



Diplomarbeit

Integrationskonzepte innovativer Technologien in industriellen Energiesystemen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing oder DI)
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaft
von

Ing. Klaus ETZL BSc

Matr.Nr. 01125578

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. René Hofmann

Institut für Energietechnik und Thermodynamik, E302

und

Dipl.-Ing.ⁱⁿ Sophie Panuschka

Austrian Institute of Technology - Center for Energy

.....
Ing. Klaus Etzl BSc

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, im Juni 2019

.....

Ing. Klaus Ettl BSc

Kurzfassung

Zur Einschränkung der globalen Erwärmung und deren Folgen ist eine Energiewende unausweichlich. Um diese umzusetzen, ist der Einsatz erneuerbarer Energien und eine ressourcenschonende Nutzung von Energie nötig. Speziell zur Verbreitung erneuerbarer Energien sind Energiespeicher infolge von Last- und Erzeugungsfluktuationen unumgänglich. Diese Diplomarbeit zeigt mit der Anwendung innovativer Wärmespeicher eine Lösung bevorstehender Fragestellungen in der Energieversorgung.

Dafür wird zuerst eine umfangreiche Literaturrecherche über die Energiesituation in verschiedenen österreichischen Industriesparten durchgeführt. Hierzu werden grundlegende Prozesse in der Industrie vorgestellt und mit aussagekräftigen Energiekennzahlen ergänzt. Aus dieser Evaluation wurden zwei Energiequellen und ein Energieabnehmer für die abschließende Berechnung des Wärmespeichers gewählt. Zum einen dienen Abwärme aus der Stromproduktion bzw. erneuerbare Energie als Energiequellen und die Sauerstoff-Entlignifizierung aus der Papierindustrie als Energieabnehmer.

Als Energieeffizienzmaßnahme bei Produktionsprozessen werden in dieser Arbeit latente und sensible thermische Energiespeicher vorgestellt. Eine Recherche zum State of the Art soll, neben dem aktuellen Entwicklungsstand, deren Anwendbarkeit für Industrieprozesse zeigen. Da neben der technischen Machbarkeit auch die Kosten einer solchen Investitionen von großer Bedeutung sind, werden verschiedene Methoden zur Investitionsrechnung vorgestellt und bewertet.

Um die Plausibilität einer Speicherintegration in der Industrie zu zeigen, wird für den Entlignifizierungsbetrieb die Installation eines kapazitiven Feststoffspeichers und zwei verschiedener Latentwärmespeicher geplant. Die Betriebskennzahlen und Dimensionierung der

Speicher werden in einer MathCAD-Berechnung ausgelegt. Daraus können die Investitionskosten der Wärmespeicher ermittelt werden. Um die ökonomische Relevanz dieser Investition zu prüfen, werden die Investitionen mittels Kapitalwertmethode über die Laufzeit abgezinst und unter verschiedenen Betriebsbedingungen berechnet und verglichen. Diese Berechnungen ermöglichen Unternehmen und Investoren die Entscheidungsfindung über Investition oder Nichtinvestition.

Abstract

To limit global warming and its consequences an energy revolution is absolutely essential. In order to implement an energy transition it is necessary to use renewable energies and to provide a resource saving use of energy. Therefore, energy storages are crucial in order to increase the percentage of renewable energy. This thesis is trying to develop an answer to the upcoming questions within the field of energy supply by exploring the possible application of innovative heat storages.

In order to achieve this goal a comprehensive literature research of the energy situation in various Austrian branches of industry was carried out. Fundamental processes of the industry are presented and connected with recent data of available energy figures. Within this evaluation the oxygen delignification process of the pulp and paper industry was selected as an example and was used for further calculations.

In addition, latent and thermal heat storages are presented: beginning with a survey of their current state of the art, which is followed by an analysis of their applicability to industrial processes. Due to the necessity of profitability of such investments various techniques of investment accounting are presented and evaluated.

In order to demonstrate the efficiency of storage integration three installations of heat storages are drafted by taking into account various energy sources. Operating figures and detailed dimensioning are processed in a MathCAD calculation. The outcome of this calculation can be used to determine investment costs. To check the economic relevance of a possible investment the investment costs will be calculated over lifetime using the net present value method. These calculations are done with different operating conditions to provide entrepreneurs with an economic base in their decision-making process.

Danksagung

Besonders danken möchte ich meiner Betreuerin Dipl.-Ing.ⁱⁿ Sophie Panuschka für die laufende Unterstützung und die vielen guten Hilfestellungen. Zusätzlich möchte ich mich bei Univ.Ass. Dipl.-Ing. Martin Koller bedanken. Von ihm habe ich zu Beginn der Arbeit wertvolle Ratschläge erhalten, durch die ich viel dazu gelernt habe.

Ein großer Dank gilt Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. René Hofmann, der mir die Diplomarbeit am Institut für Energietechnik und Thermodynamik ermöglicht hat und mir mit umfangreichem Fachwissen zur Seite stand.

Ein besonderes Dankeschön gilt meinen Eltern, die mich während des ganzen Studiums unterstützt haben und somit diese Ausbildung ermöglicht haben.

Außerdem bedanke ich mich bei meinem Korrekturleser Dr.med. Burghard Hannig für die investierte Zeit.

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
aCAES	Druckluftspeicher adiabat
adt	air dry ton
AISI	American Iron and Steel Institute
atm.	atmosphärisch
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	computer aided design
CAPEX	capital expenditures
CF	cash flow
CH ₄	Methan
CHF	Schweizer Franken
cip	cleaning in place
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlendioxid
d	Tag(e)
dCAES	Druckluftspeicher diabat
EE	erneuerbare Energien
EG	expandierter Graphit
eu	Eutektikum
EU-28	Europäische Union der 28 Mitgliedstaaten
fm	Festmeter

Gew.-%	Gewichtsprozent
GJ	Gigajoule
GWh	Gigawattstunden
h	Stunde(n)
H ₂	Wasserstoff
hl	Hektoliter
H-Milch	Haltbarmilch
HTF	heat transfer fluid
HTST	high temperature, short time
IHK	Industrie- und Handelskammer
J	Joule
kg	Kilogramm
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
kPa	Kilopascal
kW	Kilowatt
l	Liter
LCOE	Levelized Cost of Electricity
LCOS	Levelized Cost of Storage
Li-Ion	Lithium-Ionen
m	Meter
max.	maximal
MD	Mitteldruck
min	Minute(n)
Mio.	Millionen
MS	Microsoft
Mwh/t	Megawattstunden pro Tonne
N/A	not available
NPV	net present value
OPEX	operational expenditures
ORC	Organic Rankine Cycle
PCM	phase change material

PSH	pumped storage hydroelectricity
PV	present value
s	Sekunde(n)
SP	Schmelzpunkt
spez.	spezifisch(e)
ton	Tonne(n)
u.	und
UHT	ultrahocherhitzt
Pb	Blei
VDI	Verein deutscher Ingenieure
VÖZ	Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie
VRF	Vanadium-Redox-Fluss
WRG	Wärmerückgewinnung
WT	Wärmetauscher
z.B.	zum Beispiel

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufbau der Arbeit	2
1.2	Energiebilanz in Österreich	3
2	Branchenanalyse	6
2.1	Glasindustrie	7
2.1.1	Regionale Produktion und wichtige Erzeugnisse	7
2.1.2	Glasherstellung	8
2.1.3	Energiekennzahlen	11
2.1.4	Wärmenutzung	15
2.1.5	Potentiale	15
2.1.6	Besonderheiten der Glasindustrie	16
2.2	Nahrungsmittelindustrie: Bier	17
2.2.1	Regionale Produktion und wichtige Erzeugnisse	17
2.2.2	Der Brauvorgang	17
2.2.3	Biersorten	19
2.2.4	Energiekennzahlen	20
2.2.5	Wärmenutzung	24
2.2.6	Potentiale	28
2.2.7	Besonderheiten der Brauindustrie	28
2.3	Nahrungsmittelindustrie: Fleisch	30
2.3.1	Regionale Produktion und wichtige Erzeugnisse	30
2.3.2	Fleischverarbeitung in der Schlachtstraße	31

2.3.3	Energiekennzahlen	33
2.3.4	Wärmenutzung	36
2.3.5	Potentiale	37
2.3.6	Besonderheiten der Fleischindustrie	39
2.4	Nahrungsmittelindustrie: Milch	40
2.4.1	Regionale Produktion und wichtige Erzeugnisse	40
2.4.2	Milchverarbeitung	40
2.4.3	Energiekennzahlen	44
2.4.4	Wärmenutzung	49
2.4.5	Potentiale	50
2.4.6	Besonderheiten der Milchindustrie	51
2.5	Papierindustrie	52
2.5.1	Regionale Produktion und wichtige Erzeugnisse	52
2.5.2	Verfahren	52
2.5.3	Energiekennzahlen	57
2.5.4	Potentiale	65
2.5.5	Besonderheiten der Papierindustrie	66
2.6	Zementindustrie	67
2.6.1	Regionale Produktion und wichtige Erzeugnisse	67
2.6.2	Verfahren	68
2.6.3	Energiekennzahlen	70
2.6.4	Wärmenutzung	73
2.6.5	Potentiale	74
2.6.6	Besonderheiten der Zementindustrie	75
3	Thermische Energiespeicher	76
3.1	Speichieranwendung	77
3.2	Sensible Speicher	78
3.2.1	Heißwasserspeicher	80
3.2.2	Flüssigsalze	80

3.2.3	Feststoffspeicher	81
3.3	Latentwärmespeicher	85
3.3.1	Phasenübergang flüssig-gasförmig	87
3.3.2	Phasenübergang fest-fest	88
3.3.3	Phasenübergang fest-flüssig	89
3.4	Performance	89
3.5	Speicherauswahl	97
4	Ökonomische Grundlagen	98
4.1	Investitionsrechnung	99
4.1.1	Grundlagen	99
4.2	Wirtschaftliche Grundlagen der Speicher	103
4.2.1	Kommerzielle Grundlagen	103
4.2.2	Levelized Cost of Storage	105
4.2.3	LCOS einer Lithium-Ionen-Batterie	107
4.2.4	LCOS aktueller Technologien	108
4.3	Pinchanalyse	109
4.3.1	Grundlagen	109
4.3.2	Durchführung	109
4.3.3	Optimierung durch Supertargeting	113
5	Technische und wirtschaftliche Berechnungen	115
5.1	Auslegung	116
5.1.1	Latentwärmespeicher 1: PCM-Sandwich mit EG	117
5.1.2	Latentwärmespeicher 2: Dampfspeicher	120
5.1.3	Sensibler Wärmespeicher	123
5.2	Ergänzende Berechnungen	126
5.3	Wirtschaftlichkeitsanalyse	126
5.3.1	Berechnung Fall 1	128
5.3.2	Ergebnistabelle und Zwischenfazit der Fälle 1-13	130
5.3.3	LCOS	131

6	Schlussfolgerungen und Ausblick	133
A	Anhänge für Kapitel 1 und 2	154
B	Anhänge für Kapitel 5, Teil 1	157
C	Anhänge für Kapitel 5, Teil 2	175

Kapitel 1

Einleitung

Der Klimawandel und die globale Erwärmung bekommen in der breiten Bevölkerung immer mehr Aufmerksamkeit. Laut einer Veröffentlichung des Intergovernmental Panel on Climate Change wird die globale Erwärmung durch Treibhausgase – mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit – zu mehr als 50% vom Menschen verursacht [78]. Um die Folgen des Klimawandels zu vermeiden, wurden bereits politische Entscheidungen getroffen und 1995 wurden mit dem Kyoto-Protokoll erstmals völkerrechtlich bindende Obergrenzen für Treibhausgasemissionen festgelegt. Weiters gibt es in allen Ländern der europäischen Union Absichten, die Emissionen zu reduzieren und den Anteil an erneuerbaren Energien bereits in den nächsten Jahren weiter zu erhöhen. Ein bekanntes Beispiel innerhalb der EU ist wohl der Emissionshandel mit CO₂-Zertifikaten. Die Richtlinien des EU-Emissionshandels sehen für Österreich bis zum Jahr 2030 eine Absenkung des CO₂-Ausstoßes von fast 40% gegenüber dem Jahr 1990 vor. Mit diesem Gesetz muss jeder betroffene Betrieb für jede Tonne emittiertes CO₂ ein Zertifikat besitzen. Großteils werden die Zertifikate EU-weit verteilt und ein zunehmender Teil wird versteigert. [75]

In Österreich wurde dazu im Jahr 2010 vom Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (2018: Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort) die „Energiesstrategie Österreich 2020“ festgelegt. Diese sieht vor, dass bis zum Jahr 2020 die Energieeffizienz gegenüber dem Jahr 2008 um 20% gesteigert und der Anteil erneuerbarer Energien auf 34% erhöht werden soll. Die Treibhausgase für Sektoren im Emissionshan-

delssystem sind gegenüber dem Jahr 2005 um 21% und für Sektoren die nicht im Emissionhandelssystem liegen um 16% zu vermindern [11]. Für Unternehmen ist die Umsetzung dieser Anforderungen von Vorteil, da sich durch Investitionen in innovative Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz oft auch monetäre Vorteile ergeben.

Um die geforderten Einsparungen umzusetzen, bekommen innovative Energieeffizienzmaßnahmen in der Industrie immer größere Bedeutung. Im komplexen System der Energieversorgung ist der Einsatz thermischer Energiespeicher von großer Bedeutung. Groß sind jedoch die Hemmnisse für Unternehmen, tatsächlich in die besagten Maßnahmen zu investieren. Zum einen sind die Energieströme in einem Unternehmen nicht vollständig bekannt, bzw. wurden erst gar nicht vollständig erfasst. Das erfordert zu Beginn eine Evaluation der Fertigungsverfahren in verschiedenen industriellen Sparten, um Komponenten mit Einsparpotential zu erkennen. Zum Anderen ist die Umsetzung der Maßnahmen oft mit hohen Kosten verbunden und kann dem Unternehmer sogar teurer kommen als eine Nichtinvestition. Dies erfordert eine Wirtschaftlichkeitsrechnung um Investitionen zu bewerten und zu vergleichen.

1.1 Aufbau der Arbeit

Durch eine Auswertung der Gesamtenergiebilanz der Statistik Austria sollen die größten Verbraucher von Strom und Wärme im produzierenden Gewerbe in Österreich ausfindig gemacht werden. Auf Basis der Bilanz erfolgt eine Branchenanalyse (Kapitel 2) der relevanten produzierenden Industriesektoren in Österreich. Diese Darstellung soll dem Leser einen schnellen Einblick und eine gute Übersicht über die in der österreichischen Industrie relevanten Verfahren und Zusammenhänge geben, welche für den Einsatz neuer Techniken zur Energieeffizienzoptimierung besonders interessant sind. Der Fokus dieser Diplomarbeit liegt auf der Situation in Österreich. Bei mangelhaften heimischen Daten wird auf internationale Literatur zurückgegriffen. In jedem analysierten Industriesektor werden wiederum die energieintensivsten Produktionsbereiche eruiert, um gezielt jene Teilprozesse mit dem größten Energiesparpotential abzudecken. Am Ende der Industrie-Evaluation jeder Branche wird ein Ausblick auf mögliche Energieeffizienzpotentiale gegeben.

Anschließend folgt eine Einführung über den Stand der Technik thermischer Energiespeicher (Kapitel 3), welche als innovative Technologien zur Energieeffizienzsteigerung eingesetzt werden. Neben einer Übersicht verschiedener Technologien werden auch die typischen Funktionsweisen und die Werte spezifischer Kennzahlen angeführt. Die Eignung der wichtigsten Speicher wird für gegebene Industrieanwendungen genauer untersucht.

Um Potentiale nicht nur von der technischen, sondern auch von der für Unternehmer interessanten wirtschaftlichen Seite zu betrachten, folgt schließlich ein Überblick über relevante Wirtschaftlichkeitstools zum Bewerten verschiedener Effizienzmaßnahmen (Kapitel 4). Hierzu werden wichtige Techniken in der Investitionsrechnung und die Berechnung der Stromgestehungskosten für Speicher vorgestellt. Außerdem wird die Pinchanalyse beschrieben, welche neben den hier verwendeten Energieeffizienzmaßnahmen alternativ angewendet werden kann.

Schließlich werden aus den Erkenntnissen der Recherche thermische Speicher für mögliche Anwendungen ausgelegt (Kapitel 5). Dazu werden für zwei verschiedene Energiequellen, je drei unterschiedliche Speicher herangezogen und für eine Wärmesenke in der Industrie dimensioniert. Aufbauend auf diese technische Auslegung wird auch die Wirtschaftlichkeit solcher Investitionen für Unternehmen untersucht. Hierfür werden verschiedene Szenarien berechnet und verglichen. Am Ende werden die Ergebnisse in einer Schlussfolgerung zusammengefasst und es wird ein Ausblick über mögliche zukünftige Arbeiten gegeben (Kapitel 6).

Um eine gute Lesbarkeit zu ermöglichen, werden die Werte der Energie mit der Einheit [Wh] angegeben, sofern es möglich und sinnvoll ist. Einige der im folgenden Dokument genannten [Wh]-Werte wurden dazu berechnet, da die Energie in der vorliegenden Literatur häufig in [J] angegeben wurde.

1.2 Energiebilanz in Österreich

Auf Basis des Gesamtenergieverbrauches soll entschieden werden, welche produzierende Industriesektoren in dieser Arbeit betrachtet werden. Zur Ermittlung der energieintensiven Industrien wird die Gesamtenergiebilanz der Statistik Austria herangezogen [4]. Um einen

repräsentativen Mittelwert zu erhalten, werden die Daten aus den letzten fünf Jahren gemittelt. Da zum Zeitpunkt der Erstellung noch keine Daten für 2017 verfügbar waren, wurden die Zahlen von 2011 bis 2016 herangezogen.

In den Jahren 2011 bis 2016 lag der energetische Endverbrauch in Österreich bei durchschnittlich 302.380 GWh (1.088.568 TJ), wobei ein knappes Drittel für das produzierende Gewerbe aufgewendet wurde und dieses somit der zweitgrößte Energiekonsument ist. Nach Abbildung 1.1 verbraucht der Verkehrssektor ebenfalls etwa ein Drittel des Gesamtenergiebedarfs; der Rest wird für private Haushalte, öffentliche und private Dienstleistungen und die Landwirtschaft aufgewendet.

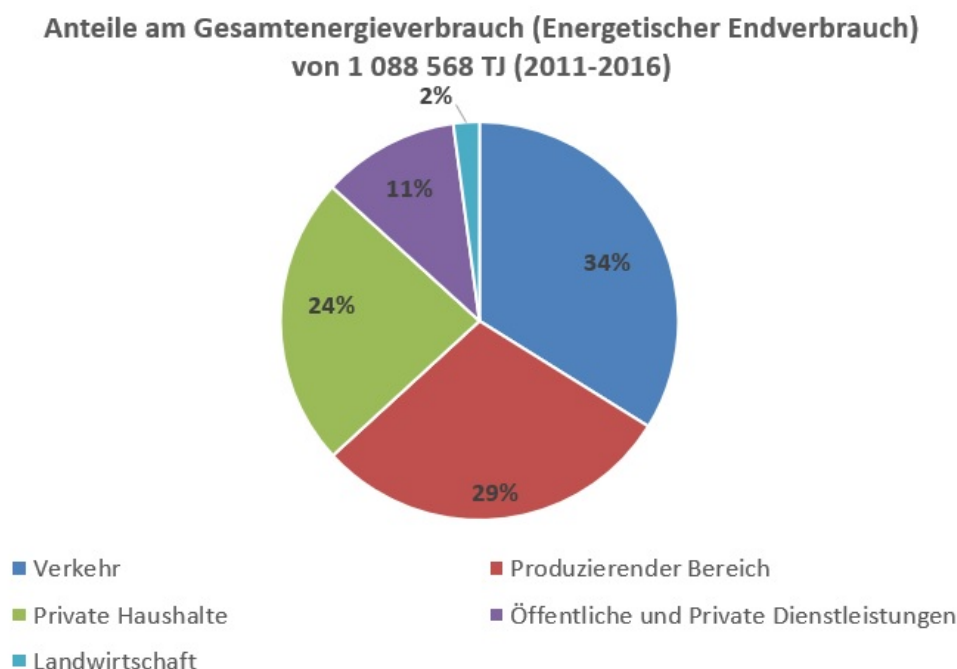


Abbildung 1.1: Gesamtenergiebilanz nach Sektoren (eigene Darstellung)

Abbildung 1.2 zeigt eine Aufschlüsselung der Energieverbrauchsanteile innerhalb des produzierenden Gewerbes. Eine tabellarische Aufstellung dieser Grafik mit Werten ist dem Anhang A zu entnehmen. Mit 22% ist die Papier- und Druckindustrie in Österreich der größte Energiekonsument, gefolgt von der chemischen und petrochemischen Industrie. Weiters folgen die Steine-, Erden- und Glasindustrie und die Eisen- und Stahlindustrie, wobei die genannten vier Industrien bereits mehr als die Hälfte des Gesamtenergiebedarfs im produzierenden Bereich verbrauchen. Aufgrund dieser Daten soll im Folgenden die Glas-, Papier-,

