.

8.3 Photovoltaik

Analog zur wirtschaftlichen Bewertung des BHKW wurde eine PV-Anlage zur Stromerzeugung betrachtet. [Zie15] gibt für eine schlüsselfertige Photovoltaikanlage spezifische Investitionskosten von 1.240 €/kW_{Peak} an. Die Kosten für die Abgabe nach EEG („Sonnensteuer“) wurden mit 30 % der EEG-Umlage angesetzt.

Für einen Wartungsvertrag wurden pauschal 450 €/a und für Versicherungen 400 €/a veranschlagt. Abbildung 28 stellt die Investitionskosten und den resultierenden internen Zinsfuß in Abhängigkeit der installierten Peak-Leistung dar.

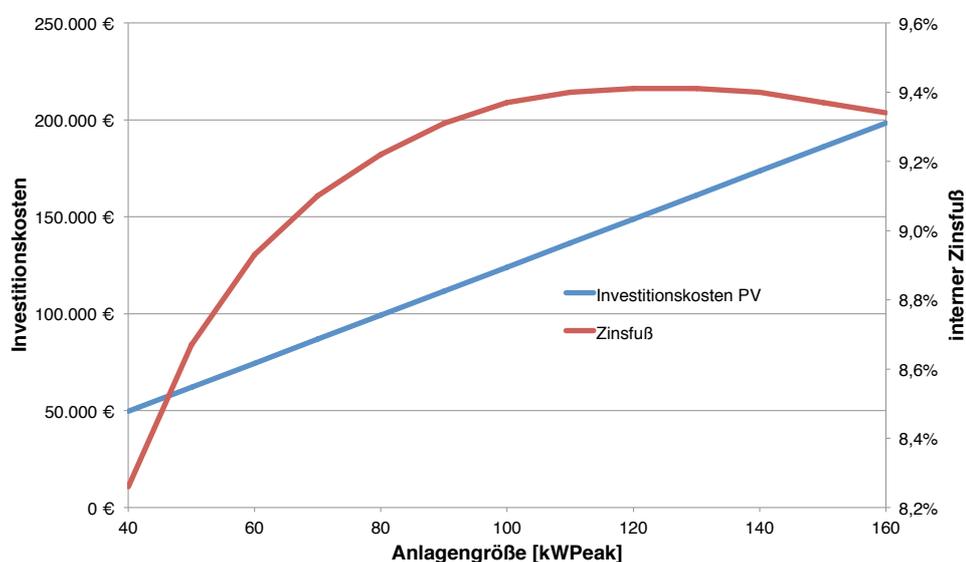


Abbildung 28: Investitionskosten und interner Zinsfuß einer PV-Anlage

Das Dach bietet auf der Sonnenseite ausreichend Platz für PV-Module mit etwa 100 kW_{Peak}. Damit ist die maximal installierbare Leistung geringfügig kleiner als das wirtschaftliche Optimum, welches bei einer PV-Anlagengröße von ca. 120 kW_{Peak} liegt.

Der Einsatz von Photovoltaik ist ökonomisch weniger risikoreich als die anderen hier betrachteten Optionen, da die Baumaßnahmen sich nicht auf den Produktionsbetrieb auswirken. Der kalkulatorische Zins kann demnach niedriger angesetzt werden. Bei einem kalkulatorischen Zinssatz von 5 % beträgt die Amortisierungszeit für eine 100 kW_{Peak} PV etwa 11,6 Jahre.

8.4 BHKW und Photovoltaik

Ausgehend von den Annahmen, die bei der Einzelauslegung eines BHKW und einer 100 kW_{Peak}-PV-Anlage getroffen wurden, wurde überprüft, wie sich die ökonomisch optimale Anlagengröße verschiebt, wenn beide Technologien parallel eingesetzt werden (siehe Abbildung 29).

Die im Vergleich zum alleinigen BHKW-Einsatz deutlich geringeren Werte für den internen Zinsfuß resultiert aus der Mischkalkulation des sehr profitablen BHKW mit der eher langfristigen Investition der PV-Anlage. Die Verschiebung der Kurve des internen Zinsfußes zu kleineren Anlagengrößen im Vergleich zum alleinigen BHKW-Einsatz ist vernachlässigbar klein. BHKW und PV-Anlage beeinflussen sich nicht negativ.