Anteile am produzierenden Bereich nach Branchen

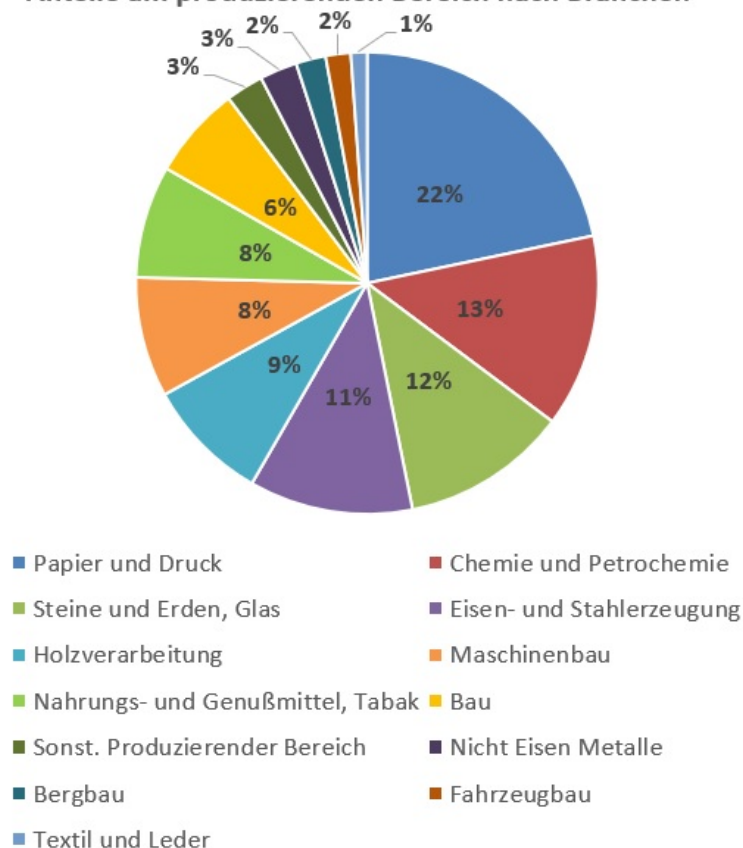


Abbildung 1.2: Gesamtenergiebilanz nach Branchen (eigene Darstellung)

und Zementindustrie behandelt werden. Die energieintensiven Branchen Chemie, Petrochemie, Stahl und Eisen werden nicht behandelt, da sie im Zuge dieser Arbeit zu umfangreich sind. Behandelt werden im Folgenden hingegen die Brauereien, Fleischereien und Molkereien, da diese Branchen bei Energieeffizienzgesetzen bisher gegenüber großen Unternehmen wenig beachtet wurden. Bei Energieeffizienzgesetzen wurden kleine und mittlere Unternehmen (KMU), wie sie in der Nahrungsmittelindustrie vorwiegend vorzufinden sind, oft nicht berücksichtigt und daher ist hier noch ein großes Potential für Energieeffizienzmaßnahmen zu erwarten. So müssen große Unternehmen nach dem Bundes-Energieeffizienzgesetz in Österreich seit 2015 entweder ein Energieaudit durchführen oder ein Energiemanagementsystem einrichten. KMUs sind davon nicht betroffen. [108]

Kapitel 2

Branchenanalyse

Die Branchenanalyse soll einen Einblick in die Produktionsverfahren und Potentiale für Energieeffizienzmaßnahmen der gewählten Industrien geben. Zu Beginn jeder Sparte soll ein Überblick über die Produktionsstruktur und die Hauptprodukte des jeweiligen Gewerbes gegeben werden. Sofern Produkte mit großem Produktionsanteil ausgemacht werden können, werden genau diese behandelt, um wiederum einen Großteil des Energiebedarfs der Branche abzudecken. Im Mittelpunkt der Analyse steht die Ermittlung relevanter Energiekennzahlen. Hierbei werden unter anderem Prozesstemperaturen, Verweilzeiten, Energiebedarf sowie Abwärmepotentialen und Abwärmemengen der Prozesse ermittelt. Um ein besseres Verständnis der Energiekennzahlen zu schaffen, werden zuerst die verschiedenen Produktionsverfahren beschrieben. Außerdem soll auch kurz auf die bereits vorhandenen Techniken der Wärmenutzung eingegangen werden. Schlussendlich werden für jedes Gewerbe aktuelle Energieeffizienzpotentiale angeführt und am Ende des Kapitels soll ein Zwischenfazit über die Besonderheiten der jeweiligen Branche gegeben werden. Behandelt werden die Branchen Glasindustrie, Brauereien, Fleischereien, Molkereien, Papierindustrie und die Zementindustrie.

2.1 Glasindustrie

Glas ist ein Massenprodukt, welches großtechnisch hergestellt wird und aufgrund seiner Eigenschaften viele Anwendungen hat. Die wichtigsten Rohstoffe für die Glasproduktion sind Sand, Soda und Kalk, wobei Soda den Schmelzpunkt des Quarzsandes vermindert und Kalk dem Glas Härte und Glanz gibt. Im allgemeinen ist Glas ein amorpher, nichtkristalliner Stoff im Festzustand, welcher sich physikalisch-chemisch als erstarrte Schmelze auffassen lässt. [88]

2.1.1 Regionale Produktion und wichtige Erzeugnisse

Die gesamte Glasproduktion in den EU-28-Staaten konzentriert sich auf wenige Unternehmen, da der kapitalintensive Herstellungsprozess hohe Investitionen und eine entsprechende finanzielle Liquidität erfordert. Innerhalb der EU sind insgesamt etwa 900 Glasschmelzöfen im Einsatz, die eine Gesamtschmelzkapazität von 35 Mio. Tonnen pro Jahr leisten. Im Jahr 2016 wurden in der Europäischen Union 34,9 Mio. Tonnen Glas produziert. Davon entfielen 21,3 Mio. Tonnen auf Behälterglas, was 61% der gesamten Glasproduktion ausmacht. Mit 9,8 Mio Tonnen (28%) hat auch die Flachglasproduktion einen bedeutenden Anteil. Weitere Produkte sind Kristall- und Wirtschaftsglas mit 1,2, Spezialglas mit 1,0, Mineralfaser mit 0,7 und Andere mit 0,5 Mio. Tonnen Produktion im genannten Jahr. [88], [92]

In Österreich gibt es drei Schmelzöfen zur Behälterglasherstellung, jedoch keine zur Flachglasherstellung. Des weiteren gibt es vier Anlagen zur Herstellung für Haushalts- und Wirtschaftsglas und eine zur Herstellung von Spezialglas, welche Scheinwerferglas produziert. Schließlich gibt es zwei Schmelzöfen für die Produktion von Mineralwolle und einen zur Produktion von Fritten, einem Zwischenprodukt der Glasverarbeitung. Jedoch gibt es kein Werk zur Produktion von Hochtemperaturdämmwolle. Derzeit gibt es im Inland drei Elektrowannen. Eine erreicht eine Kapazität von 75 und die beiden anderen erreichen je 20-30 Tonnen pro Tag. Die E-Wannen wurden zur Herstellung von Glaswolle, Bleiglas und Spezialgläsern installiert. Gründe für die Installation von E-Wannen sind unter anderem der geringere spezifische Energieverbrauch und die niedrigeren Luftemissionen. [83], [88]

2.1.2 Glasherstellung

Im Folgenden wird die Glasherstellung erläutert, wobei sich die Verfahrensschritte in die drei Bereiche Glasschmelze, Formgebung und Kühlung unterteilen lassen. Vor der Glasschmelze werden die feinkörnigen Rohstoffe im geforderten Mengenverhältnis gemischt und mit 3-4 Gew.-% Wasser vermengt. Das Wasser wird zugesetzt, um die Staubentwicklung zu vermindern und den Einschmelzvorgang zu erleichtern. [88]

2.1.2.1 Glasschmelze

Das feinkörnige Rohstoffgemenge wird in den Glasschmelzofen eingebracht und bei bis zu 1.600°C zu Glas geschmolzen. Im ersten Schritt entsteht die Rauschmelze, wo in sodahaltigem Gemenge die Silikatbildung bei 800-900°C erfolgt. Nun löst sich der restliche Quarz in Silikate auf und die Glasbildung ist bei 1.200°C abgeschlossen. Im zweiten Schritt wird die Feinschmelze erzeugt, wobei durch Temperaturerhöhung auf 1.400°C die Löslichkeit der Gase in der Schmelze herabgesetzt wird. Dadurch erfolgt eine fast restlose Entgasung. Gasströmungen bei Temperaturen bis 1.480°C bewirken eine Homogenisierung der Schmelze. In der abschließenden Absteckphase wird die geeignete Viskosität zur Weiterverarbeitung erreicht, indem sich die Temperatur der Glasmasse auf 1.200°C vermindert. Die Tabelle 2.1 zeigt die Temperaturen bei der Bildung der Glasschmelze. [88]

Tabelle 2.1: Phasen bei der Bildung der Glasschmelze (Quelle: [88])

Schmelzphase	Vorgang	Temperatur [°C]
Rauhschmelze	Silikatbildung	800-900
	Glasbildung	bis 1.200
Feinschmelze	Läuterung	1.400-1.480
	Homogenisierung	1.400-1.480
Abstehen	Abkühlung	bis ca. 1.200

Bei der Glasproduktion werden kontinuierlich oder diskontinuierlich betriebene Schmelzaggregate genutzt. Zur Herstellung von Massengläsern, wie Flachglas oder Behälterglas

werden meist kontinuierlich betriebene Glaswannen, wie in Abbildung 2.1 inklusive Temperatur und Viskosität dargestellt, angewendet. Hier wird das Gemenge in der Schmelzwanne aufgegeben und nach einer Einschnürung wird die Glasmasse aus der Arbeitswanne entnommen. In kontinuierlich geführten Wannen beträgt der spezifische Wärmebedarf 1,25-1,94 kWh/t Glas. Teilweise werden elektrische Zusatzheizungen angebracht, die etwa 5% des Wärmebedarfs decken [83]. Für kleinere oder veränderliche Glaszusammensetzungen werden diskontinuierlich betriebene Hafenöfen eingesetzt. [88]

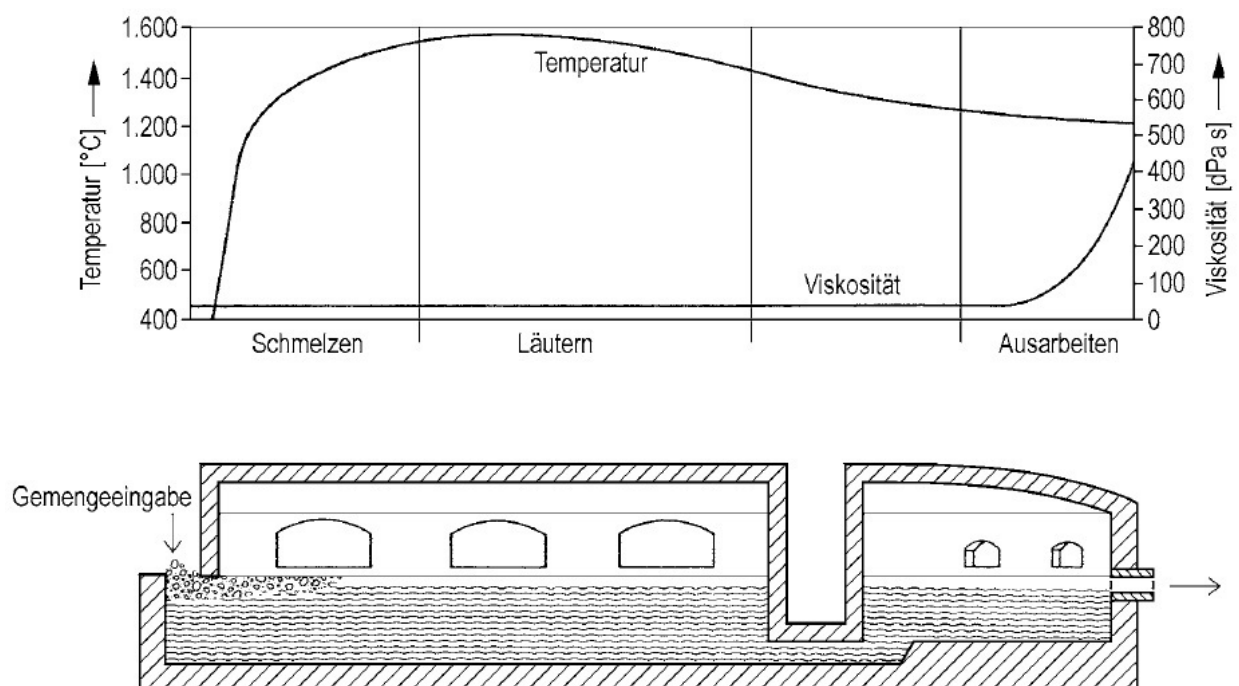


Abbildung 2.1: Wannenofen mit Verlauf von Temperatur und Viskosität (Quelle: [88])

2.1.2.2 Formgebung

Die Abbildung 2.2 zeigt die Möglichkeiten zur Formgebung von Glas. Hohlglas kann durch verschiedene Verfahren wie Pressen, Blasen oder einer Kombination von beidem hergestellt werden. Zur Herstellung von Flachglas findet vorwiegend das Floatglasverfahren Anwendung, aber Flachglas kann auch durch Ziehen, Walzen oder Gießen hergestellt werden. Rohrglas wird durch Ziehen produziert, und Glasfasern werden außerdem durch Spinnen hergestellt. [90]

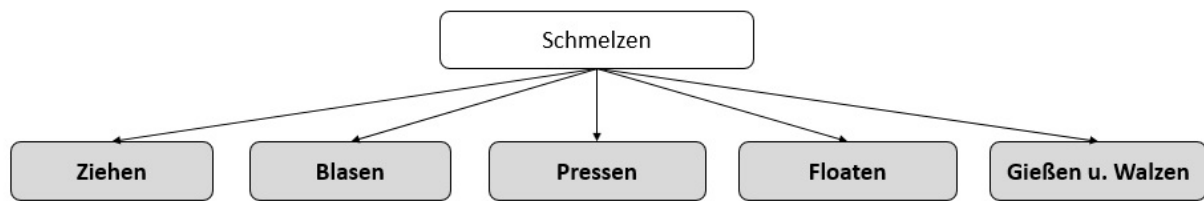


Abbildung 2.2: Verfahren zur Formgebung (eigene Darstellung, Datenquelle: [90])

Flachglas Es wird in Österreich kein Flachglas produziert, aber da es international ein wichtiges Erzeugnis der Glasindustrie ist, wird es hier beschrieben. Für die Produktion von Flachglas kommen verschiedene Ziehglasverfahren, wie das Fourcolt-Verfahren, zum Einsatz, wobei die Glasmasse durch eine Keramikdüse gepresst und anschließend nach oben gezogen wird. Weltweit hat sich jedoch das Floatglasverfahren zur Herstellung von Flachglas durchgesetzt. Zur Anwendung kommt hierbei ein Zinnbad von 4-8 m Breite, bis zu 60 m Länge und einer Tiefe von einigen Zentimetern. Darauf wird die Glasschmelze mit 1.000°C unter reduzierender Atmosphäre aufgegeben und es entsteht, aufgrund der Oberflächenspannung des Zinns, eine gleichmäßig dicke Linse. Um das Glasband mit Rollen zu erfassen, wird es auf 700°C abgekühlt und anschließend nochmals auf 850°C erhitzt, um es durch Strecken auf die geforderte Länge zu bringen. Am Ende des Bades wird das erstarrte Glas kontinuierlich bei 650°C abgezogen und in einem Kühlofen spannungsfrei gekühlt. [34]

Hohlglas Vor der Einbringung in die Glasformmaschine werden zunächst unter regelmäßiger Schmelzezufuhr Tropfen portioniert, welche auch „Kübel“ genannt werden. Das Pressblasverfahren zeichnet sich durch eine hohe Wirtschaftlichkeit aus; der Kübel wird gepresst und gleichzeitig in die Fertigform ausgeblasen. [88]

Glaswolle und Glasfasern Glasfasern zur Wärme- oder Schallisolation werden mit dem Düsenblasverfahren, Düsenziehverfahren oder Schleuderverfahren hergestellt. Ein neueres, produktiveres Verfahren ist das Düsenschleuderverfahren. Dabei wird ein Glasstrahl durch einen rotierenden, temperierten Schleuderkörper zerfasert. [27]

2.1.2.3 Kühlung

Nach der Formgebung werden die Glasprodukte auf der Kühlbahn spannungsfrei abgekühlt, damit diese nicht zerspringen. Oft müssen die Erzeugnisse nach dem Formgebungsprozess erneut erhitzt werden, weshalb die Kühlbahnen sowohl mit Gebläsen zur Zufuhr von Umgebungsluft als auch mit Erdgasbrennern ausgestattet sind. Bei Behältergläsern erfolgt hier außerdem die Heißendvergütung. Dazu wird als Vergütungsmittel Titan-tetrachlorid oder Zinn-tetrachlorid aufgesprüht, wodurch sich eine Oxidschicht bildet, welche die Festigkeit steigert. [48]

2.1.3 Energiekennzahlen

Unternehmensdaten der Verallia Deutschland AG zeigen, dass 74% des Gesamtenergiebedarfs für die Glasschmelze und die anderen 26% für Nebenprozesse aufgewendet werden. 47% des Energiebedarfs der Glasschmelze sind im Glas gebundene Wärme; die weiteren 53% gehen durch Wärmeabstrahlung und Abgasverluste verloren oder werden für die Eigenstromproduktion genutzt. Zu den Hauptverbrauchern der Nebenprozesse gehören die Wärmebehandlung, die Druckluftherzeugung und die Kühlung bzw. das Schneiden der Endprodukte. [106], [83]

Moderne Glasschmelzöfen erreichen eine thermische Effizienz von bis zu 60%, was den üblichen Werten bei großtechnischen Öfen entspricht. Grundsätzlich sinken die spezifischen Wärmeverluste mit der Größe der Anlage, da sich das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen positiv verändert. [83]

Die Tabelle 2.2 zeigt den theoretischen Energiebedarf für das Schmelzen von Behälter- und Flachglas ohne Zuführung von Altglas. Innerhalb der gesamten Glasindustrie werden für das Schmelzen von Glas etwa 0,92-11,11 MWh/t Energie aufgewendet. Dieser Wert hängt wesentlich von der Ofenkonstruktion, dem Durchsatz, der Methode und der Glaszusammensetzung ab. Der Großteil des Glases in der industriellen Herstellung kann jedoch unter dem Wert von 2,22 MWh/t geschmolzen werden. [83]

Tabelle 2.2: Energiebedarf zum Schmelzen von Kalknatronglas (Quelle: [83])

Zweck der Energie	Menge [kWh/t]
Reaktionswärme	136,11
Reaktionsenthalpie Glas	525
Reaktionsenthalpie emittierter Gase	83,33
Theoretischer Energiebedarf	744,44

2.1.3.1 Brenn- und Rohstoffe

Rohstoffe: Der wichtigste Glasbildner ist Siliciumdioxid, welcher in der Natur nahezu rein als Quarzsand vorkommt. Da Quarz einen hohen Schmelzpunkt von 1.700°C hat, wird Soda als Schmelzpunkt-erniedrigendes Flussmittel zugesetzt. Neben Soda kann auch Potasche oder Glaubersalz verwendet werden. Als Stabilisatoren im Glas dienen vorwiegend chemische Verbindungen der Erdalkalimetalle wie Kalkstein, Dolomit und Feldspat. Zur Entfärbung werden der Schmelze je nach Bedarf Braunstein oder Salpeter zugesetzt. [88]

Das Hauptprodukt Behälterglas beispielsweise besteht aus einem Rohstoffmix von 71% Sand, 14% Soda in der Form von Natriumkarbonat, 11% Kalk und weiteren 4% sonstigen Bestandteilen, welche vor allem zur Färbung des Glases dienen. Dieser Zusammensetzung werden Bruchglas aus der Produktion, sowie Altglas aus dem Recycling hinzugefügt. Die Verwendung von Scherben dient neben der Verwertung von Verpackungsabfällen auch der Energie- und Rohstoffeinsparung. [106]

Brennstoffe: Öl und Erdgas sind die wichtigsten Brennstoffe in der Glasherstellung, wobei der tatsächliche Brennstoffmix von der Energiepolitik des Landes und der regionalen Verfügbarkeit abhängt. Der Anteil an Erdgas ist in den letzten Jahrzehnten stetig angestiegen und viele Öfen können sowohl mit Öl als auch mit Erdgas betrieben werden. [83]

2.1.3.2 Strom und Wärme

Nach Angaben der Vetropack Austria GmbH beträgt der Anteil von Erdgas 83% und der Anteil von Strom 17% des Gesamtenergieverbrauchs [5].

2.1.3.3 Abwärme, Energiefluss und Verlustenergie

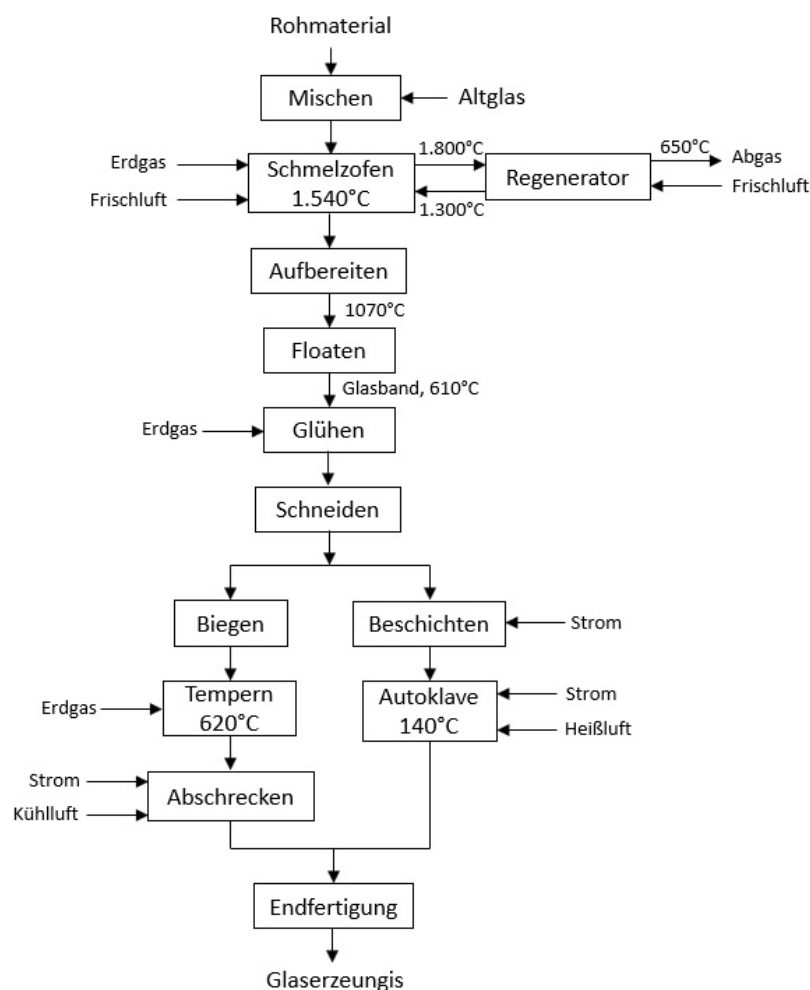


Abbildung 2.3: Produktionslinie für Flachglas (eigene Darstellung, Datenquelle: [42])

Die Abbildungen 2.3 und 2.4 zeigen die eingesetzten Energieträger für die Produktionslinien von Flachglas und Behälterglas, wobei der Schmelzprozess für beide Linien noch gleich ist. Für beide stellt Erdgas neben Heißluft und Altglas in diesem Bereich den wichtigsten Energielieferanten dar. Die eingesetzten Energieträger beider Produkte unterscheiden sich

wesentlich in der Formgebung, da bei Behälterglas auch Elektrizität und Druckluft zum Betrieb der Pressblasanlage erforderlich sind. Je nach Anforderung müssen die Produkte gegläht oder gekühlt werden und erfordern den entsprechenden Einsatz von Energie in Form von Erdgas, Strom oder Kühlluft.