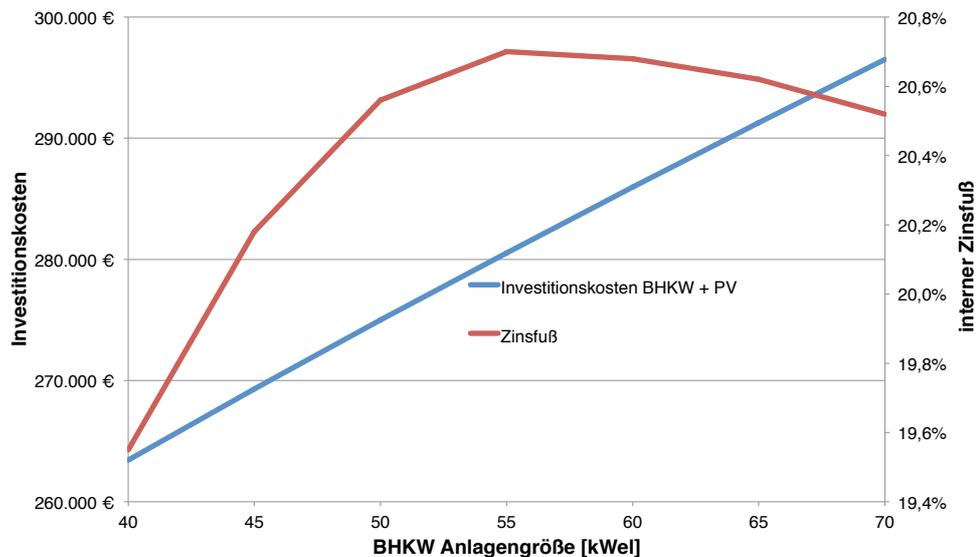


Abbildung 29: Investitionskosten und interner Zinsfuß für den gleichzeitigen Betrieb von BHKW und 100 kW_{Peak}-PV

8.5 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Die tiefste mittels der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung erreichbare Temperatur beträgt - 60 °C. Daraus resultiert, dass der stickstoffgekühlte Tiefkühltunnel nicht durch diese Technologie ersetzt werden kann. Die Tiefkühlager dagegen werden bei - 25 °C betrieben, so dass hier der Einsatz einer Kombination von BHKW und Absorptionskälteanlage möglich scheint.

Die benötigte Größenordnung für die Kälteerzeugung ergibt sich aus der Basislast der aktuell installierten Kompressionskälteanlage von 50 kW_{el}. (s. Abbildung 4). Die KWKK-Anlage erzeugt über das BHKW elektrische Energie, mit der ein Teil der vorhandenen Kältekompressoren weiter betrieben wird, sowie über die Absorptionskälteanlage direkt nutzbare Kälte in Form eines Kühlmittelstroms. Die KWKK wurde so ausgelegt, dass der erzeugte elektrische Strom (Leistung in kW_{el}) zusammen mit der bereitgestellten Kälte (Kühlleistung kW_{Kälte}) insgesamt die bisher benötigte Kühlleistung von 50 kW_{Nutz} ergeben.

Es gibt auf dem Markt keine KWKK-Anlage im Bereich 50 kW_{Nutz} und einer Kühltemperatur, die als ausreichend erachtet werden kann, um die Tiefkühlager auf - 25 °C zu kühlen. KWKK-Anlagen, die die geforderten Temperaturen erreichen, haben Kühlleistungen ab 200 kW [ASU13], kleinere Anlagen erreichen im günstigsten Fall - 25 °C [AGO15]. Da jedoch eine Mindest-Temperaturdifferenz zwischen Kühlmedium und Kühllager von ca. 10 bis 15 °C nötig ist, um die Kühlräume auf die benötigten - 25 °C abzukühlen, sind diese Anlagen nicht verwendbar. Die erstellten und im Folgenden dargestellten Berechnungen dienen an dieser Stelle lediglich dazu, das grundlegende Potenzial einer KWKK abzuschätzen.

Ein 30 kW_{el} BHKW hat einen thermischen Output von etwa 60 kW_{therm}. Auf dem Markt befindliche Absorptionskälteanlagen haben einen Wirkungsgrad bei der Umwandlung von thermischer Leistung des BHKW zu Kälteleistung des Absorbers von ca. 30 bis 40 % [AGO15]. Die Investitionskosten für ein 30 kW_{el} BHKW belaufen sich auf ca. 52.000 € (s. Kapitel 8.2).

Im Folgenden wird darauf eingegangen, welche Kosten für eine Absorptionkälteeinheit inkl. Engineering, Installation etc. anfallen dürfen, um einen ökonomisch sinnvollen Betrieb sicherzustellen. Aufgrund des aktuellen Entwicklungsstandes und des damit verbundenen höheren Investitionsrisikos wird als kalkulatorischer Zinssatz ein Wert von 9 % angenommen.

Abbildung 30 zeigt die aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ermittelte Amortisationsdauer in Abhängigkeit der Investitionskosten.

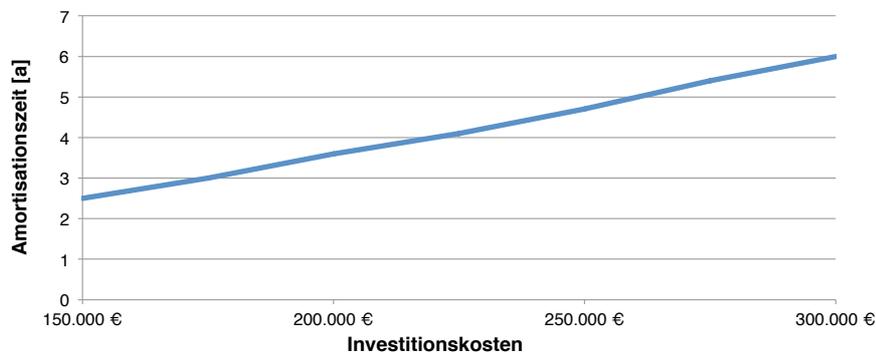


Abbildung 30: Amortisierungszeit der KWKK in Abhängigkeit der Gesamtinvestitionskosten

Die Investitionskosten für eine KWKK-Anlage fallen an für Absorptionseinheit, BHKW, Engineering, Infrastrukturanpassung, etc. Für die kleinste am Markt verfügbare KWKK-Anlage mit $50 \text{ kW}_{\text{Kälte}}$ Absorptionseinheit kann ein Marktpreis von ca. 100.000 € angesetzt werden¹. Wendet man die im Anlagenbau übliche Formel zur Skalierung von Investitionskosten (vergl. Fußnote in Tabelle 9) auf Absorptionsanlagen an, so erhält man Kosten in Höhe von ca. 62.000 €. Dies lässt einen Gesamtpreis von ca. 200.000 € für die gesamte KWKK-Anlage realistisch erscheinen. Damit würde könnte sich die Anschaffung einer solchen KWKK Anlage nach 3,5 Jahren amortisiert haben (s. Abbildung 30). Aufgrund der attraktiven Wirtschaftlichkeit dieser Technologie sollte weiter beobachtet werden, ob Anlagen in der benötigten Leistungs-kategorie bzw. mit den erforderlichen Temperaturniveaus zukünftig am Markt verfügbar sind.

¹ Telefonische Angabe eines Herstellers für KWKK-Anlagen

8.6 Kraft-Wärme-Kopplung in Abhängigkeit der Wärmenutzungsoptimierung

Ein BHKW, das wie in Kapitel 8.2 beschrieben ausgelegt wurde, benötigt Wärmesenken wie die produktionsunabhängige Gebäudeheizung sowie die produktionsabhängigen Wärmeverbraucher (Misch-, Koch- und CIP-Anlage), um die produzierte Wärme zu nutzen und so möglichst hohe Volllastbetriebsstunden zu erreichen. Die Wirtschaftlichkeit des BHKW wird demnach durch wärmetechnische Optimierungen, wie sie in Kapitel 3.2 beschrieben wurden, verschlechtert. Dies spiegelt sich in dem berechneten internen Zinsfuß wieder (Abbildung 31).