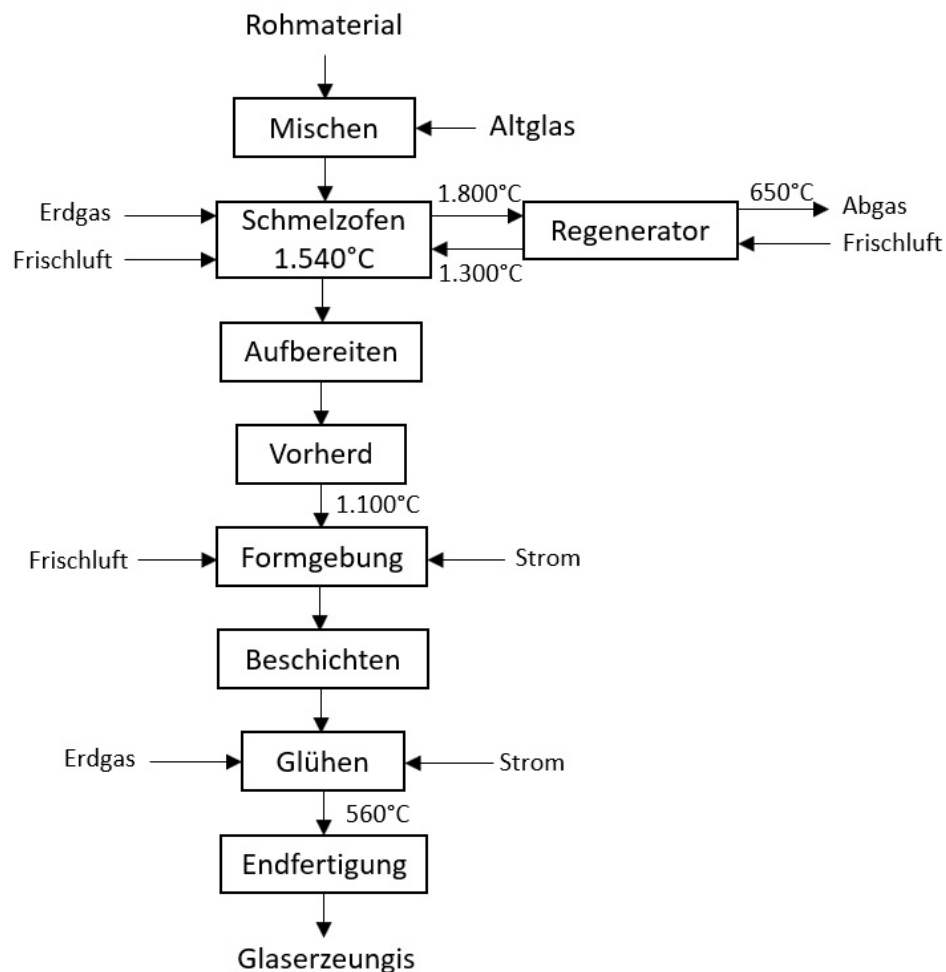


Abbildung 2.4: Produktionslinie für Behälterglas (eigene Darstellung, Datenquelle: [42])

Wasser: Verallia Deutschland AG gab 2010 bekannt, dass nahezu der gesamte Wasserbedarf im Kreislauf geführt wird. Stündlich müssen, aufgrund von Verdunstung und abgeleiteter Abwässer, lediglich 1,7% der Gesamtwassermenge neu zugeführt werden. [106]

2.1.4 Wärmenutzung

In der Verallia Deutschland AG können 60% des Wärmebedarfs durch Wärmerückgewinnung gedeckt werden. Im Bild 2.5 ist die Abhitzeverwertung mit Regenerativkammern in Seitenansicht und Draufsicht zu sehen. Abgase von nahezu 1.600°C ermöglichen hier eine Vorwärmung der Verbrennungsluft auf 1.200°C durch zwei parallel geführte Regenerativkammern. Die Abwärme von 400°C aus den Regenerativkammern wird bei Verallia zusätzlich für die Erzeugung von Dampf zur Eigenstromproduktion und für Heizzwecke verwendet. [106]

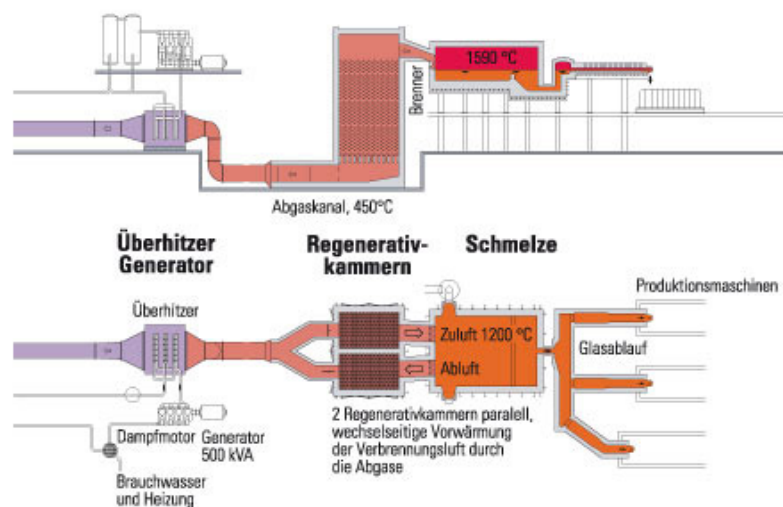


Abbildung 2.5: Abhitzeverwertung in der Behälterglasproduktion - Vorderansicht und Draufsicht (Quelle: [106])

2.1.5 Potentiale

Um Energie einzusparen, kann zum Rohmaterialbatch Altglas hinzugefügt werden oder der Anteil an Altglas erhöht werden. Eine Erhöhung des Altglasanteils um 10% bringt eine Energieeinsparung im Schmelzofen von bis zu 3%. Durch den gestiegenen Altglasbedarf stieg auch dessen Preis und die Anwendung ist deshalb nicht immer ökonomisch. Beim Altglasrecycling ist es zusätzlich von Vorteil, wenn das Altglas vor dem Schmelzen fein gemahlen und erwärmt wird. Die Erwärmung des Altglases auf etwa 300°C bringt im Schmelzprozess eine Energieeinsparung von etwa 10-20%. [20]

Im Bereich des Schmelzofens soll darauf geachtet werden, Abgasströme nicht in die Umgebung entweichen zu lassen, sondern einer Wärmerückgewinnungsanlage zuzuführen. Ein Schmelzofen mit Regenerator ist aktuell die effektivste Form Glas zu schmelzen. Des Weiteren kann die Abwärme des Regenerators genutzt werden, um einen Abhitzekessel zu beheizen. Je nach Bedarf kann das heiße Boilerwasser bzw. der im Abhitzekessel erzeugte Dampf für die Raumheizung, Vorwärmung des Brennstoffs oder auch zur Eigenstromproduktion verwendet werden. [83]

Um die Energieeffizienz bei der Verbrennung zu erhöhen, ist es sinnvoll die Zuluft für die Brenner mit Sauerstoff anzureichern, womit das benötigte Erdgasvolumen reduziert und die Flammentemperatur erhöht wird. Außerdem ist es von Vorteil, die kontinuierlich betriebenen Kühl- und Wärmebehandlungsöfen abzudichten, um den Luftaustritt zu vermindern. Die Elektromotoren bieten ein weiteres Energiesparpotential. Hier soll darauf geachtet werden, dass die Motoren hinsichtlich Leistung und Drehzahl auf die richtige Größe dimensioniert werden, um Verluste zu vermeiden. [20]

2.1.6 Besonderheiten der Glasindustrie

Die Glasindustrie ist durch eine einheitliche Bauweise der Produktionsstätten gekennzeichnet. Nur wenige verschiedene Bauarten von Öfen haben sich bewährt und haben entsprechend große Bedeutung bei der Glasherstellung. Das bedeutet, dass eine Analyse der Glasindustrie im Gegensatz zu anderen Sparten für viele Standorte repräsentativ ist. Somit können Energieeffizienzmaßnahmen für viele Standorte nahezu unverändert übernommen werden und müssen nicht für jeden Betrieb neu ausgearbeitet werden.

2.2 Nahrungsmittelindustrie: Bier

Bier ist in Österreich das Getränk mit dem größten Anteil am Inlandsabsatz, noch vor Mineral- und Tafelwasser. Mit einem Pro-Kopf-Konsum von 103,2 l im Jahr 2016 belegt Österreich im weltweiten Vergleich Platz zwei hinter Tschechien. Im Bundesländervergleich sind Ober- und Niederösterreich führend in der Bierproduktion. [21]

2.2.1 Regionale Produktion und wichtige Erzeugnisse

Im Jahr 2016 gab es in Österreich insgesamt 235 Braustätten. Davon entfielen 119 auf herkömmliche Brauereien und 116 auf Gasthausbraustätten. Mit 52 und 54 Standorten sind Ober- und Niederösterreich die Bundesländer mit den meisten Produktionsstätten. Die Bierproduktion zeigt in Österreich eine leicht steigende Tendenz und brachte im Jahr 2016 einen Gesamtausstoß von 9.497.000 hl Bier mit über eintausend verschiedenen Biersorten. Davon wird der Großteil in Österreich konsumiert, denn der Inlandsabsatz lag bei 8.534.000 hl. Im Vergleich hierzu wurden im Jahr 2016 lediglich 6.892.000 hl Mineral- und Tafelwasser bzw. 6.085.00 hl Limonaden abgesetzt. Die Anteile der einzelnen Biersorten nach Abbildung 2.6 waren im Lauf der Jahre nur geringen Schwankungen unterworfen. Mit 63,5% machen Lager-Märzen den Großteil der Bierproduktion aus. Mit 16,4% folgt Vollbier, welches eine Stammwürze von 11-16° aufweist. Der Anteil an Schankbier lag bei 5,9% und Spezialbier bei 4,7%, welches eine immer größere Bedeutung bekommt. Mit 65% wird der Großteil des Biers in Mehrweggebinden auf den Markt gebracht. [21]

2.2.2 Der Brauvorgang

Die Abbildung 2.7 zeigt den Brauvorgang, der im Folgenden beschrieben wird. Das zum Maischen erforderliche Gersten- und Weizenmalz wird für gewöhnlich zugekauft. Es wird in der Schrotmühle zerkleinert, gemahlen und anschließend in der Maischepfanne mit Brauwasser zur Maische vermengt.

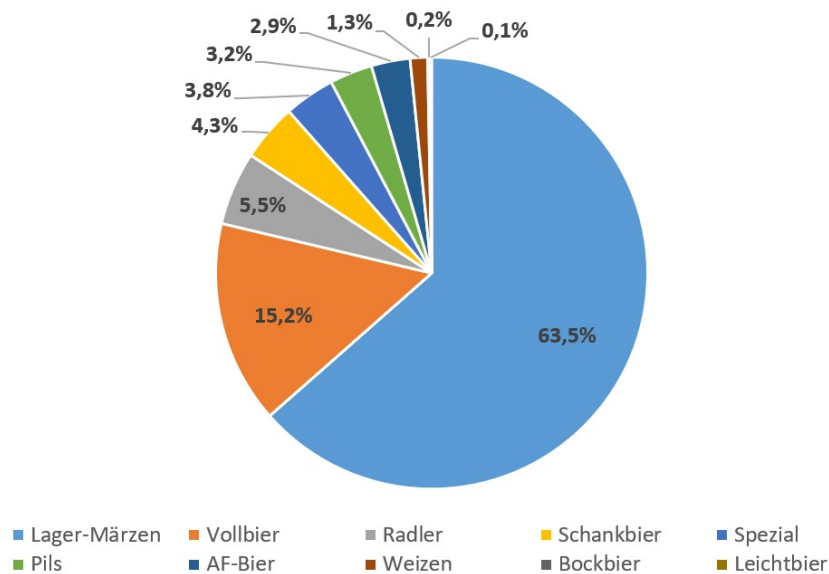


Abbildung 2.6: Anteile Biersorten (eigene Darstellung, Datenquelle: [21])

2.2.2.1 Maischen, Abläutern und Kochen

Die Maische wird über verschiedene Temperaturstufen langsam auf etwa 70°C erhitzt. In der Folge wandeln die Enzyme des Malzes die wasserunlösliche Stärke in löslichen Malzzucker um. Anschließend werden im Läuterbottich die festen Bestandteile der Maische von der Flüssigkeit getrennt. Der Malztreber setzt sich auf dem Siebboden ab. Die gewonnene Flüssigkeit wird als Würze bezeichnet; sie enthält alle löslichen Stoffe des Malzkornes und wird der Würzpfanne unter Zugabe von Hopfen (etwa 100-400 Gramm Hopfen pro Hektoliter Würze) zugeführt. Die Würze mit dem Hopfen wird etwa eine Stunde gekocht, wobei sich Ausfällungen von Malz-Eiweiß bilden. Im anschließenden Whirlpool setzen sich durch die Drehströmung Trübstoffe wie Eiweißausfällungen ab. Vor der Zugabe von Hefe wird die Würze im Würzkühler von ca. 100°C auf etwa 8-15°C abgekühlt. [59]

2.2.2.2 Gären und Reifen

In einem Zeitraum von 2-8 Tagen wandelt zugemischte Hefe den gelösten Malzzucker der Würze in Alkohol, Kohlensäure und verschiedene Aromastoffe um. Nach dem Abziehen der Hefe ist das Jungbier fertig. Es kommt anschließend für 2-6 Monate zum Reifen in den Lagertank, bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt. Bei der Reifung wird der Restzucker

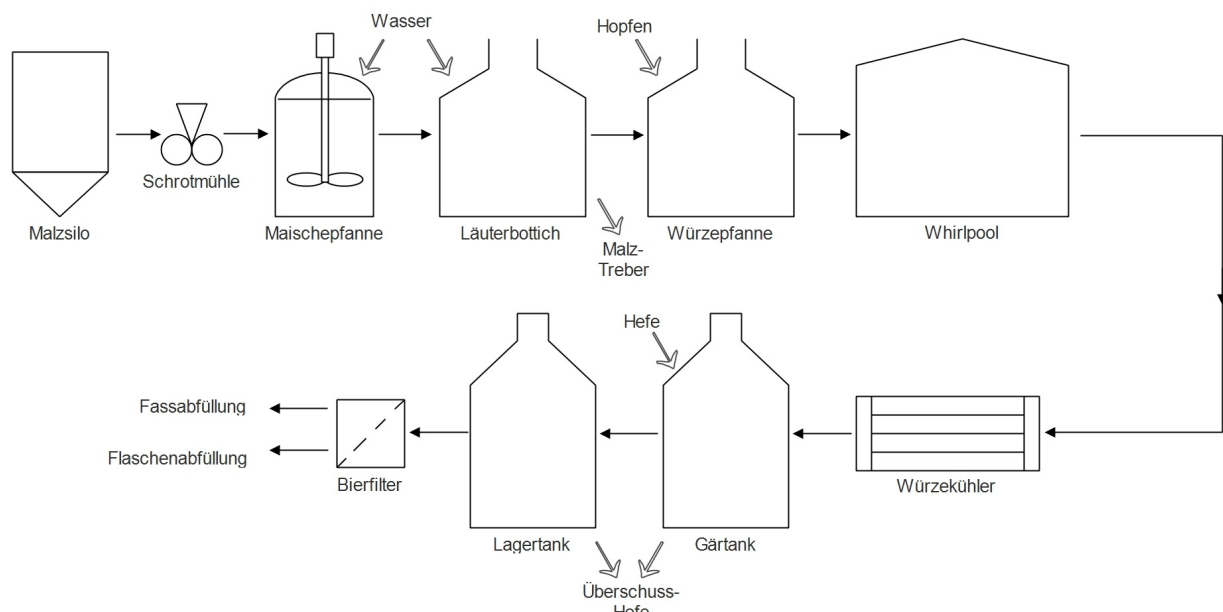


Abbildung 2.7: Brauvorgang (eigene Darstellung, Datenquelle: [30])

nahezu ganz abgebaut und die nicht erwünschten Aromastoffe ausgetrieben. Außerdem wird die von der Hefe gebildete Kohlensäure gebunden und das Bier wird geklärt, indem sich die Eiweißflocken auf dem Boden absetzen. [59]

2.2.2.3 Filtrieren und Abfüllen

Nach dem Abfiltrieren der in Schwebelage befindlichen Hefen und Trübstoffe wird das Bier klar. Abschließend erfolgt die Abfüllung in Fässer, Flaschen oder Dosen. [59]

2.2.3 Biersorten

Um verschiedene Biere zu erzeugen, werden bei der Produktion Anpassungen vorgenommen. Biere werden mit etwa 2-4 hl Wasser pro 100 kg Malz eingemaischt. Für Leichtbiere kommt deutlich weniger und für Bockbiere deutlich mehr Malz zur Anwendung. Um Weißbier zu erzeugen, wird vermälzter Weizen verwendet und der Gerstenmalzanteil unter 50% gehalten. Außerdem kann der Geschmack des Biers mit einer größeren Menge Hopfen herber gestaltet werden. Weiters werden durch eine kurze Reifungszeit von etwa zwei Monaten Märzen- und Lagerbier und durch längere Reifungszeit von bis zu sechs Monaten Bockbiere produziert.

Um ein naturtrübes Bier zu erzeugen, wird die Filtration ausgelassen. Die sogenannten Zwickelbiere sind gänzlich ungefiltert und hefetrübe Biere werden nur grob gefiltert.

2.2.4 Energiekennzahlen

Die Tabelle 2.3 zeigt eine Übersicht der typischen Temperaturen und Verweilzeiten zur Bierherstellung. Bei den Prozessparametern gibt es im Gegensatz zum Molkereiwesen kaum Abweichungen zwischen den verschiedenen Produkten.

Tabelle 2.3: Temperaturen und Verweilzeiten (Quelle: [53])

Prozess	Temperatur [°C]	Verweilzeit
Flaschenreinigung	max. 80-85	
Maische und Wasser erhitzen	40-98	5-120 min
Würze erhitzen	60-98	15-240 min
Maische kochen	98	20-30 min
Würze kochen	98	60-80 min
Würze kühlen	von 98 auf 7	5-15 min
Fermentieren	5-10	5-10 d
kalt lagern	5 - (-1)	5-10 d
Pasteurisation	72	15 s
Kühlung nach Pasteurisation	70 auf Umgebungstemperatur	15 s

2.2.4.1 Brenn- und Rohstoffe

Rohstoffe: Gemäß dem Deutschen Reinheitsgebot sind für die Bierherstellung lediglich die vier Zutaten Hefe, Hopfen, Malz und Wasser erlaubt. In Österreich gilt zusätzlich eine Regelung des Lebensmittelbuchs, welche alle künstlichen Konservierungsstoffe und Geschmacksverstärker verbietet. Für bestimmte Filtersysteme wird Kieselgur verwendet.

Brennstoffe: Im Zuge der Recherchen konnten keine zuverlässigen Aufstellungen über die eingesetzten Primärbrennstoffe gefunden werden. Die Art der genutzten Brennstoffe ist quer durch die Braulandschaft individuell und reicht von den herkömmlichen fossilen Brennstoffen Erdgas und Erdöl bis hin zu den Biomassebrennstoffen Hackschnitzel und Pellets.

2.2.4.2 Strom und Wärme

Etwa 74% des Gesamtenergiebedarfs wird für die Wärmeenergie aufgewendet. Eine Aufteilung der Strombedarfsanteile der restlichen 26% ist in Abbildung 2.8 zu finden. Die Werte wurden gemittelt über den Jahresverlauf und zeigen, dass die Kälteerzeugung den Großteil des elektrischen Energiebedarfs ausmacht. Wie häufig bei der Getränkeherstellung sind auch hier Pumpen und elektrische Antriebe große Stromverbraucher. [85]

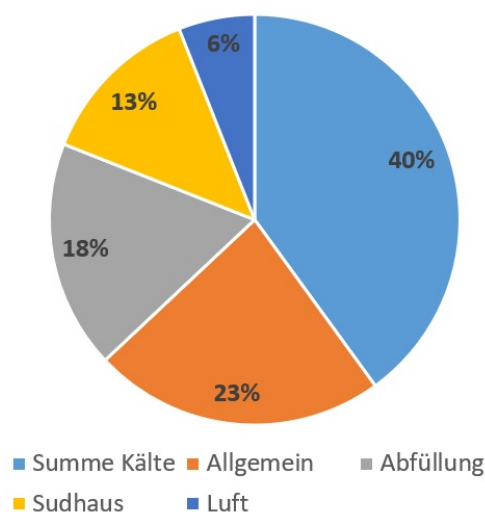


Abbildung 2.8: Strombedarfsanteile Brauvorgang (eigene Darstellung, Datenquelle: [85])

Die Wärmebedarfsanteile in den Betrieben werden im Unterschied zum Strombedarf nur selten messtechnisch erfasst. Eine grobe Aufteilung zeigt Bild 2.9. Eine Brauerei ohne ausgereifte Wärmerückgewinnungsanlage hat einen Energiebedarf von 28,78-55,55 kWh/hl Bier, wobei der größte Energiebedarf beim Maischen, Kochen und Flaschenreinigen liegt [59]. Die Tabelle 2.4 zeigt den mittleren spezifischen Energiebedarf der einzelnen Prozessschritte. Die Matrix 2.5 zeigt schließlich die verschiedenen Energieeinsätze im Produktionsablauf.