Das $55 \text{ kW}_{\text{el}}$ BHKW wird stromoptimiert gefahren und dient hauptsächlich zur Deckung des elektrischen Kühlbedarfs der Tiefkühlager. In kalten Jahreszeiten mit Gebäudeheizungsbedarf kann das BHKW voll ausgenutzt werden, da eine ausreichende Senke für die Abwärme vorhanden ist. In den Sommermonaten kann die Mischanlage, in der die Milch erhitzt wird, genutzt werden, um die vom BHKW produzierte Wärme zu verwerten. Ein zusätzlicher Wärmespeicher, in dem Wärme die nachts produziert wird bis zum nächsten Produktionstag gespeichert wird (s. Abbildung 22), dient in diesem Fall zur Verbesserung der Wärmenutzung und Erhöhung der BHKW-Betriebsstunden. Insgesamt kann ein stromoptimiertes BHKW ca. 5.200 Jahresvolllaststunden und damit rund 60 % des Jahres laufen.

Eine Reduzierung des produktionsabhängigen Wärmebedarfs wirkt sich in den Wintermonaten nur sehr gering auf die Betriebsdauer des BHKW aus, da in der Wintersaison die Gebäudeheizung als Wärmesenke genutzt wird. Auch in den Sommermonaten kann durch die Integration des Wärmespeichers der geringere Grundbedarf an Wärme auch teilweise kompensiert werden, so dass auch hier noch attraktive Renditen erzielt werden können (s. Abbildung 31).

Die Amortisierungszeit bewegt sich hier zwischen 3,3 (KWKK inkl. Wärmeeinsparung 12,8 %) und 4,2 Jahren (KWKK inkl. Wärmeeinsparung von 64 %).

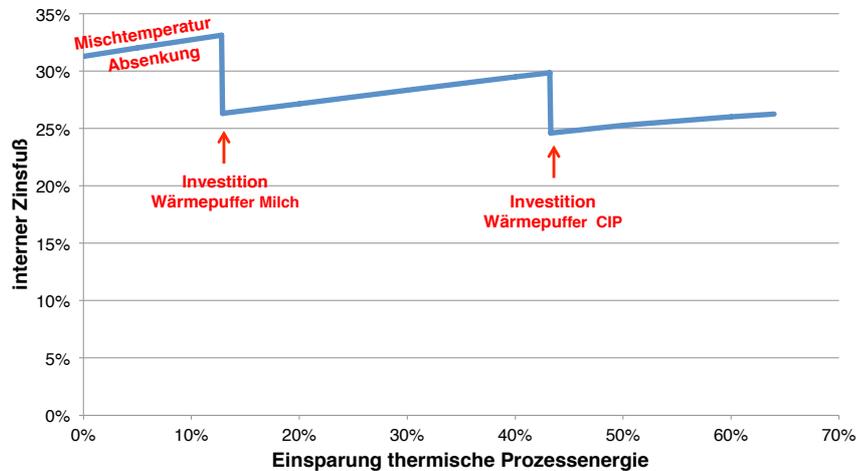


Abbildung 31: Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit des BHKW in Abhängigkeit der Prozesswärme-Einsparung

8.7 Wärmegeführtes BHKW

Ein wärmegeführtes BHKW stellt die Wärme, die für das Eismischen und Kochen benötigt wird, bedarfsgerecht zur Verfügung. Die Jahresbetriebsdauer ist im vorliegenden Fall mit etwa 2100 h/a jedoch relativ gering, eine Ausweitung der Produktion mit einer erhöhten Zahl an Produktivtagen würde diese Problematik entschärfen. Der resultierende Zinsfuß für ein wärmegeführtes BHKW ist dementsprechend stark von der Produktionsmenge abhängig. Dies zeigt sich auch beim Vergleich der Betriebsjahre 2012 und 2014. Ein 200 kW_{el} BHKW verzinst sich aufgrund der Simulationsdaten von 2014 mit etwa 30 %. Das gleiche BHKW verzinst sich mit den 20 % weniger Arbeitstagen im Jahr 2012 nur noch mit etwa 15 %.

Die wärmegeführte Betriebsweise konkurriert direkt mit den empfohlenen Energieeinsparungen wie sie in Kapitel 3.2.1 beschrieben sind. Die Amortisierungszeit des BHKW steigt mit den umgesetzten Maßnahmen zur Optimierung des Wärmeverbrauches stark an (s. Abbildung 32), die Verzinsung sinkt mit steigender Wärmerückgewinnung, auf 9,5 % im Falle der Wärmepufferung von Milchbase und CIP.