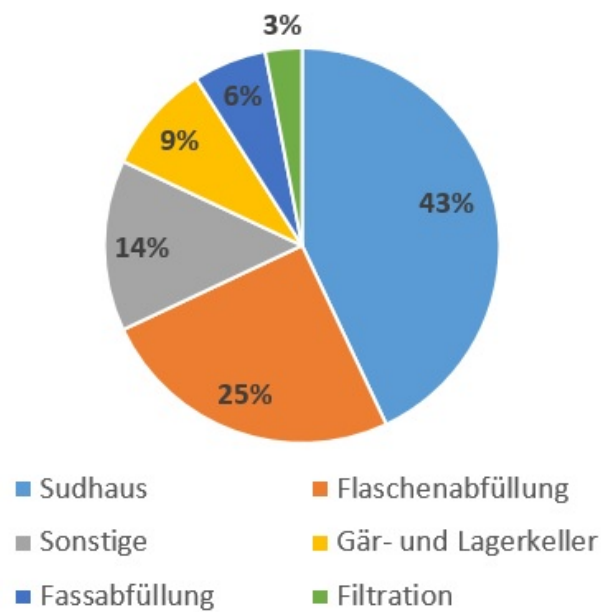


Abbildung 2.9: Wärmebedarfsanteile beim Brauen (eigene Darstellung, Datenquelle: [85])

Tabelle 2.4: Mittlerer spezifischer Wärmebedarf nach Prozessen (Quelle: [59])

Prozess	Wärme [kWh/hl Bier]
Sudhaus	25,56
Reinigen der Flaschen und Abfüllen	23,89
Fassabfüllung	3,06
Prozesswasser	1,11
Gesamt	53,62

2.2.4.3 Massenbilanz

Abbildung 2.10 zeigt die Input-Output-Bilanz bei der Erzeugung von 1 hl Bier. Diese Aufstellung wurde aus den Daten deutscher Großbrauereien ermittelt, welche im Jahr mehr als eine Mio. hl Bier absetzen. Die Grafik zeigt, dass für die Bierproduktion große Mengen Wasser und Energie erforderlich sind. Auf der Outputseite stehen große Abwassermengen, diverse weiter verwendbare Nebenprodukte und Abfälle.

Tabelle 2.5: Art des Energieeinsatz je Produktionsschritt (Quelle: [85])

Energieart	Prozess	Wärme	Abwärme	Wasser	Kälte	Antriebe	Druckluft	CO ₂
	Maischen	X	X	X		X		
	Läutern	X	X	X		X		
	Würzekochen	X	X			X		
	Hopfenseiher		X			X		
	Heißtrub entfernen		X			X		
	Würzekühlung		X	X	X	X		
	Kühltrüb entfernen				X	X		
	Hefe anstellen		X		X		X	
	Hauptgärung		X		X	X	X	X
	Lagerung - Reifung		X		X	X		X
	Filtration		X	X	X	X		
	Abfüllung	X	X	X	X	X	X	X

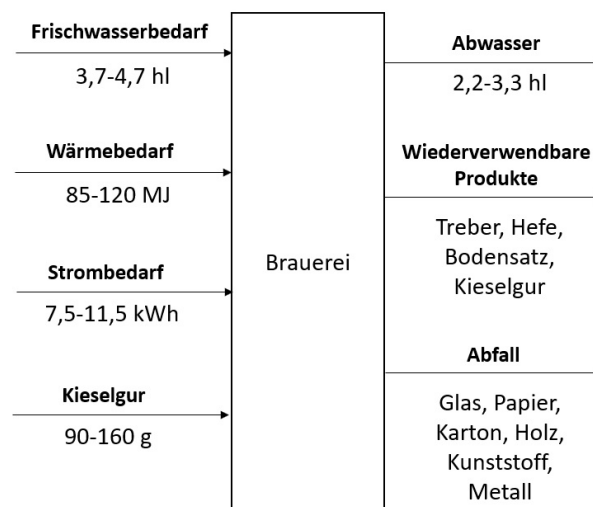


Abbildung 2.10: Input-Output-Bilanz zur Herstellung von 1 hl Bier (eigene Darstellung, Datenquelle: [59])

2.2.4.4 Abwärme, Energiefluss und Verlustenergie

Das Fließbild 2.11 zeigt den typischen Ablauf der Bierherstellung. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, beginnt der Prozess beim Maischen mit einer stufenweise Temperaturerhöhung und Halten der Temperaturniveaus. Dieses Diagramm zeigt außerdem den zusätzlichen Wärmebehandlungsschritt Pasteurisation. Im Fließbild ist auch die Pasteurisierung berücksichtigt, eine zusätzliche Wärmebehandlung, bei welcher das Bier für 20-60 Sekunden auf etwa 70°C erhitzt, und anschließend abgekühlt wird. Bier kann pasteurisiert werden um die Haltbarkeit zu verlängern; allerdings sind Geschmackseinbußen zu erwarten.

2.2.5 Wärmenutzung

In vielen Brauereien wurde nach dem Kochen der Wasserdampf komprimiert, um Wärme zurück zu gewinnen. Durch die Dampfkompensation erhöhte sich jedoch der elektrische Energiebedarf, der den energetischen Vorteil der Wärmerückgewinnung wieder kompensierte. Deswegen wird der Dampf der Würzekochung nicht mehr komprimiert, sondern kondensiert und im Heißwassertank einer Wärmerückgewinnungsanlage gespeichert. Das Heißwasser kann für viele Prozesse in der Brauerei verwendet werden. Diese Technologie ist bei neu errichteten Brauereien Stand der Technik. [36]

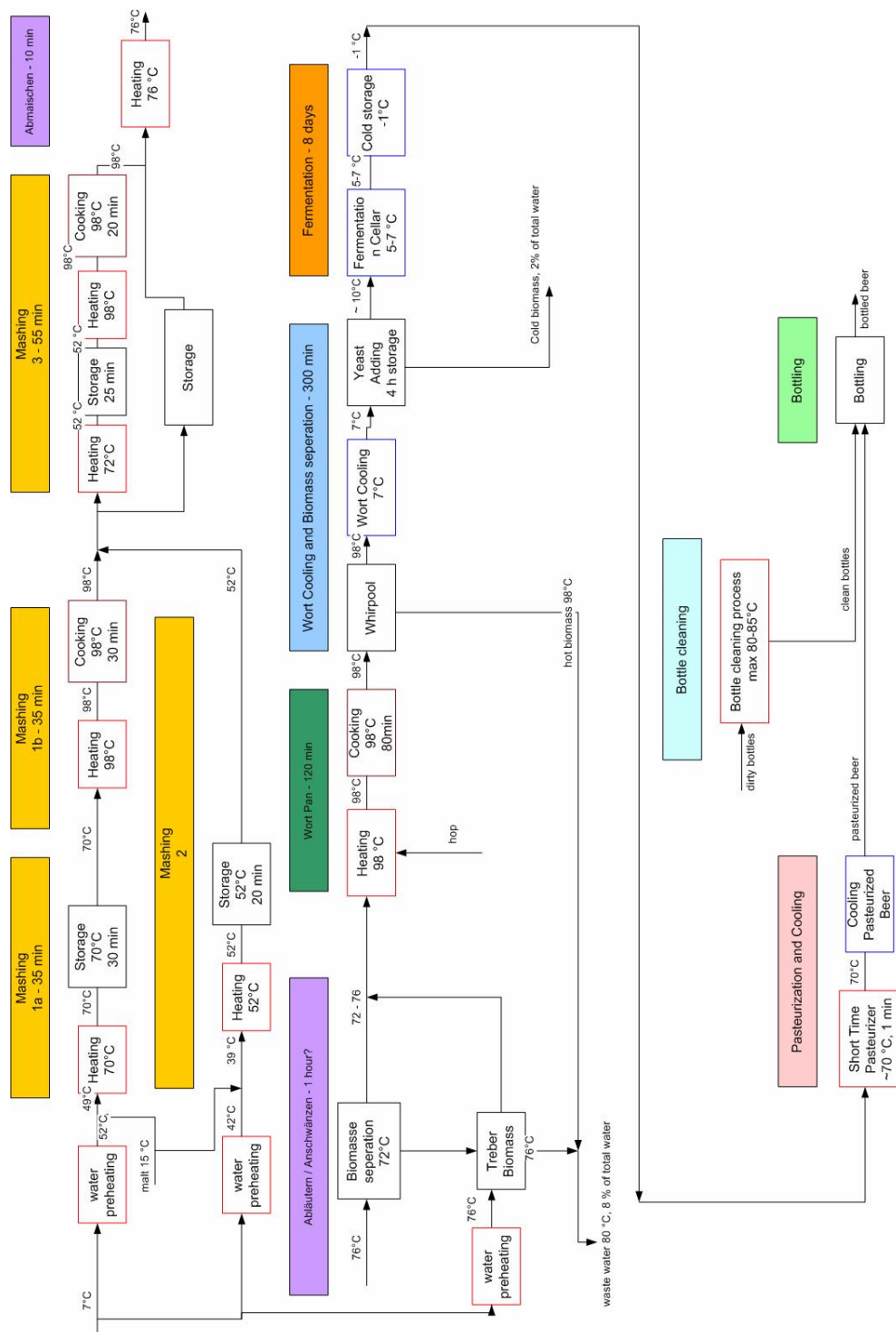


Abbildung 2.11: Fließbild Bierherstellung (Quelle: [53])

Bei der herkömmlichen Würzekochung mit Umgebungsdruck gab es Verdampfungsraten von 10-12% pro Stunde, um eine gute Würzequalität zu erreichen. Ein offener Kessel für die Kochung war jedoch entbehrlich und durch die geschlossene Niederdruckkochung konnten die Verdampfungsraten auf 3-4% gesenkt werden, bei weiterhin guter Würzequalität. So geht beim Kochen weniger Energie an die Umgebung verloren. Bei einer Reduktion der Verdampfungsrate von 10% auf 6% kann 40% der Wärmeenergie eingespart werden. [36], [59]

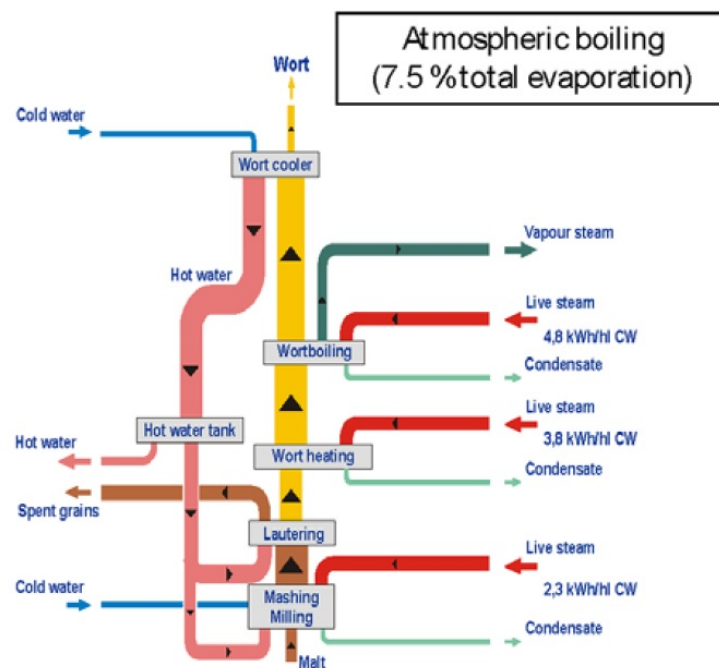


Abbildung 2.12: Kochen bei Atmosphärendruck ohne WRG (Quelle: [36])

Tabelle 2.6: Kochen bei Umgebungsdruck, 7,5% Verdampfung (Quelle: [36])

Prozess	Wärme [kWh/hl Bier]
Maischen 52/78°C	2,21
Heizen 74/99°C	3,38
Kochen der Würze	5,03
CIP	0,28
Heißwasser	0,28
Sudhaus Gesamt	11,18

Die Abbildung 2.12 zeigt schematisch den Energiefluss im Brauprozess ohne Wärmerückgewinnung mit offenem Kessel und die Abbildung 2.13 zeigt den Prozess mit Wärmerückgewinnung bei Niederdruck, im geschlossenen Kessel. Die Tabellen 2.6 und 2.7 zeigen den Energiebedarf dieser beiden Prozesse.

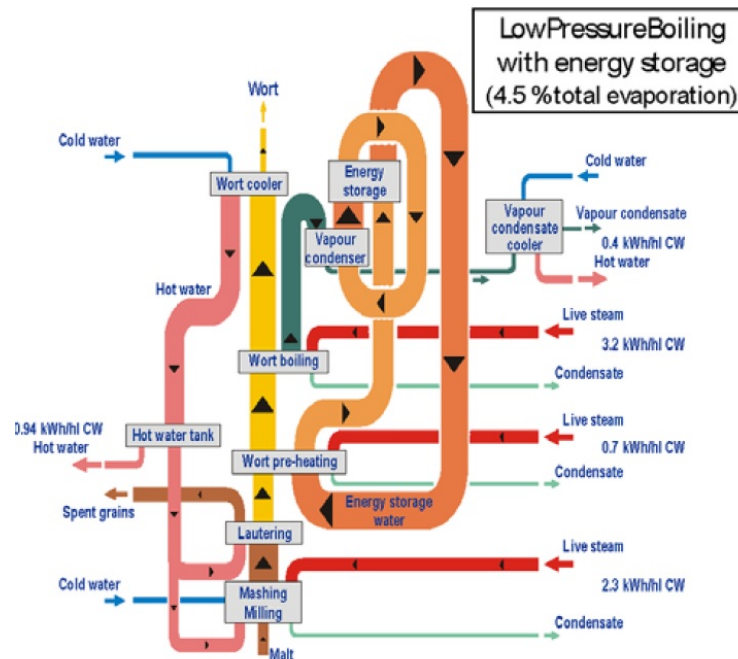


Abbildung 2.13: Kochen bei Niederdruck (150 mb) mit WRG (Quelle: [36])

Tabelle 2.7: Kochen bei Niederdruck, 4,5% Verdampfung (Quelle: [36])

Prozess	Wärme [kWh/hl Bier]
Maischen 52/78°C	2,21
Heizen 74/99°C	3,29
Kochen der Würze	3,02
CIP	0,28
Heißwasser	0,28
Sudhaus Gesamt	9,07

2.2.6 Potentiale

Um den Wärmeeinsatz zu verringern, kann statt dem Dekoktionsverfahren das Malzinfusionsverfahren angewendet werden. Beim herkömmlichen Dekoktionsverfahren muss beim Maischen ein Teil der Maische entnommen, gekocht und dem Maischekessel wieder zugeführt werden. Eine moderne Temperaturmessung macht es aber möglich, den Maischprozess per Infusionsverfahren in einem Kessel ohne sperate Maischeentnahme und -kochung durchzuführen. Beim Malzinfusionsverfahren wird die Maische in einem genau definierten Temperaturprofil erwärmt, welches sich in etwa zwischen 20-80°C bewegt und etwa 200 Minuten dauert [13]. Außerdem macht eine verbesserte Malzaufbereitung das Infusionsverfahren erst möglich. Mit dem Malzinfusionsverfahren werden Energieeinsparungen von 20-50% erreicht [59].

Es ist auch sinnvoll für die Fermentation einen Rotations-Jet-Mixer einzusetzen. Ursprünglich wurde angenommen, dass CO₂ für eine ausreichende Durchmischung im Fermentationstank sorgt. Jedoch kann mit dem Mixer die Fermentationszeit reduziert und somit die Kältelast um bis zu 30% vermindert werden. [59]

Zusätzlich ist es möglich mit höheren Temperaturen von etwa 60°C einzumaischen. Somit fällt die Haltephase bei 50°C weg und Wärmeenergie kann eingespart werden. Jedoch bedeutet diese Änderung der Verfahrenstechnik eine Minderung der Bierqualität und nur wenige Brauer konnten damit zufriedenstellende Biere erzeugen und absetzen. [59]

2.2.7 Besonderheiten der Brauindustrie

Im Gegensatz zu anderen Industriesparten gibt es hier nur wenige Prozesse, die sich auch nur geringfügig unterscheiden, um die verschiedenen Endprodukte zu erzeugen. De facto ist sowohl der Temperaturverlauf als auch der gesamte Prozessablauf beim Brauen der verschiedenen Biere sehr ähnlich. Somit sind sämtliche Energieeffizienzpotentiale auf den Großteil der Brauindustrie anwendbar.

In Brauereien werden bewusst ineffiziente Methoden beibehalten. Braumeister wollen meist einen individuellen Biergeschmack erzeugen, welcher mit bestimmten Wärmebehandlungs-

prozessen einhergeht. Weltweit hat sich das Infusionsverfahren gut durchgesetzt. In Österreich, Deutschland und weiteren Teilen Mitteleuropas wird jedoch nach wie vor mittels Dekoktionsverfahren gemaischt, um traditionelle Biersorten mit kernigem, nicht süßem Geschmack zu erhalten.

2.3 Nahrungsmittelindustrie: Fleisch

Aufgrund der dezentralen Struktur des Fleischereigewerbes gibt es in Österreich kaum zuverlässige Kennzahlen dieser Branche. Daher wurden im Zuge der Recherchen auch die Daten anderer Länder (wie Australien, Frankreich oder die Niederlande) herangezogen.

2.3.1 Regionale Produktion und wichtige Erzeugnisse

Der Pro-Kopf-Verbrauch an Fleisch inklusive Geflügel beträgt in Österreich knapp 100 kg pro Jahr und blieb in den letzten Jahren nahezu unverändert [2]. Die Tabelle 2.8 zeigt die Schlachtausbeute von Fleisch im Jahr 2016. Die größte Fleischproduktion gibt es bei Schweinen mit 514.892 Tonnen und Rindern mit 222.262 Tonnen, gefolgt von Geflügel mit etwa 121.500 Tonnen pro Jahr. In kleineren Mengen werden außerdem Kälber, Pferde, Schafe und Ziegen in Österreich verarbeitet. Die mit Abstand höchste Anzahl an Schlachtungen gibt es bei Geflügel mit einer Stückzahl von etwa 83 Mio., gefolgt von Schweinen mit etwa 5 Mio. Schlachtkörpern im Jahr 2016. In den EU-28-Staaten wurden im Jahr 2016 mehr als 23 Mio. Tonnen Schweinefleisch erzeugt, wovon auf Österreich etwas mehr als eine halbe Mio. Tonnen entfallen. Die Schweinefleischproduktion macht in den EU-28-Staaten etwa die Hälfte der gesamten Fleischproduktion aus. Eine Erhöhung des Fleischbedarfs ist in den nächsten Jahren, aufgrund der steigenden Bewusstseinsbildung gegenüber den negativen Folgen der Massentierhaltung nicht zu erwarten [59].

EU-weit ist zu beobachten, dass es eine Umverteilung von vielen kleinen Betrieben zu wenigen großen Betrieben gibt. Die Hauptursachen dafür sind die gestiegenen und vermutlich weiter steigenden Hygiene- und Umweltauflagen, welche die Unternehmen zu höheren Investitionen drängen. Der Output eines durchschnittlichen Schlachthofes ist heute um das 2,5-fache höher als noch vor 20 Jahren [82]. [1], [12]

Tabelle 2.8: Fleischproduktion in Österreich (Quelle: [1], [12])

Tier	[t]	Stück
Rinder	222.622	626.533
Kälber	6.073	59.992
Schweine	514.892	5.227.573
Pferde	116	602
Schafe	6.267	269.290
Ziegen	712	56.832
Geflügel	121.500	83.439.000

2.3.2 Fleischverarbeitung in der Schlachtstraße

Bis auf wenige Unterschiede ist, wie in Abbildung 2.14 dargestellt, die Verarbeitung von Geflügel, Rind bzw. Schwein gleich und wird im Folgenden erläutert.