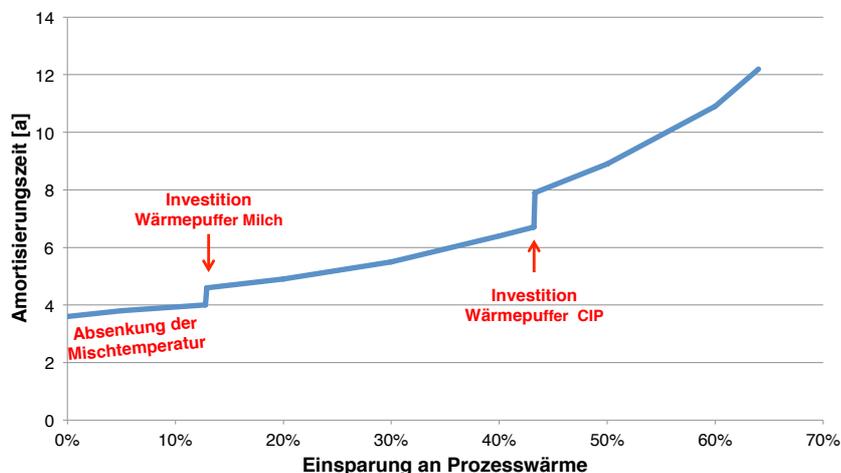


Abbildung 32: Amortisierungszeit wärmegeführtes BHKW inkl. Wärmeeinsparung

Diese Konkurrenz von einzeln betrachtet sinnvollen Maßnahmen führt dazu, dass im vorliegenden Anwendungsfall das BHKW stromgeführt ausgelegt werden sollte, um den wirtschaftlichen Nutzen zu maximieren.

9 Ökologische Bewertung

Die folgende Tabelle 10 gibt einen Überblick über die betrachteten Maßnahmen und deren möglichen Kombinationen. Neben den wirtschaftlichen Aspekten der Investitionskosten, des internen Zinsfußes, des kalkulatorischen Zinsfußes sowie des Kapitalwertes (s. Kapitel 7) wurden mit den Werten aus Tabelle 4 die jährlichen CO₂-Ersparnisse berechnet. Weiterhin werden die spezifischen CO₂-Vermeidungskosten angeführt.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Maßnahmen mit ökologischer Bewertung

	Investitions- kosten	Interner Zinsfuß	Kalkulatorischer Zinssatz	Kapitalwert	Amortisations- zeit [Jahre]	Einsparung CO ₂ Äquivalent [t CO ₂ /a]	Euro / kg CO ₂ *a
Absenkung Mischertemperatur	- €	NA	NA	NA	NA	15,6	-
Wärmpufferung Milch	35.000 €	24,2%	7%	51.000 €	4,8	52,6	0,7
Wärmpufferung (Milch u. CIP)	70.000 €	17,1%	7%	57.500 €	7,1	78,3	0,9
KWKK (50kW _{Nutz}) ^{1,2}	ca. 200.000 €	32,3%	9%	337.000 €	3,6	172,4	1,2
Wärmpufferung + Stromoptimiertes BHKW (55kW _{el})	226.500 €	26,2%	7%	329.000 €	4,2	139,1	1,6
Absenkung Mischertemperatur + Stromoptimiertes BHKW (55kW _{el})	156.500 €	33,1%	7%	306.500 €	3,3	93,9	1,7
Wärmpufferung Milch + Stromoptimiertes BHKW (55kW _{el})	191.500 €	29,9%	7%	331.000 €	3,7	115,3	1,7
Wärmeoptimiertes BHKW (200kW _{el}) + KWKK (50kW _{Nutz}) ^{1,2}	431.000 €	29,6%	8%	682.000 €	3,8	264,5	1,7
PV (100kW _{Peak}) + Stromoptimiertes BHKW (55kW _{el}) + Wärmpufferung	350.500 €	19,8%	7%	338.500 €	5,8	187,8	1,9
Photovoltaik (100kW _{Peak})	124.000 €	9,4%	5%	46.000 €	11,6	50,4	2,5
Stromoptimiertes BHKW (55kW _{el})	156.500 €	31,3%	7%	282.500 €	3,5	62,8	2,5
Wärmeoptimiertes BHKW (200kW _{el})						96,8	2,5
PV (100kW _{Peak}) + Stromoptimiertes BHKW (55kW _{el})	280.500 €	20,7%	6%	280.500 €	8	111	2,5
Stromoptimiertes BHKW (55kW _{el}) + Wärmeoptimiertes BHKW (200kW _{el})	395.000 €	21,6%	7%	411.500 €	5,1	112,9	3,5

¹KWKK nicht am Markt verfügbar; Kostenschätzung durch Herabskalieren von Großanlagen

²Die Nutzleistung der KWKK setzt sich aus der elektrischen Leistung des BHKWs und der Kälteleistung der Absorptionsanlage zusammen.