2.3.2.1 Anliefern, Betäuben und Anhängen

Nach der Anlieferung werden die Tiere in eine Sammelbox gesperrt; aus dieser werden die Tiere dann einzeln entnommen. Die Tiere werden meist durch ein Bolzenschussgerät, durch Kohlendioxid oder einen Elektroschock betäubt und anschließend auf eine Rohrbahn aufgezogen, auf der sie durch die Schlachtkette transportiert werden. Geflügel wird üblicherweise bereits bei der Anlieferung auf die Transportkette gehängt und anschließend betäubt. [38]

2.3.2.2 Entbluten, Absetzen des Kopfes und Hautabzug

Nun werden die Tiere gestochen, wobei die Halsschlagader oder das Brustbein durchstochen wird und die Tiere durch Blutverlust sterben. Schweine werden oft im Liegen gestochen und anschließend auf das Transportband gehängt. Bei Rindern, Schafen, Ziegen und Pferden werden anschließend Kopf und Vorderbeine abgetrennt; dann wird die Haut vorgeschnitten und abgezogen. Schweine werden mit 62°C heißem Wasser bzw. Wasserdampf abgebrüht, um mit der Enthaarungsmaschine die oberste Hautschicht und die Borsten entfernen zu

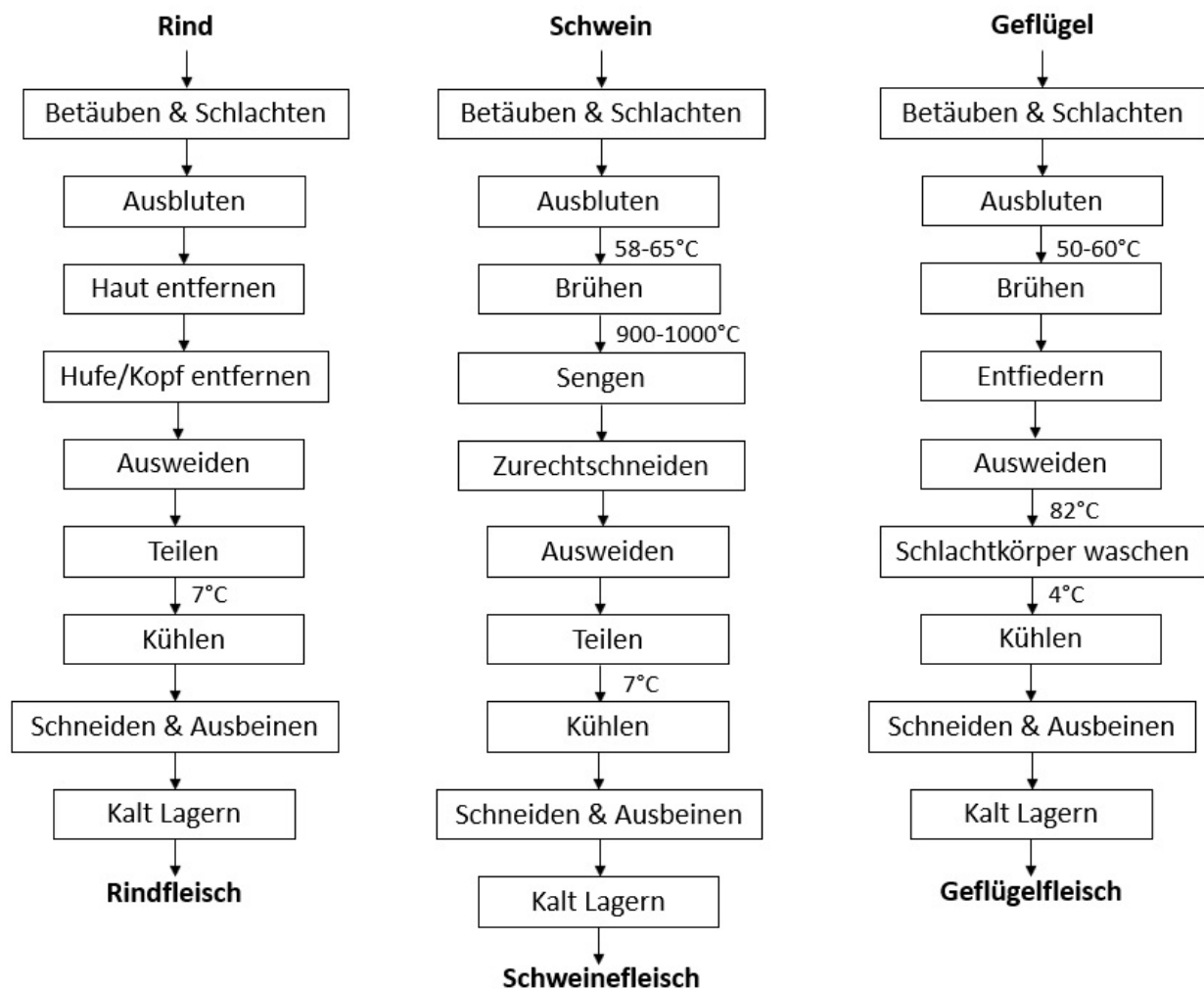


Abbildung 2.14: Flussdiagramm verschiedener Fleischerzeugnisse (eigene Darstellung, Datenquelle: [82])

können. Um den Schlachtkörper vollständig von Haaren zu befreien, werden beim Sengen die Haare im Sengofen abgebrannt. Beim Geflügel werden nur die Federn entfernt und die Haut bleibt am Schlachttier. [38]

2.3.2.3 Entweiden und Bearbeiten

Bauch- und Brustorgane werden entfernt und das Tier wird bei Bedarf in der Mitte gespalten. Danach wird das geschlachtete Tier in Teilstücke zerlegt und auf 7°C oder weniger abgekühlt. [38]

2.3.3 Energiekennzahlen

Der Energiekonsum bzw. die Energieeffizienz ist ein Schlüsselfaktor bei der Fleischverarbeitung, da er großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Betriebes hat. Die Energieeffizienz hängt von zahlreichen Faktoren ab, unter anderem von der Größe und dem Output des Schlachthofes, von der installierten Technologie und von den Eigenschaften des Rohmaterials. Für das Schlachten, Teilen und Verpacken werden beim Rind etwa 775 kWh/t und beim Schaf etwa 685 kWh/t Fleisch verbraucht [54]. Im Jahresvergleich gibt es immer wieder Anstiege im durchschnittlichen Energieverbrauch, was unter anderem auf Gesetzesänderungen zurück zu führen ist. So müssen immer wieder Prozessanpassungen vorgenommen werden, um neue Hygieneverordnungen (z.B. nach Lebensmittelskandalen) zu erfüllen. Aber auch neue Konsumvorlieben können den Energieverbrauch steigen lassen, beispielsweise wenn die Endprodukte als Halbfertiggerichte vorgekocht werden, oder wenn sie in kleinere Einheiten verpackt oder tiefgefroren werden. Die Tabelle 2.9 zeigt eine Aufstellung des Energiebedarfs für einen Betrieb, der auf 200-250 Schweine oder 40-60 Rinder pro Stunde ausgelegt ist. [82]

Tabelle 2.9: Energieeinsatz Schlachthof (Quelle: [82])

Art des Energieeinsatzes	Menge
Dampfbedarf	1,5 t/h
Wasserbedarf (Trinkwasserqualität)	60-70 m ³ /h
- davon Heißwasser	25 m ³
Erdgas zum Sengen	60 m ³
Schneidmaschinen bei 4.500 kg/h	75 kWh
Kühlwasserbedarf	300 l/h

Der Anteil an Strom und Wärme am Gesamtenergiebedarf richtet sich nach den regionalen Gegebenheiten und ist international recht unterschiedlich. In Frankreich ist der Stromanteil wesentlich höher als der Wärmeanteil, da gesetzlich ein hoher Strombedarf im industriellen Gewerbe vorgesehen ist [82]. Die Tabelle 2.10 zeigt den spezifischen Energiebedarf nach Produkten in den Niederlanden.

Die Tabellen 2.11 und 2.12 zeigen die Aufteilung des Energiebedarfs auf die verschiedenen

Tabelle 2.10: Spezifischer Energiebedarf nach Produkten (Quelle: [54])

Sektor	spez. Strombedarf [kWh/t]	spez. Wärmebedarf [kWh/t]
Rind und Schaf	94,72	149,16
Schwein	129,16	258,89
Geflügel	280	160
Fleischverarbeitung	208,33	1097,22
Tierkörperverwertung	65	289,44

Prozesse der Fleischverarbeitung. Typisch für die Nahrungsmittelindustrie zeigt sich, dass die Kühlung etwa die Hälfte (und mehr) des Strombedarfs ausmacht. Der größte Bedarf an Wärmeenergie ist je nach Sektor beim Reinigen, Sengen der Federn oder Trocknen zu finden.

Die Grafik 2.15 zeigt die Energiebedarfsanteile über alle Sparten in der Fleisch verarbeitenden Industrie in Australien im Jahr 2004. Der Brennstoffbedarf aller Verarbeitungsschritte macht ein Drittel und die Kühlung ein Fünftel des Gesamtenergiebedarfs aus. Man erkennt, dass die Verluste der Heizkessel mit 13% wesentlich sind. [43]

2.3.3.1 Abwärme, Energiefluss und Verlustenergie

Wärme und Strom: Das Flussdiagramm 2.16 zeigt die Energieflüsse in einem Schlachthof für Schweine. Brennstoffe werden im Wesentlichen zum Heizen, zum Sengen und zur Erzeugung von Dampf bzw. Heißwasser verbraucht; außerdem zur Stromgewinnung für das Kühlsystem.

2.3.3.2 Kennzahlen in der Fleischverarbeitung

In der Tabelle 2.13 werden weitere Temperaturen und Verweilzeiten anderer Vorgänge in der Fleischverarbeitung aufgelistet. Die Tabelle zeigt auch die Parameter zum Reinigen der Gebinde, wofür große Mengen an Heißwasser bis zu 90°C benötigt werden.

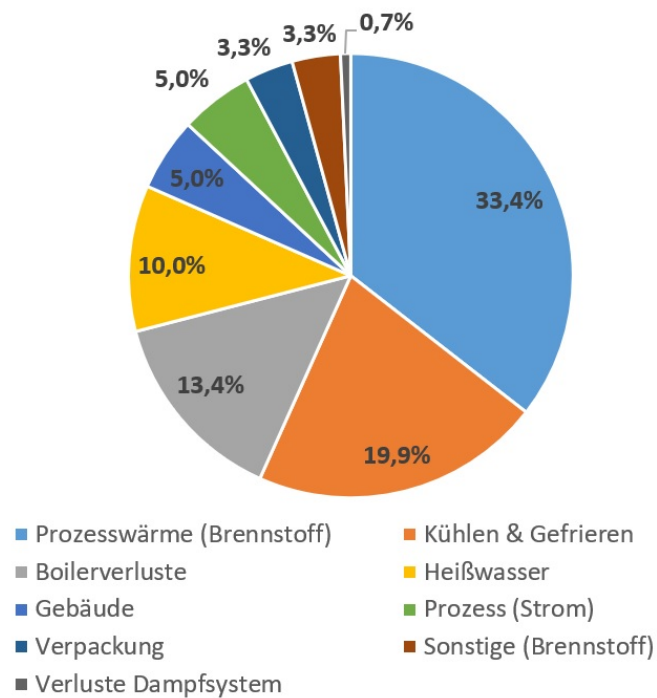


Abbildung 2.15: Energiebedarfsanteile der fleischverarbeitenden Industrie (eigene Darstellung, Datenquelle: [43])

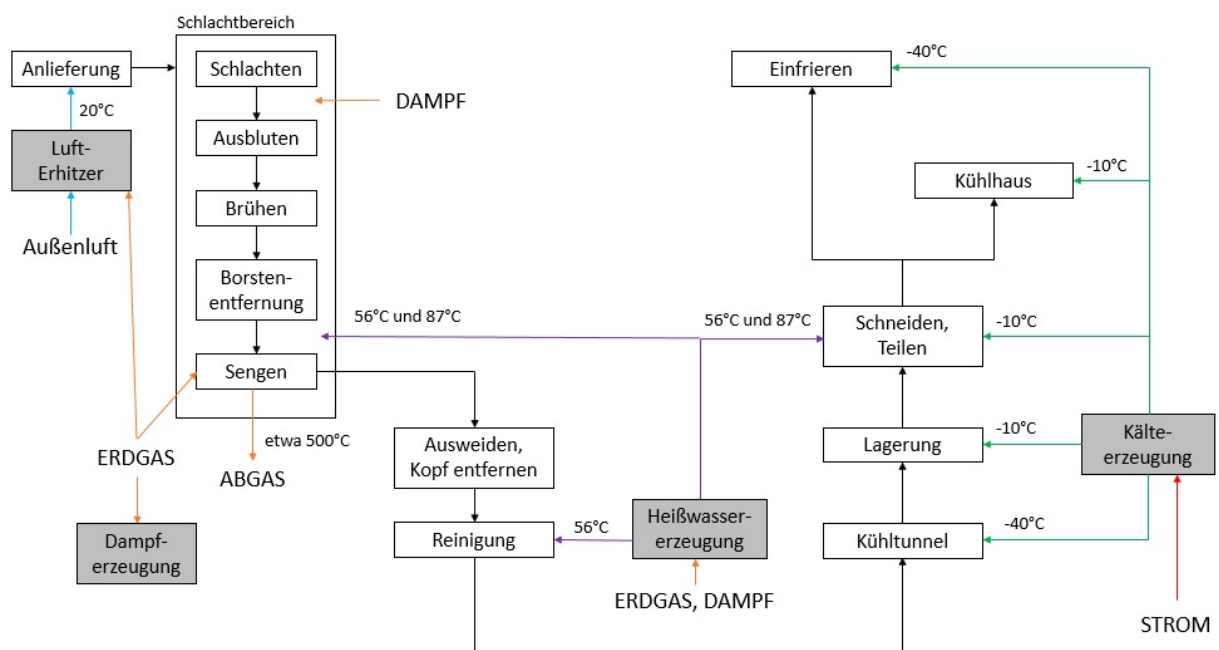


Abbildung 2.16: Fließschema für den Schweineschlachthof (eigene Darstellung, Datenquelle: [3])

Tabelle 2.11: Energiebedarfsanteile Strom (Quelle: [54])

Produkt	Prozess	Energieverbrauch (%)
Schweine schlachten	Kühlen	49-70
	Schlachten	5-30
	Reinigen	5-7
	Beleuchtung	2-8
	Ausweiden	3
Rinder schlachten	Schlachten	26
	Ausweiden	3
	Kühlen	45-70
	Druckluft, Beleuchtung und Maschinen	30
Geflügel schlachten	Kühlen	52-60
	Druckluft und Maschinen	30
	Beleuchtung und Belüftung	4
Fleischverarbeitung	Teilen und Durchmischen	40
	Kühlen	40
	Verpacken	10
	Beleuchtung	10
Tierkörperverwertung	Druckluft, Beleuchtung und Maschinen	12
	Mahlen und Pressen	17
	Trocknen	23
	Dünsten	6
	Mahlen	8
	Sterilisieren	2

2.3.4 Wärmenutzung

In einem herkömmlichen Schlachthof wird Dampf verwendet, um Wasser aufzuheizen, wie in Abbildung 2.17 (a) dargestellt. Um kostenintensiven Wasserdampf einzusparen, kann das Frischwasser auch mit der Abwärme des Ammoniaks aus der Kühlanlage oder mit der

Tabelle 2.12: Energiebedarfsanteile Wärme (Quelle: [54])

Produkt	Prozess	Energieverbrauch (%)
Schweine schlachten	Gasofen	60-65
	Reinigen und Desinfizieren	18-20
	Sengen	15
	Gebäudeheizung	7
Rinder schlachten	Reinigen und Desinfizieren	80-90
	Gebäudeheizung	10-20
Geflügel schlachten	Sengen	60
	Reinigen und Desinfizieren	30
	Gebäudeheizung	10
Fleischverarbeitung	Reinigen und Desinfizieren	25
	Gebäudeheizung	15
Tierkörperverwertung	Dünsten	2
	Trocknen	61
	Mahlen und Pressen	17
	Gebäudeheizung	1
	Fettbehandlung	3
	Sterilisieren	8

Abwärme des Öls aus den Separatoren erwärmt werden. Dieser Ablauf ist in Abbildung 2.17 (b) dargestellt, welche zeigt, dass die Erwärmung des Wassers von 10°C auf 55°C mit Abwärme erfolgen kann.

2.3.5 Potentiale

Die vielfältigen Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz sind je nach Schlachthof individuell zu beurteilen. Eine Option Energie zu sparen ist die Reinigung mit Hochdruckwasser anstatt mit drucklosem Leitungswasser, wodurch zusätzlich die Prozesszeit verkürzt wird. Ferner können für das Dampfsystem Heizschlangen verwendet werden (anstatt Di-

Tabelle 2.13: Temperaturen bei der Fleischverarbeitung (Quelle: [54])

Material	Temperatur [°C]	Verweilzeit
Glasgebinde reinigen	80-85	6-7min
Kunststoffgebinde reinigen	55-58	6-7min
Dosenfleisch lagern	- 18	
Schinken reifen		6-12 Monate
Wurstfleisch brühen	68-75	15-20min
Wurstfleisch kochen	100-102	20-30min
Wurstfleisch trocknen	140-160	

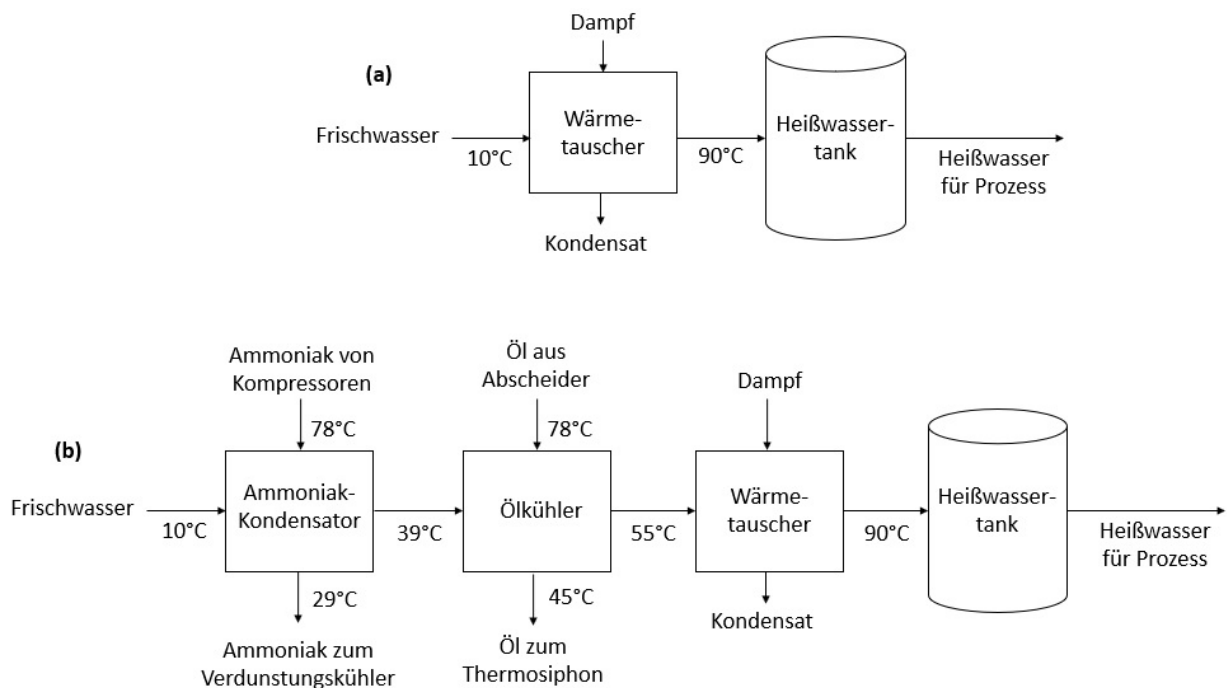


Abbildung 2.17: Wärmerückgewinnung Schlachthof (eigene Darstellung, Datenquelle: [63])

rektndampf), um die Wiederverwendung des Dampfkondensats zu ermöglichen. Zusätzlich können auch die Abgase der Öfen aus der Fleischverarbeitung in ein Wärmerückgewinnungssystem zurückgeführt werden. Um Kältelasten zu minimieren, besteht die Möglichkeit die Kühllinie vollständig zu isolieren und den Luftstrom in diese Anlage durch entsprechende Abdichtungen zu minimieren. Außerdem sollte die Größe der Heizkessel auf den tatsächlichen Heizwasserbedarf angepasst werden. Ein richtig dimensionierter Heizkessel erreicht

eine Effizienz von 85% und mehr, verglichen mit einem zu groß dimensionierten Heizkessel, welcher eine Effizienz von nur 60-70% erreicht. [43]

2.3.6 Besonderheiten der Fleischindustrie

Trotz zunehmender Effizienz der Energienutzung durch neue Technologien steigt der spezifische Energiebedarf im Jahresvergleich stetig an. Dies hat zahlreiche Gründe, wie z.B. schärfere Hygieneauflagen, sowie stärker verarbeitete und stärker diversifizierte Endprodukte. [82]

2.4 Nahrungsmittelindustrie: Milch

Ähnlich wie bei der Fleischindustrie gibt es auch bei den Molkereien dezentrale Produktionsstrukturen. Somit gibt es auch hier nur wenige zuverlässige Daten für Österreich. Um dennoch einen Einblick zu geben, wurden neben wenigen österreichischen auch Daten aus den EU-28-Staaten herangezogen.

2.4.1 Regionale Produktion und wichtige Erzeugnisse

Die Molkereien sind in Österreich die umsatzstärkste Branche in der Ernährungswirtschaft mit insgesamt 90 Unternehmen und 110 Betriebsstätten, wo im Jahr 2013 etwa 3,3 Mio. Tonnen Milch verarbeitet wurden. Der mit Abstand größte Milchverarbeiter in Österreich ist die Berglandmilch eGen mit 1,2 Mio. Tonnen gefolgt von der NÖM AG mit 0,4 Mio. Tonnen und der Gmundner Molkerei Gen.m.b.H. mit 0,3 Mio. Tonnen verarbeiteter Milch im Jahr 2013. [56]

Im Jahr 2016 wurden in den EU-28-Staaten insgesamt 168,3 Mio. Tonnen Milch verarbeitet. Von dieser Milch wurden für Käse 37%, für Butter 30%, für Sahneerzeugnisse 13% und für Trinkmilch 11% verwendet. [32]

2.4.2 Milchverarbeitung

Das Flussbild 2.18 zeigt die Prozessabläufe der hier behandelten Produkte, wo man erkennt, dass für die verschiedenen Milcherzeugnisse genaue Abläufe und exakt definierte Temperaturen einzuhalten sind [81].

2.4.2.1 Käse

Milch für die Käseherstellung muss zuerst geklärt, pasteurisiert und auf den richtigen Fettgehalt (mittels Hinzufügen oder Abtrennen von Rahm) eingestellt werden. Eine Homogenisierung ist hier nicht immer notwendig. Danach wird zur Milchgerinnung eine Starterkultur hinzugegeben und 45-60 Minuten bei 25-30°C gehalten, um die Bakterien zu akti-

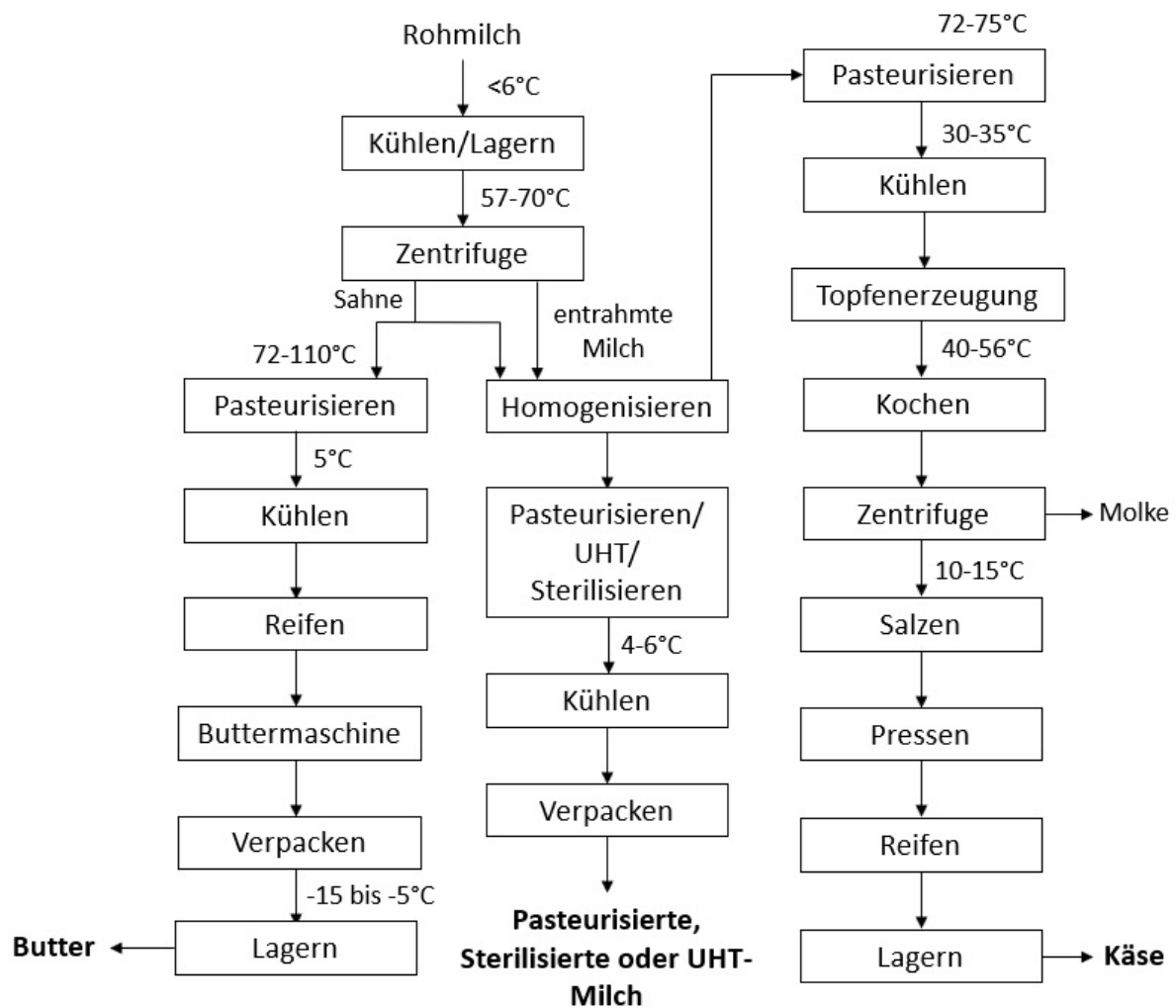


Abbildung 2.18: Flussdiagramm verschiedener Molkereierzeugnisse (eigene Darstellung, Datenquelle: [81])

vieren und wachsen zu lassen. Nachdem der Käse die gewünschte Festigkeit erreicht hat, wird er in Stücke geschnitten; dabei setzt sich Molke ab. Danach werden die Käsestücke gepresst, um Restmolke zu entfernen, und gesalzen, um die Rindenbildung zu fördern. Abschließend erfolgt eine Ruhephase mit verschiedenen Veredelungs- und Verfeinerungsschritten zur Käsereifung, welche Monate oder auch Jahre andauern kann. In der Tabelle 2.14 sind die Prozesstemperaturen und Verweilzeiten während der Käseherstellung angegeben, wobei statt der herkömmlichen Pasteurisierung auch die Hochtemperatur-Kurzzeit-Pasteurisierung (HTST) Anwendung findet. [59]

Tabelle 2.14: Parameter der Käseproduktion (Quelle: [105])

Prozess	Temperatur [°C]	Verweilzeit	Druck
HTST Pasteurisieren	72	16 s	
oder Pasteurisieren	60	16 s	
Gerinnung	25-30	45-60 min	
Molketrennung		20 min	
Pressen			max. 172 kPa
Reifen	ca. 10		
bei Bedarf Schmelzen	>75		

2.4.2.2 Butter

Zur Butterherstellung wird Milch in Zentrifugen, den sogenannten Separatoren, innerhalb weniger Sekunden entrahmt und im Anschluss pasteurisiert. Beim Pasteurisieren wird der Milchrahm kurz erhitzt, abgekühlt und mit einer Starterkultur versehen. Es folgt eine Reifungsphase von 20 Stunden. Je nach Fettart wird das Milchfett im Rahm nun bei 8-21°C kristallisiert. In einer Buttermaschine, welche aus einer Trommel, einem Schläger und einem Knetter besteht, wird der Rahm geschlagen und danach die Butter abgetrennt und geknetet. Hier entsteht als Nebenprodukt die Buttermilch, welche dem Rahm ohne Milchfett entspricht. Abschließend wird die Butter in einer Ausformmaschine in Form gebracht und abgepackt. Um ein Kilogramm Butter herzustellen, benötigt man etwa 20 l Milch. Detaillierte Temperaturen und Verweilzeiten sind in Tabelle 2.15 angeführt. [16]

2.4.2.3 Konsummilch

Für Konsummilch wird Milch in einer Zentrifuge abgesahnt, homogenisiert und je nach Bedarf pasteurisiert, ultrahocherhitzt oder sterilisiert. Diese Prozesse können je nach Anlage kontinuierlich oder diskontinuierlich durchgeführt werden. Ultrahocherhitzen und Sterilisieren erhöhen die Haltbarkeit der Milch.

Tabelle 2.15: Parameter der Butterproduktion (Quelle: [105])

Prozess	Temperatur [°C]	Verweilzeit
Wärmebehandlung	>95	
Reifen	zuerst 21 und dann 13	20 h
Altern, Kristallisieren	8-21	12-15 h
Buttermaschine Winter	10-13	
Buttermaschine Sommer	7-10	

Pasteurisierte Milch: Zum Pasteurisieren wird die Milch in der Regel auf 72°C erhitzt und für 15 Sekunden gehalten. Im Sinne einer Wärmeregeneration wird die Heißmilch in einem Wärmetauscher oftmals genutzt, um die neu zugeführte kalte Milch zu erwärmen. Die Heißmilch wird rasch auf weniger als 7°C abgekühlt und unter sterilen Bedingungen abgefüllt. [52], [59]

UHT-Milch: Ultrahocherhitzte Milch kann kontinuierlich durch zwei unterschiedliche Verfahren erzeugt werden. Zum einen kann die Milch mit Wärmetauschern indirekt erhitzt werden und zum anderen kann die Milch indirekt auf etwa 80°C erwärmt und ab 80°C direkt mit Dampf erhitzt werden. Das Dampf-Milch-Gewichtsverhältnis liegt dabei bei etwa 1:10. Nach einer Direkterhitzung wird die H-Milch rasch auf etwa 4-5°C abgekühlt indem das Erzeugnis mittels Vakuum expandiert und der Dampf dabei extrahiert wird. Bei der Indirekterhitzung wird die Milch üblicherweise mit der frisch zugeführten Milch abgekühlt. [59]

Tabelle 2.16: Parameter der Ultrahocherhitzung (Quelle: [59])

Prozess	Temperatur [°C]	Verweilzeit
Ultrahocherhitzen	135-150	1 s

Sterilisierte Milch: Die Erzeugung sterilisierter Milch läuft in zwei Phasen ab. Ähnlich wie bei H-Milch, wird die Milch zuerst bei 80°C für eine Sekunde vorsterilisiert. Anschließend

wird die Milch luftdicht abgefüllt und in der Endverpackung bei etwa 110-125°C für 20-40 Minuten sterilisiert. Letztlich werden die befüllten Glas- bzw. Kunststoffflaschen mit einer Sprühkühlung abgekühlt. [59]

2.4.2.4 Sahneerzeugnisse

Die Sahne ist ein Nebenprodukt der Milchverarbeitung. Bereits zu Beginn der Prozesskette wird die Milch zentrifugiert, wodurch sich die fettreiche Sahne von der Magermilch abtrennt. Dieser Prozess wird als Entrahmung bezeichnet. Bei Bedarf wird die Sahne anschließend den selben Wärmebehandlungen wie Konsummilch unterzogen. [52]

2.4.3 Energiekennzahlen

Die Tabelle 2.17 zeigt eine Energiebedarfsanalyse niederländischer Molkereien. Man sieht, dass die meiste Energie für die Kühlung und Reinigung aufgewendet wird.

2.4.3.1 Brenn- und Rohstoffe

Rohstoffe: Die Milch von Kühen macht den Großteil der Rohmilchproduktion aus; im Jahr 2015 waren das in den EU-28-Staaten 96,8%. Weitere 3,1% der Rohmilch kamen von Schafen, Ziegen und Büffeln. [32]

Brennstoffe: Der Brennstoffmix ist je nach den nationalen Gegebenheiten recht unterschiedlich. Zum Beispiel beziehen die Niederlande, aufgrund großer Vorkommen, die Brennstoffe aus Erdgas. In Deutschland liegt der Erdgasanteil bei etwa 70%. Genaue Daten zur aktuellen Brennstoffzusammensetzung in Österreich konnten nicht erhoben werden.

2.4.3.2 Strom und Wärme

Wärme: Im Molkereiwesen wird Wärme im Wesentlichen in Form von Warmwasser und Dampf für Erhitzungs- und Reinigungsprozesse benötigt [52]. Die Tabelle 2.18 zeigt den

Tabelle 2.17: Energiebedarfsanteile Molkerei (Quelle: [81])

Produkt	Prozess	Energieverbrauch (%)
Konsummilch	Anlieferung	2
	Lagerung	7
	Zentrifugieren, Homogenisieren, Pasteurisieren	38
	Verpacken	9
	Kühlen	19
	Druckluft	0,5
	Reinigung	9,5
	Wasserversorgung	6
	Gebäude	6
Käse	Anlieferung	19
	Käseerzeugung	14
	Käsebehandlung/ -reifung	14
	Kühlen	19
	Druckluft	5
	Reinigung	19
Butter	Kühlen	66
	Druckluft	8
	Reinigung	26

spezifischen Energiebedarf verschiedener Molkereiprodukte. Bei der Unterscheidung der Milchabfüllung in Mehrweg- oder Einweggebinde wird ersichtlich, dass die Reinigung einen wesentlichen Faktor des Energiebedarfs in der Milchindustrie darstellt.

Eine genauere Aufschlüsselung des Energiebedarfs zeigt Tabelle 2.19. Die angeführten Werte können unter vielfältigen Produktionsbedingungen variieren. Der spezifische Energieverbrauch ändert sich etwa mit dem Produktionsvolumen, aber auch mit dem Klima. Außerdem muss bei warmen Umgebungstemperaturen mehr Energie für die Kühlung aufgewendet werden [104].

Tabelle 2.18: Spezifischer Energiebedarf nach Produkten (Quelle: [52])

Endprodukt	Wärme [kWh/t Milch]	Strom [kWh/t Milch]
Milch in Flaschen		
-pasteurisiert	166,67	55,56
-sterilisiert	200	69,44
Milch in Einweg-Flaschen		
-pasteurisiert	69,44	50
-UHT	100	90,28
Magermilchpulver und Butter	583,33	90,28
Vollmilchpulver	805,56	80,56
Gereifter Käse		
-ohne Molkeverarbeitung	125	75
-mit Molkeverarbeitung	461,11	100

Strom: Neben Wärme werden etwa 34% des Gesamtenergieverbrauchs in Molkereien aus elektrischer Energie bezogen. Strom wird in der Regel von einem Energieversorgungsunternehmen bezogen. Die Abbildung 2.19 zeigt den Stromeinsatz der verschiedenen Sektoren in den Betrieben der Milchindustrie. Demnach ist der Strombedarf für die Produktion und die Kälteerzeugung maßgeblich. Die Tabelle 2.20 zeigt den Strombedarf in der Produktion der Andechser Molkerei (Bayern) bei einer durchschnittlichen Rohmilchverarbeitung von 321.000 kg pro Tag. [37]

2.4.3.3 Abwärme, Energiefluss und Verlustenergie

Das Bild 2.20 zeigt gemessene Daten beim Erhitzen von Milch in einer repräsentativen Molkerei, der Andechser Molkerei in Bayern. Die dargestellte Erhitzereinheit entspricht einer üblichen Bauweise in der Milchindustrie. In den ersten zwei Stufen wird die Milch in einem Wärmetauscher mit der warmen pasteurisierten Milch erhitzt. Die Milch wird erst in der letzten Stufe mit einem Warmwassersystem auf die Zieltemperatur gebracht. Mit der Rohmilch im Gegenstrom ist eine vollständige Abkühlung der Milch nicht möglich; deshalb

Tabelle 2.19: Spezifischer Energiebedarf nach Prozessen (Quelle: [52])

Prozess	Temperatur [°C]	Wärme [kWh/t Milch]
Reinigen der Flaschen	60-85	28-118
Sterilisieren der Flaschen		92-140
Reinigen von Hallen und Equipment	90	56-168
Sprühtrocknen (Milchpulver)	130-240	123-179
Verdampfen		7-168
Pasteurisieren	60-95	12
UHT direkt		118
UHT indirekt		17-24

wird das Milcherzeugnis im letzten Schritt mit Eiswasser gekühlt.

Der Ablauf der Butterei erfolgt nach dem Fließbild 2.21. Hier wird der Rahm in einer Vorwärmestufe auf 12,9°C erwärmt und anschließend entsteht in der Buttermaschine mit einem Rührwerk die Butter und diese wird mit Eiswasser abgekühlt [37].

Abwasser: Auch der Wasserverbrauch kann wegen den unterschiedlichen Produktportfolios oder Chargengrößen variieren bzw. ansteigen aufgrund von vermehrter Verdunstung

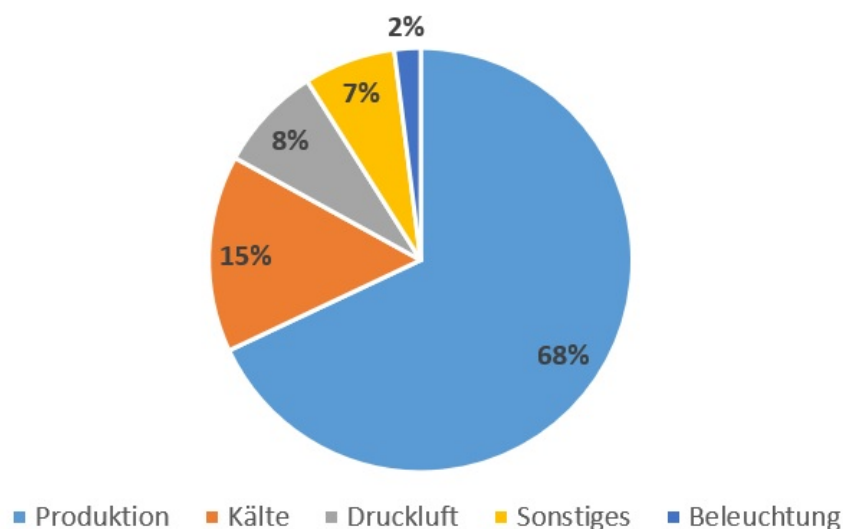


Abbildung 2.19: Stromeinsatz in Molkereien (eigene Darstellung, Datenquelle: [37])

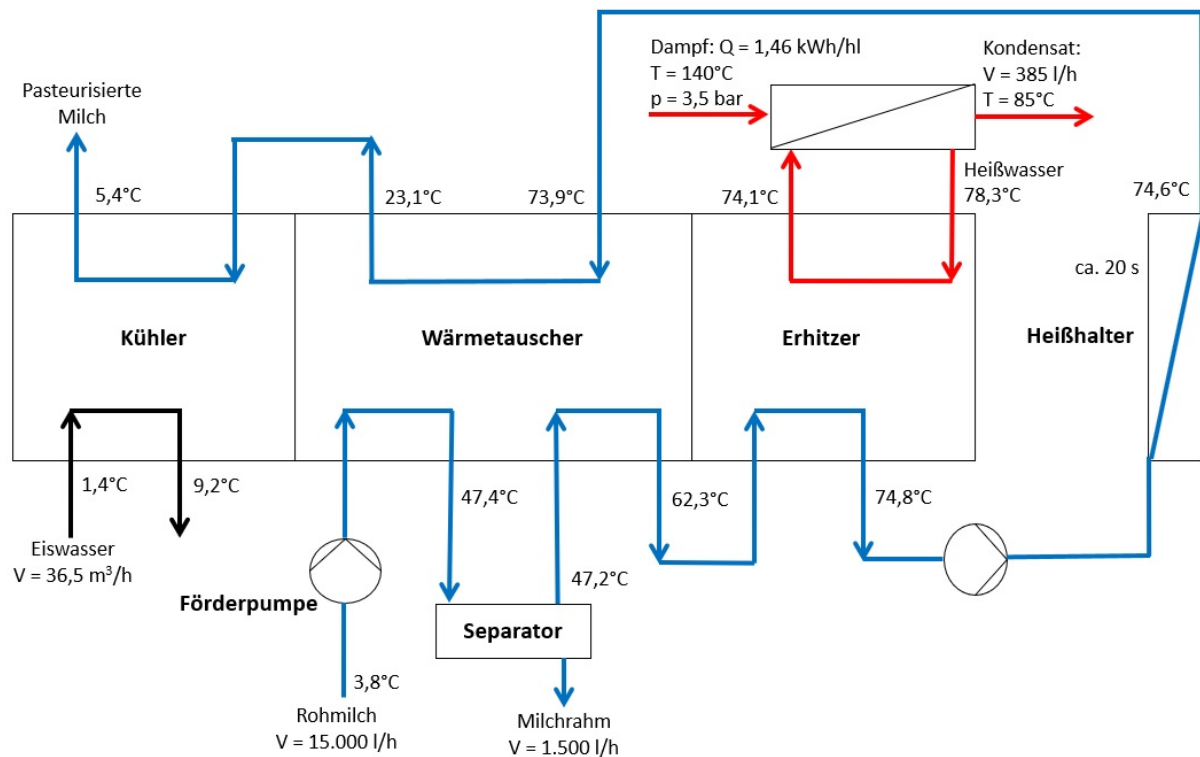


Abbildung 2.20: Schema Milcherhitzer (eigene Darstellung, Datenquelle: [37])

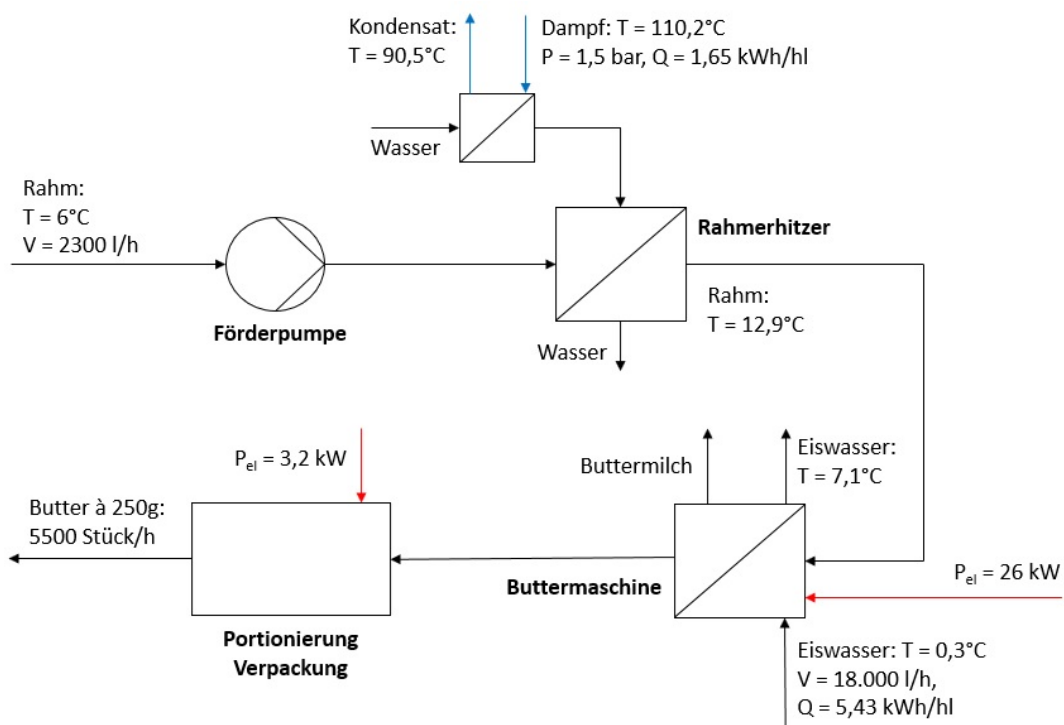


Abbildung 2.21: Butterei Ablaufschema (eigene Darstellung, Datenquelle: [37])