Wie Tabelle 10 gelesen wird hängt vom hauptsächlichsten Interesse des Beurteilenden ab.

Für die ökonomische Bewertung verschiedener Investitionsmöglichkeiten wird oftmals der Kapitalwert nach einem bestimmten Betrachtungszeitraum (hier: 20 Jahre) als Charakteristikum betrachtet. Ein hoher interner Zinsfuß bei niedriger Investitionssumme ergibt am Ende einen mäßigen Gewinn, während gemäßigt erscheinende Zinssätze bei höheren Investitionssummen am Ende einen hohen Ertrag bringen können. Obige Berechnungen entstanden unter der Randbedingung der 100%igen Eigenfinanzierung sowie der weitgehend selbst durchzuführenden Planungsarbeiten. Bei Abweichung von diesen Randbedingungen werden deutlich höhere Investitionssummen bzw. längere Amortisierungsdauern die Folge sein.

Zu beachten ist weiterhin, dass die Zahlen zur KWKK zwar eine plausible, aber fiktive Abschätzung sind, da die Technik in der geforderten kleinen Leistungsklasse aktuell nicht auf dem Markt erhältlich ist. Sie wurden trotzdem in die Betrachtungen aufgenommen, um das interessante Potenzial zu verdeutlichen. Die hohen Einsparungen an CO₂ liegen am hohen Stromeinsparpotenzial bei der Kühlung.

10 Fazit und Empfehlungen für das KMU

Die Erkenntnisse aus obigen Betrachtungen lassen sich zu folgenden Handlungsempfehlungen für das KMU zusammenfassen:

1. Die verschiedenen Maßnahmen zur Wärmeinsparung im Produktionsprozess erfordern nur geringe Investitionskosten und schmälern die Wirtschaftlichkeit anderer Erweiterungen i. d. R. nur geringfügig¹. Diese Maßnahmen sollten prioritär umgesetzt werden. Der erste Schritt (Anpassung der Mischertemperatur) ist bereits während der Projektlaufzeit gemacht worden.
2. Die Investitionskosten eines stromoptimierten BHKW mit etwa 55 kW_{el} scheinen für ein prosperierendes KMU durchaus tragbar und aufgrund der schnellen Amortisation auch angeraten. Hierfür sollten mehrere konkrete Angebote eingeholt und technisch und wirtschaftlich geprüft werden.
3. Photovoltaik ist sowohl aus technologischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht eine weitgehend sichere aber auch recht langfristige Investition. Der Ausbau einer PV-Anlage auf dem Hallendach kann vermutlich auch sukzessive erfolgen, um die Kapitalbindung zu reduzieren und z. B. in Niedrigzinszeiten Kapital anzulegen.
4. Das Marktangebot an kleinen KWKK-Anlagen sollte beobachtet werden.
5. Ein 200 kW_{el} wärmegeführtes BHKW verspricht einen hohen Kapitalwert, die Wirtschaftlichkeit verschlechtert sich jedoch durch die empfohlenen Wärmeeinsparmaßnahmen mittels Rekuperator drastisch und wird deshalb nicht empfohlen.

¹Die Ausnahme ist das wärmegeführte BHKW, wie in Kapitel 8.7 erläutert.

Die dezentrale Kälteerzeugung für das Schockgefrieren mit einer (inversen) Stirling-Maschine ist energetisch vorteilhaft (Einsparung um 50 %), aber im betrachteten Einzelfall durch die schicht- und saisonbedingte Teilauslastung nicht wirtschaftlich zu realisieren (Amortisationsdauer über 20 Jahre). Der ursprüngliche Ansatz, mit regenerativem Strom zu Überschusszeiten N_{2,lq} auf Vorrat zu produzieren, entfällt aus dem gleichen Grund.