Tabelle 2.20: Spezifischer Strombedarf der Milchverarbeitung (Quelle: [37])

Anwendung	spezifischer Strombedarf
Milchrahmpumpe 1	6,47 kWh/h
Milchrahmpumpe 2	6,00 kWh/h
Baktofuge	27,34 kWh/h
Milchseparator 1	0,12 kWh/hl Milch
Milchseparator 2	0,12 kWh/hl Milch
Schlagrahmpumpen	0,69 kWh/hl Rahm
Joghurthomogenisator	0,15 kWh/hl Joghurt

durch höhere Temperaturen im Sommer. Die Tabelle 2.21 zeigt die Aufschlüsselung von Energieverbrauch, Wasserverbrauch und Abwasser einer Molkerei, welche Marktmilch, Milchpulver, Butter, Käse und Speiseeis verarbeitet. [104]

Tabelle 2.21: Wasserverbrauch und Abwasser (Quelle: [104])

Produkt	Energieverbrauch	Wasserverbrauch	Abwasser
Herstellung von Marktmilch aus 1 l angelieferter Milch	0,07-0,2 kWh/l	0,6-1,8 l/l	0,8-1,7 l/l
Herstellung von Milchpulver aus 1 l angelieferter Milch	0,3-0,4 kWh/l	0,8-1,7 l/l	0,8-1,5 l/l
Herstellung von 1 kg Speiseeis	0,6-2,8 kWh/kg	4,0-5,0 l/kg	2,7-4,0 l/kg

2.4.4 Wärmenutzung

Abwärme kann oft intern genutzt werden. So zeigt die Abbildung 2.22 eine Möglichkeit, die warme Molke aus einem Nebenprozess für die Erwärmung der pasteurisierten Konsummilch einzusetzen. Der Kreislauf (a) zeigt mit einem regenerativen Wärmetauscher eine schlechte Performance. Hier wird die Rohmilch mit der 74°C heißen Milch auf 40°C erwärmt. Eine zusätzliche Dampfheizung mit 995 kW ist erforderlich, um die Milch auf die Pasteurisations-

temperatur von 74°C zu bringen. Der Kreislauf (b) zeigt, dass beim Einsatz von Abwärme aus der Molkeproduktion Heißmilch mit 50°C ausreicht um die Rohmilch auf bereits 40°C vorzuwärmen. Durch die Wärmerückgewinnung muss aus dem Dampfsystem der Molkerei nur mehr Dampf mit einer Leistung von 410 kW anstatt 995 kW bezogen werden. [63]

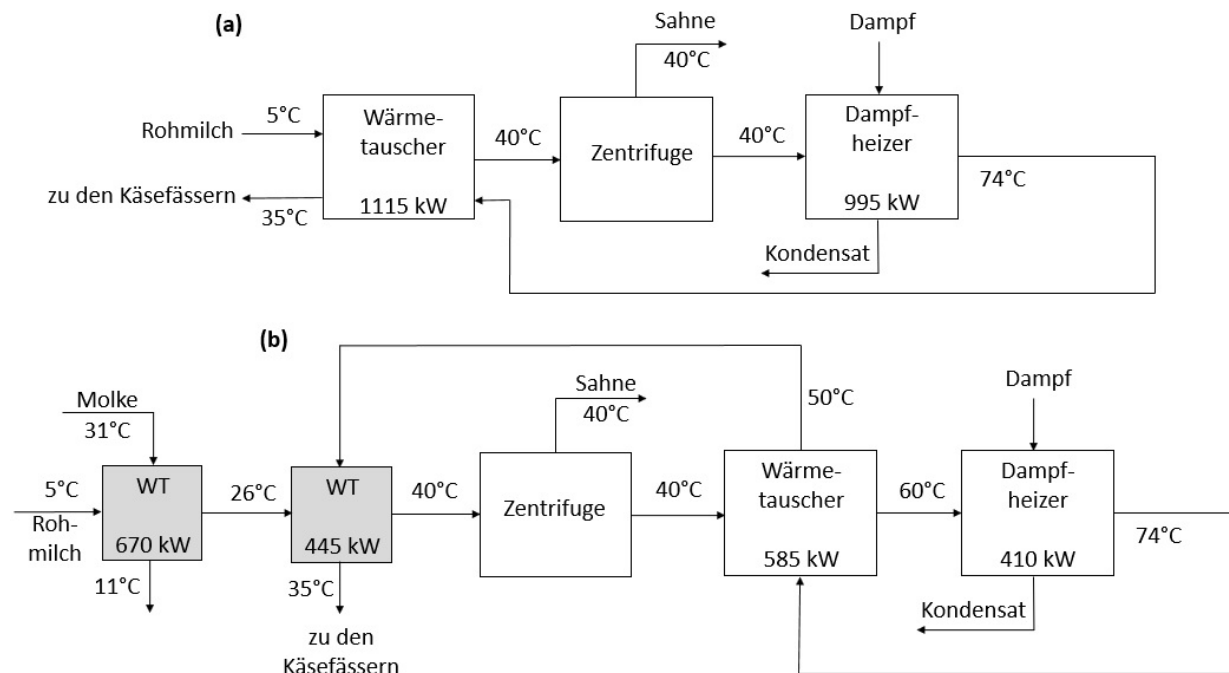


Abbildung 2.22: Wärmerückgewinnung Molkerei (eigene Darstellung, Datenquelle: [63])

2.4.5 Potentiale

Ein wesentliches Potential ergibt die noch vorhandene Abwärme der Milch nach den Wärmebehandlungen. Hier besteht noch ein großes ungenutztes Wärmepotential. Da gleichzeitig ein großer Kühlbedarf besteht, ist es sinnvoll eine Sorptionskühlung anzuwenden. Um Sorptionskälteanlagen zu integrieren, ist eine umfangreiche Datenerhebung und eine genaue Erfassung aller verschränkten Prozesse erforderlich. [35]

Ein wesentliches Energiesparpotential bietet die Homogenisation. Eine Möglichkeit besteht darin die Konstruktion der Homogenisatoren anzupassen, um den aktuell erforderlichen Druck von bis zu 300 bar zu verringern. Durch eine angepasste Konstruktion der Homogenisatoren kann die Anlagengröße reduziert werden, was zu einem geringeren Stromverbrauch

führt.

Des Weiteren sollte die Pasteurisierung kontinuierlich ablaufen anstatt diskontinuierlich, um den Abwasser- und Energieverbrauch zu verringern. Eine zentrale Bedeutung hat die Wärmerückgewinnung von der Heißmilch zur Rohmilch. Die Rückgewinnung sollte sowohl bei der Pasteurisation als auch bei der Milchmolke genutzt werden. [59]

2.4.6 Besonderheiten der Milchindustrie

Typischerweise sind die Betriebe der Lebensmittelindustrie, und somit auch der Milchindustrie, sowohl national als auch international dezentral verteilt. Das macht es schwierig, die Ist-Situation der eingesetzten Technologien zu analysieren. Somit ist auch eine Potentialanalyse und in Folge die Effizienzsteigerung für verschiedene Standorte individuell.

Wie in den meisten Bereichen der Nahrungsmittelindustrie ist die Kühlung der Produkte ein wichtiger Faktor beim Energiebedarf. Durch veränderliche Umgebungstemperaturen unterliegen Kältelasten teilweise wesentlichen Schwankungen. Die Tabelle 2.22 zeigt einige Temperaturen für Prozesse mit Kühlbedarf.

Tabelle 2.22: Kühlung verschiedener Milchprodukte (Quelle: [35])

Prozess	Temperatur [°C]
Rohmilch Anlieferung, Versandmilch	3-4
Rahmkühlung	8-12
Kühlung Topfen im Lager	6
Kühlung Buttermilch	6
Molkekühlung	8
Kühlung Schmelzkäse	6

2.5 Papierindustrie

Österreich ist, ähnlich wie das ebenfalls stark bewaldete Schweden, ein bedeutender Produzent von Papiererzeugnissen. Die Papierindustrie ist der größte Energieverbraucher im industriellen Sektor Österreichs. Durch die hohe Präsenz steht für die österreichische Papierindustrie viel Literatur zur Verfügung, und die folgende Abhandlung bezieht sich vorwiegend auf die Papierindustrie in Österreich.

2.5.1 Regionale Produktion und wichtige Erzeugnisse

Pro Jahr werden in 24 Betrieben fünf Mio. Tonnen Papier hergestellt, wobei der Inlandsverbrauch bei zwei Mio. Tonnen liegt. Knapp die Hälfte der Betriebe sind mit 100.000 Tonnen pro Jahr große Papiererzeuger. Fasern werden in Österreich vorwiegend für den integrierten Verbrauch produziert, also für die Papierproduktion im eigenen Werk. Es gibt acht Zellstofferzeuger und vier Holzstofferzeuger. Zwölf Betriebe kaufen und verarbeiten Altpapier für ihre Produktion. [6]

2015 wurden in Österreich 1.812.471 Tonnen Primärfaserstoffe und 2.035.271 Tonnen Sekundärfaserstoffe verarbeitet. Bei den Primärfaserstoffen entfallen 25% auf gebleichten Zellstoff, 31% auf ungebleichten Zellstoff, 20% auf Holzstoff und 25% auf Textilzellstoff. Die Sekundärfaserstoffe teilen sich auf in 37% Deinkstoff und 63% Nicht-Deinkstoff aus Altpapier. [6]

2.5.2 Verfahren

Papier ist ein flächiger Werkstoff, der vorwiegend aus Fasern pflanzlicher Herkunft besteht. Durch die Entwässerung einer Faserstoffsuspension mittels Sieb wird ein Faserverbund gebildet und durch mechanischen Druck und Dampf weiter entwässert. Die Papierherstellung kann in vier Hauptbereiche gegliedert werden. Sie beginnt mit der Halbstofferzeugung und Stoffaufbereitung nach Abbildung 2.23 und verläuft über die Papiermaschine, gefolgt von der Veredelung gemäß Abbildung 2.24. [60]

Bei der Halbstofferzeugung werden Zell-, Holz- und Altpapierstoff hergestellt. Durch che-

mischen bzw. mechanischen Aufschluss werden Primärfasern wie Zellstoff und Holzstoff erzeugt. In der Regel wird Holzstoff direkt am Standort der Papiererzeugung hergestellt und Zellstoff in eigenen Zellstofffabriken produziert, dort getrocknet, und zu den Papierfabriken transportiert.

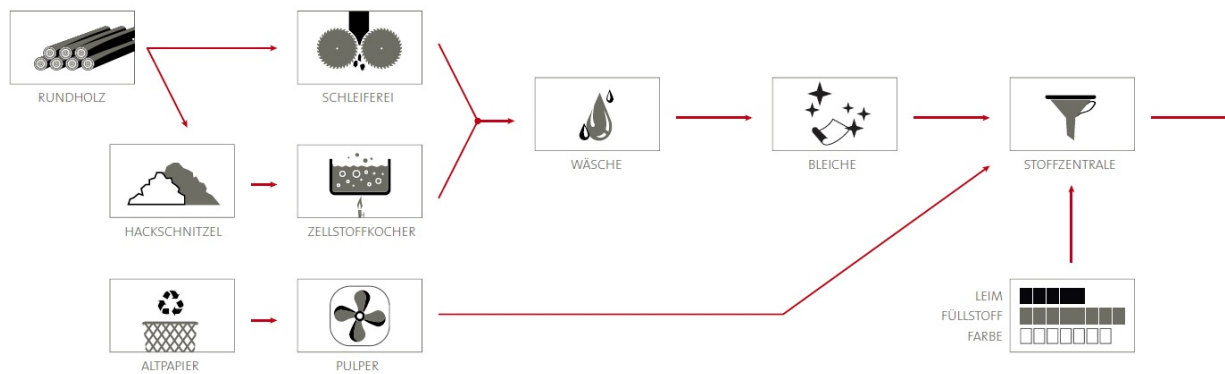


Abbildung 2.23: Papierherstellung: Halbstoffherzeugung und Stoffaufbereitung (Quelle: [6])

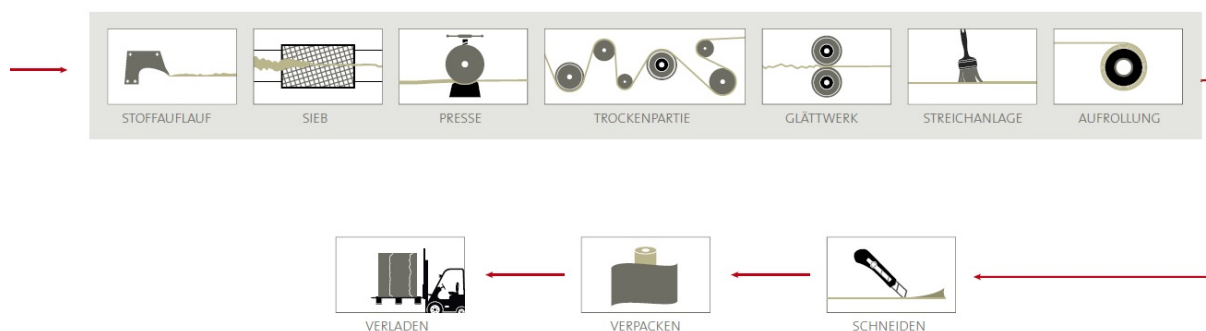


Abbildung 2.24: Papierherstellung: Papiermaschine und Veredelung (Quelle: [6])

2.5.2.1 Halbstoffherzeugung

Nach Abbildung 2.25 kann Zellstoff mechanisch oder chemisch aufgeschlossen werden. Beim mechanischen Verfahren wird holzhaltiger Zellstoff unter Beigabe von Wasser an einem schnell rotierenden Stein gewonnen. Dieser Holzschliff weist beschädigte Fasern auf und führt somit zu einer niedrigeren Papierfestigkeit. Um einen sauberen, holzfreien Zellstoff herzustellen, muss auch das Lignin mittels chemischer Erschließung aus der Faser beseitigt

werden. Je nach Chemikalieneinsatz wird zwischen Sulfat- und Sulfitverfahren unterschieden. Beim Sulfitverfahren besteht die Kochsäure aus freier und gebundener schwefeliger Säure. Die Kochflüssigkeit dringt beim Sulfitverfahren in Längsrichtung in die Holzfasern ein und baut das Lignin ab, welches sodann ausgewaschen werden kann. Das alternative Sulfatverfahren ist ein alkalisches Verfahren, welches mit teuren Installationen verbunden ist. Es ist das verbreitetste Verfahren und deckt etwa 70% der Zellstoffproduktion ab. Bei diesem Prozess kommen die Hackschnitzel in einen Dampfkessel, dem Zellstoffkocher, welchem Chemikalien zugesetzt werden, um das faserbindende Lignin zu zersetzen und die Fasern voneinander zu trennen. Im Zellstoffkocher herrschen Temperaturen von etwa 150-200°C. Nach dem Kochen wird der Zellstoff gesiebt und die ausgesiebten Chemikalien werden recycelt. [31]

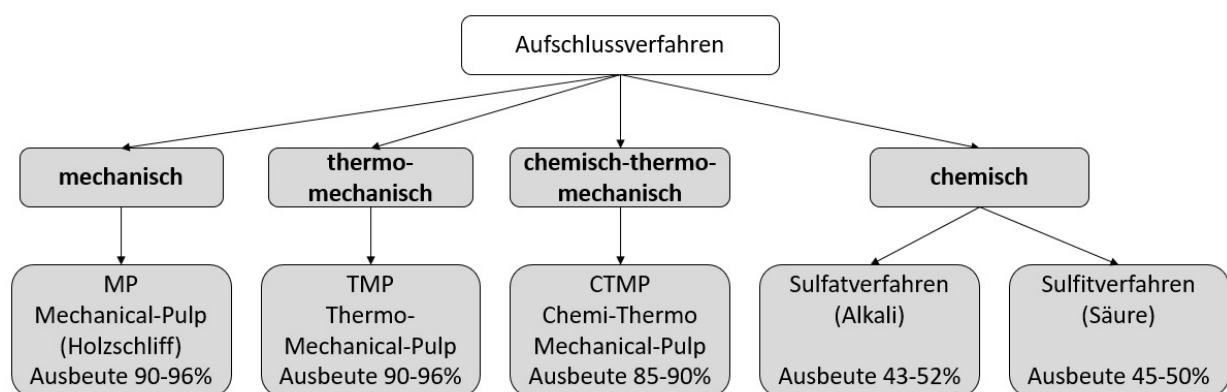


Abbildung 2.25: Aufschlussverfahren (eigene Darstellung)

2.5.2.2 Bleichen

Der aus dem Holzaufschlussverfahren gewonnene Zellstoff ist bräunlich und macht das Bleichen für die Produktion eines hochwertigen Druckpapiers unerlässlich. Das Bleichen führt de facto den Aufschluss der Kochung fort und entfernt das vorhandene Restlignin aus dem Zellstoff. Die Bleiche ist eine Abfolge verschiedener chemischer Verfahren mit Waschstufen zwischen den chemischen Behandlungen, um Abbauprodukte zu entfernen. Als Bleichmittel werden Chlor, Chlorverbindungen, Ozon, Wasserstoffperoxid und Sauerstoff in verschiedenen Formen verwendet. [31]

2.5.2.3 Sekundärfasern

Für die Verarbeitung wird ein Gemenge von Zeitungen, Zeitschriften und Fettsäureseife zusammen mit großen Mengen an warmem Wasser in einem Auflösebehälter, dem Pulper, rotiert. Der Wasseranteil liegt bei 99%. Die Faserbündel werden dadurch aufgelöst, die Druckfarbe von den Fasern gelöst und unerwünschte Materialien abgesondert. Der verschmutzte Faserstoff wird in einem Behälter, der sogenannten Zelle, erneut mit Fettsäureseife vermengt. Dabei wird von unten nach oben Druckluft eingeblasen und es entsteht an der Oberfläche eine Seifenlauge, in der sich die gelösten Farbbestandteile sammeln. Nun kann diese verunreinigte Schaumschicht von der Oberfläche abgeschöpft werden. Um einen reinen Faserstoff zu erhalten, wird dieser Vorgang mehrmals wiederholt. [79]

2.5.2.4 Stoffaufbereitung

Die Stoffaufbereitung ist erforderlich, um den Halbstoff für die Papiermaschine vorzubereiten. Die Stoffaufbereitung umfasst Arbeitsgänge wie Suspendieren, Reinigen und Mahlen der Halbstoffe. Außerdem erfolgt in der Stoffzentrale die Vermischung der verschiedenen Rohstoffe, um die Anforderungen der zu fertigenden Papiersorte zu erreichen. Auch Füll- und Hilfsstoffe werden zugeführt, um die Papierqualität zu steigern und die Produktivität zu erhöhen. Das Ergebnis der Stoffzentrale ist der sogenannte Fertig- oder Ganzstoff. [60]

2.5.2.5 Papiermaschine

Suspension im Stoffauflauf: Um eine Flockung sicher zu verhindern, wird der Wasseranteil der Faserstoffmischung auf etwa 99% gebracht. Die Suspension wird auf Papierbandbreite verteilt und mit Druck auf Siebgeschwindigkeit beschleunigt. [31], [60]

Blattbildung in der Siebpartie: Wenn die Suspension den Stoffauflauf verlässt, und in Berührung mit dem langsameren Sieb kommt, ergibt sich ein Strömungswiderstand. Dadurch bildet sich auf dem Sieb eine Faserlage, die nach oben hin anwächst. Die Entwässerung zur Blattbildung kann durch Filtration oder Eindickung geschehen. Bei der Filtration tritt

ein scharfer Übergang auf zwischen der gebildeten Fasermatte am Sieb und der Suspension darüber. Wenn sich die Fasern der Stoffsuspension nicht mehr frei bewegen können, gilt die Blattbildung als abgeschlossen; der Wassergehalt liegt nun bei etwa 80%. [31], [60]

Entwässerung in der Pressenpartie: Bei der Blattbildung wurden die wichtigsten Blatteigenschaften festgelegt. Das Papierblatt wird nun weiter entwässert und verdichtet. Durch mechanischen Druck (senkrecht zur Oberfläche des Blattes) wird der Trockengehalt erhöht. Das ausgepresste Wasser wird durch einen Endlosfilz aufgenommen und abgeführt. Nach dem aktuellen Stand der Technik sind in der Pressenpartie Trockengehalte von über 50% zu erreichen. Zum einen verdichtet der Pressvorgang das Papiergefüge, zum Anderen wird die Festigkeit erhöht und die Oberflächengüte entscheidend beeinflusst. Die mechanische Entwässerung ist aus energetischer Sicht von großer Bedeutung, da die Steigerung des Trockengehalts in der Pressenpartie um 1% eine Reduzierung des thermischen Energiebedarfs um 4% in der Trockenpartie ermöglicht. [31], [60]

Trockenpartie: Nach der Pressenpartie muss das verbliebene Wasser mittels Verdampfung entfernt werden. Die übliche Art der Papiertrocknung ist eine Kontaktrocknung, dabei durchläuft die Papierbahn slalomartig bis zu 100 dampfbeheizte Trockenzylinder. Beginnend mit der Aufwärmphase, bei der lediglich Wärme an das Papier weitergeleitet wird, durchläuft die Trocknung verschiedene Stufen. In der anschließenden Phase folgt die Hauptverdampfung bei der das nasse Papier die Feuchte an der Oberfläche durch Verdampfung abgibt. Dem folgt die dritte und letzte Stufe, bei der ein Wärmeübergang durch die getrocknete Paperoberfläche erfolgt, welcher die Verdampfung im Inneren des Papiers anregt. Das verdampfte Restwasser des Papiers wird in einer geschlossenen Trockenhaube abgesaugt und in die Wärmerückgewinnung überführt. [31], [60]

Glättwerk: Als Endgruppe, dem Abschluss der Trockenpartie, befindet sich oft ein Glättwerk. Hier wird die nahezu trockene Papierbahn verdichtet und geglättet. Neben Glättwerken mit Stahlwalzen gibt es auch Glättwerke mit Softkalandern. Dabei besteht ein Walzenpaar aus einer Stahlwalze und einer mit Kunststoff überzogene Walze, um bessere Glätten

zu erzielen. Das fertige Papier wird mit einer Feuchte von etwa 5-8% auf Stahlkerne, sogenannte Tamboure, aufgerollt. [31], [60]

2.5.2.6 Veredelung

Oberflächenveredelung: Zur Oberflächenveredelung kommen Leimpresen und Filmpresen in Frage, welche in den Papiermaschinen integriert sind. In der Leimpresse wird, mittels Gummi-überzogenen Walzen, Stärke zur Oberflächenverfestigung aufgetragen. Wegen der gestiegenen Anforderung an die Geschwindigkeit der Maschinen und an die Qualität des Papiers, ging man über zu Mehrwalzensystemen, den sogenannten Filmpresen. Bei Filmpresen wird ein exakter Film vordosiert und im Walzenspalt auf das Papier übertragen. [31], [60]

Streichmaschine: Um höhere Erwartungen an das Papier, wie Weiße und Glanz, zu erfüllen, wird auf das Rohpapier eine Strichlage aus Pigmenten, Bindemitteln und Hilfsstoffen aufgetragen. Als Kernstück der Streichmaschine gilt ein Auftragswerk mit einem Streichaggregat. Es wird nacheinander jeweils eine Seite gestrichen und mit Infrarot- oder Luftflusstrocknern getrocknet. Die Trocknung kann mittels Infrarot- oder Luftflusstrocknern erfolgen. Mittels Filmstrich wird auf das Papier eine bestimmte Strichstärke appliziert und beim optionalen Rakelstrich wird ein weiterer Strich aufgetragen und mit einer Rakel abgetragen, um eine glatte Oberfläche zu erhalten. [31], [60]

2.5.3 Energiekennzahlen

In Abbildung 2.26 sind die Abwärm Temperaturen verschiedener Industriesektoren ersichtlich. Das Diagramm zeigt, dass die verschiedenen Temperaturen der Abwärme in der Papierindustrie im niedrigen Temperaturbereich liegen. Die Tabelle 2.23 zeigt diese Erkenntnis genauer. Der Temperaturbereich der Abwärme in der Papierindustrie liegt zwischen 20°C (Abwasser der Papiermaschine) und 160°C (Abluft aus dem Vakuumgebläse).