Photovoltaik ist als regenerative Energie mit kleineren Einschränkungen zu empfehlen. Aktuelle Biogas- und Windenergieprojekte, die für eine gemeinsame Projektentwicklung in Frage kämen, sind nicht in örtlicher Nähe vorhanden. Zur Verbesserung der Ökobilanz besteht jedoch die Möglichkeit, „grünen“ Strom oder „grünes“ Gas einkaufen. Der Einsatz regenerativer Wärmequellen wie Geo- oder Solarthermie verhindert den effektiven Betrieb eines BHKW, der auf einer Nutzung der Abwärme beruht, und entfällt somit aufgrund dieser Konkurrenzsituation.

Für die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung sind beachtliche ökonomische und ökologische Vorteile erkennbar. Es bleibt abzuwarten, wann die benötigten kleineren Anlagen am Markt verfügbar sind.

Es zeigt sich, dass Produktionstage mit höheren spezifischen Energieverbräuchen durch eine hohe Anzahl von Produktwechseln gekennzeichnet waren. Die damit verbundenen Maschinenstillstände können durch eine geeignete Produktionsplanung vermieden oder zumindest reduziert werden. Zur Vermeidung dieser höheren Verbräuche genügt das Einhalten weniger Regeln wie das Vermeiden von kurzen Produktivzeiten unter 14 h/a und von Produktwechseln. Bei der Umsetzung dieser Regeln ist zu beachten, dass dies geschehen muss, ohne den Anteil an hocheffizienten Arbeitstagen (mit wenig Produktwechseln) wesentlich zu reduzieren. Diese scheinbar widersprüchlichen Anforderungen lassen sich lösen, wenn kleine Chargen nicht „on demand“ unter häufiger Störung des Arbeitsablaufs hergestellt werden, sondern in einer Mindestmenge. Der momentane Überschuss wird eingelagert. Ebenso ist es sinnvoll, kurze Produktionstage zu vermeiden, zum Beispiel indem häufig geordnete Eissorten auf Lager produziert werden.

Literaturverzeichnis

- [AGO15] AGO AG Energie + Anlagen, Webseite: www.ago.ag (abgerufen: März 2015)
- [Asc13] Aschmann, V: Biogas-BHKW in der Praxis Wirkungsgrade und Emissionen, DMK Biogastagung 2013
- [ASU11] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE): BHKW Kenndaten 2011, Essen 2011
- [ASU13] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE): Marktübersicht Gaswärmepumpen 2013
- [Cai03] Caillet, A. et al: Lebensm.-Wiss. U.-Technol. 36 (2003) 743-749
- [Gen13] Centre for LowCarbon Futures: Liquid Air in the energy and transport systems, 2013, ISBN 978-0-9575872-2-9
- [Fay01] Faydi, E. et al: Journal of Food Engineering 48, 2001, 283-291
- [IIN15] Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien (IINAS), Webseite: <http://www.iinas.org/gemis-de.html> (abgerufen: Februar 2015)
- [JRC12] European Commission, Joint Research Centre/Institute for Energy, Renewable Energy Unit, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), letztes Update 10. Februar 2012, Webseite: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>
- [KWK12] Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, KWK-Ratgeber 2012, Webseite: <http://www.umwelt.niedersachsen.de/download/73296>
- [LBS13] U. Albrecht, M. Altmann, J. Michalski, T. Raksha, W. Weindorf: „Analyse der Kosten Erneuerbarer Gase“, Eine Expertise der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Bochum 12/2013
- [Sti15] Stirling Cryogenics, Firmenprospekt zu 1 Stage-Cryocoolers, Webseite: www.stirlingcryogenics.com, (abgerufen: März 2015)
- [Tek15] Tekadoor, Firmenprospekt zu Luftschleieranlagen Abgerufen März 2015, Webseite: http://www.tekadoor.de/pdf/tekadoor_pdf3.pdf
- [VDI12-1] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI Richtlinie 2067 – Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, VDI Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik 2012.
- [VDI12-2] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI Richtlinie 6025 – Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen, VDI Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik 2012.
- [Wik15] Seite „Carnot-Wirkungsgrad“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 11. Oktober 2014, Webseite: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Carnot-Wirkungsgrad&oldid=134800923> (abgerufen: März 2015)
- [Zie15] PhotovoltaikZentrum – Michael Ziegler, Webseite: www.photovoltaik-guide.de, (abgerufen: Februar 2015)