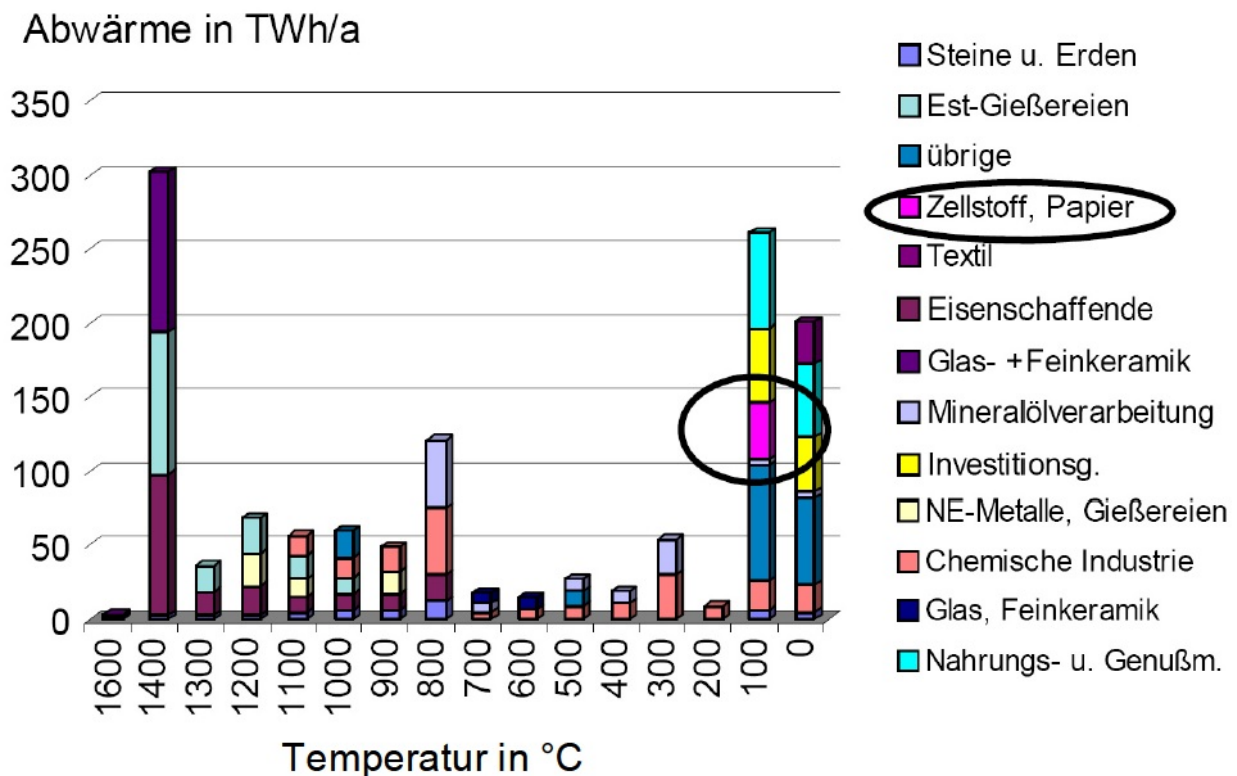


Abbildung 2.26: Temperaturen industrieller Abwärme (Quelle: [60])

2.5.3.1 Brenn-, Rohstoffe und weitere Einsatzfaktoren

Rohstoffe: Im Jahr 2015 wurden in Österreich für die Herstellung von Papier und Zellstoff 7.341.000 Festmeter Holz bezogen. 3.810.000 Festmeter entfielen auf Hackschnitzel, welche ein Nebenprodukt der Sägeindustrie sind. Die restlichen 3.531.000 Festmeter entfielen auf Rundholz, überwiegend Fichte und Tanne. [6]

Brennstoffe: Im Jahr 2015, wurden wie aus Tabelle 2.24 ersichtlich, 15.478 GWh Brennstoffe verbraucht. Der Anteil der fossilen Brennstoffe Kohle, Heizöl und Erdgas lag bei 46,1% wobei Erdgas mit 38,2% der Gesamtbrennstoffe den größten Anteil der fossilen Brennstoffe darstellte. Der Bedarf an biogenen Brennstoffen, welche sich in Ablauge, Rinde, Schlamm und Biomasse einteilen lassen, lag 2015 bei 53,9%. Die betriebsinterne Ablauge war mit 43,8% der wichtigste Energieträger unter den biogenen Brennstoffen.

Tabelle 2.23: Abwärmeströme in der Papierindustrie (Quelle: [60])

Abwärmestrom	Temperaturniveau
Abwasser Papiermaschine	20-40°C
Abwasser Stoffaufbereitung mit Deinking	40-60°C
Abwasser Stoffaufbereitung ohne Deinking	30-50°C
Abwasser Schleiferei/TMP-Anlage	60-70°C
Abluft Produktionshalle	30-40°C
Abluft Vakuumpumpen	40-50°C
Abluft Vakuumgebläse	130-160°C
Abluft Trockenpartie Papiermaschine	60-80°C
Abluft Trockenpartie Streichmaschine	30-40°C

Tabelle 2.24: Brennstoffe Papierproduktion (Quelle: [6])

Brennstoff	Verbrauch [GWh]
Kohle	1.162
Heizöl	48
Erdgas	5.920
Ablauge	6.775
Rinde	541
Abwasserschamm	5.920
Biomasse fest/gasförmig	319
Gesamt	15.478

Weitere Einsatzfaktoren: Neben den Rohstoffen sind in der Papierindustrie auch einige Chemikalien wie Füll- und Strichstoffe im Einsatz. Nach Tabelle 2.25 wurden im Jahr 2015 1.353.771 Tonnen Chemikalien für die Herstellung von Papier verbraucht.

Ein weiterer wichtiger Betriebsstoff in der Papierindustrie ist Wasser mit einem Gesamtverbrauch von 179 Mio. m³ im Jahr 2015. Davon wurden 69 Mio. für Kühlwasser und

Tabelle 2.25: Einsatzstoffe Papierproduktion (Quelle: [6])

Einsatzstoff	Tonnen
Mineralische Stoffe	926.632
Bindemittel	141.521
Farbstoffe und optische Aufheller	8.901
Sonstige	7.678
Hilfsstoffe der Papierherstellung	34.900
Hilfsstoffe der Zellstoffherstellung	234.139
Chemikalien gesamt	1.353.771

110 Mio. m³ für Prozesswasser genutzt, wovon 101 Mio. m³ als Abwasser einer Kläranlage zugeführt wurden. Eine vollständige Wiederverwendung des Wassers in einem geschlossenen Kreislauf ist nicht möglich, da die Qualitätsanforderungen in der Papierindustrie sehr hoch sind. [6]

2.5.3.2 Strom und Wärme

Wie aus Abbildung 2.27 ersichtlich, wird die Energie für die Herstellung von Papier aus Dampf, Gas und Strom bezogen. Mehr als die Hälfte der Energie wird als Dampf bereitgestellt, welcher vorwiegend zur Trocknung der Papierbahn mittels Zylindertrocknung in der Papiermaschine Anwendung findet. Zu den großen Stromverbrauchern in der Papierindustrie gehören die Mahlung, Antriebe, Streichmaschine und Vakuumerzeugung. Tabelle 2.26 zeigt, dass im Jahr 2015 9.950 GWh Dampf verbraucht wurden, wobei mehr Dampf erzeugt wurde, als verwendet wurde.

Zur Deckung des Wärmebedarfs wird bei der Papiererzeugung vorwiegend Wasserdampf verwendet, welcher überwiegend im Dampfkessel am Standort erzeugt wird. In der Papiermaschine kommt vorwiegend Sattedampf im ND und MD-Bereich zum Einsatz. Der Großteil wird mit ND-Dampf gedeckt, welcher einen Druck von 2-4 bar und eine Temperatur von 130-150°C aufweist. MD-Dampf mit 8-15 bar und einer Temperatur von 175-200°C wird für

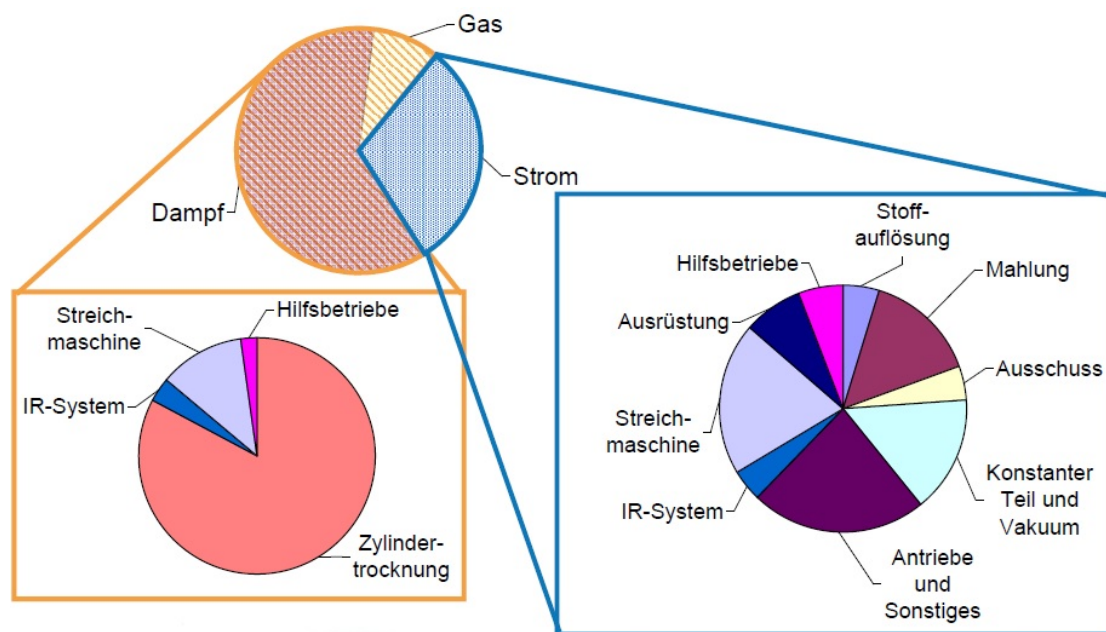


Abbildung 2.27: Energiebedarf Papierproduktion (Quelle: [28])

Tabelle 2.26: Dampf Papierproduktion (Quelle: [6])

Position	Verbrauch [GWh]
Dampferzeugung	10.769
Fernwärme Abgabe	1.349
Fernwärme Bezug	530
Dampfverbrauch	9.950

die Heizgruppe am Ende der Trockenpartie genutzt. Ein ausgereiftes Dampf- und Kondensatsystem verbraucht üblicherweise 1,1-1,2 Tonnen Dampf zum Verdampfen einer Tonne Wasser. [10]

Durch den Umstand, dass die Abfälle des Hauptrohstoffes Holz für die Stromerzeugung genutzt werden können, wird ein beachtlicher Anteil des Strombedarfs der Papierproduktion betriebsintern erzeugt. 4.471 GWh Strom wurden im Jahr 2015 laut Tabelle 2.27 verbraucht, wobei 2.603 GWh an den Produktionsstätten erzeugt werden konnten. 94,3% wurden aus den KWK-Anlagen Gasturbine, Dampfgedruckt und Dampfkondensation erzeugt. Der Fremdstromverbrauch lag bei 2.090 GWh; im Gegenzug konnte eine Stromausspeisung von

222 GWh erreicht werden.

Tabelle 2.27: Strom Papierproduktion (Quelle: [6])

Erzeuger	Verbrauch [GWh]
Gasturbinen	484
Dampfegendruck	1.917
Dampfkondensation	54
Wasserkraft	148
Sonstige Anlagen	0
Erzeugung gesamt	2.603
Minus Einspeisung	222
Plus Fremdstromverbrauch	2.090
Verbrauch gesamt	4.471

2.5.3.3 Spezifischer Energiebedarf

Der Energiebedarf unterscheidet sich je nach Papiersorte und Betriebsstandort deutlich. Den Unterschied des spezifischen Energiebedarfs an Strom und Wärme von gängigen Papiersorten zeigt Tabelle 2.28.

Die Abbildung 2.28 zeigt die Aufteilung des spezifischen Energieverbrauchs innerhalb einer Papiermaschine. Man sieht, dass etwa 70% des Energiebedarfs in Form von thermischer Energie zur Verfügung stehen müssen. Hervorzuheben ist, dass der Bedarf an thermischer Energie in der Trockenpartie mit 855 kWh/t einen beträchtlichen Anteil ausmacht, nämlich 64% am Gesamtenergiebedarf der Papiermaschine.

Außerdem konnte für den Prozess der Sauerstoffentlignifizierung, ein Schlüsselvorgang zur Herstellung gebleichten Halbstoffes, ein spezifischer Wärmebedarf von 125 kWh/t ausgemacht werden. Dieser Prozess wird bei Temperaturen von 80-120°C mit einer Verweilzeit von 50-60 Minuten betrieben. Neben der Wärme ist hierfür ein Einsatz von 40-50 kWh Strom pro Tonne Zellstoff erforderlich. [80], [64]

Tabelle 2.28: Spezifischer Energiebedarf Papierproduktion (Quelle: [98])

Sorte	Energie- form	spezifischer Energie- bedarf [GWh]
Holzstoffhaltige Papiere	Strom	1.200 - 2.100
	Wärme	1.000 - 1.800
Gestrichene holzstofffreie Papiere	Strom	600 - 1.000
	Wärme	1.200 - 2.100
Holzstofffreie Spezialpapiere	Strom	600 - 3.000
	Wärme	1.600 - 4.500
Verpackungspapiere aus Altpapier (ohne Deinking)	Strom	300 - 700
	Wärme	1.100 - 1.800
Verpackungspapiere aus Altpapier (mit Deinking)	Strom	900 - 1.400
	Wärme	1.000 - 1.600

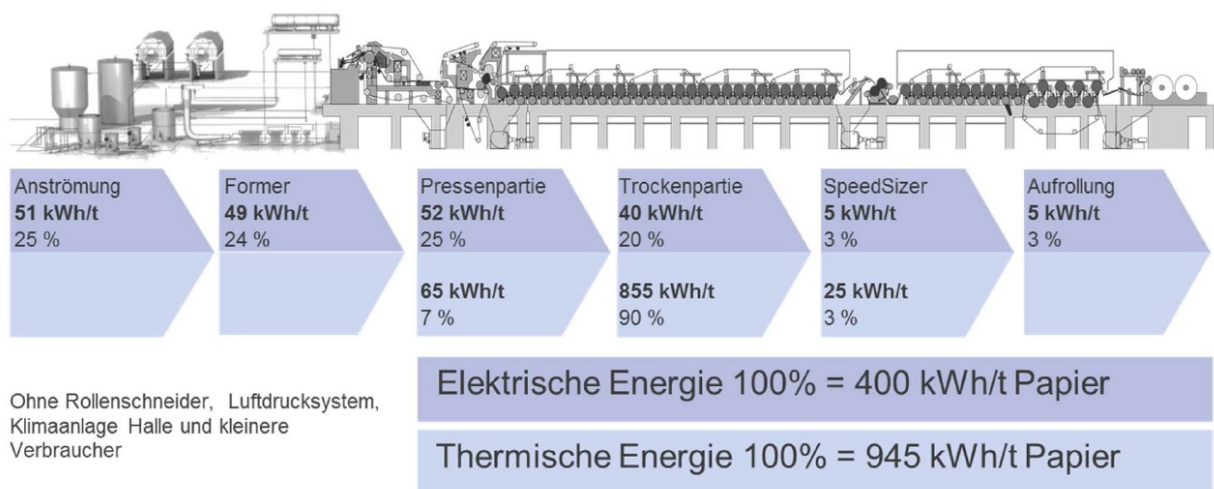


Abbildung 2.28: Spezifischer Energieverbrauch einer Papiermaschine (Quelle: [28])

2.5.3.4 Abwärme, Energiefluss und Verlustenergie

Wärme: Das Sankeydiagramm 2.29 zeigt die Energiebilanz einer Trockenpartie. Hier sind 50 Tonnen Dampf pro Stunde notwendig um im gleichen Zeitraum 41.8 Tonnen Wasser aus der Papierbahn zu verdampfen. Das entspricht einem Faktor von 0,83 verdampftes Wasser

aus dem Papier pro kg eingesetzten Dampf. Theoretisch erreichbare Werte für diesen Faktor können dem Anhang A entnommen werden.

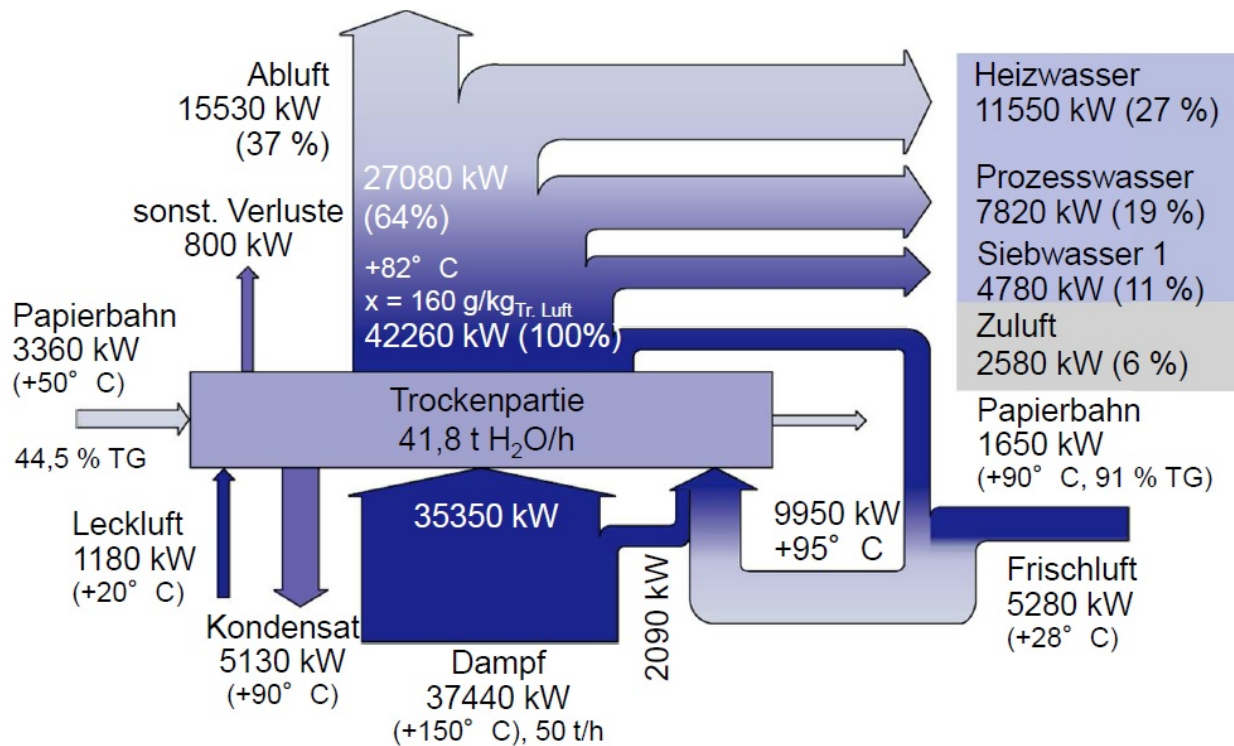


Abbildung 2.29: Wärmeströme über Trockenpartie und WRG (Quelle: [28])

Der zugeführte Dampf dieser Papierbahn entspricht einer Leistung von 35.350 kW . Mit der Verdampfung des Warmwassers aus dem Papier wird eine Gesamtleistung von 42.260 kW erzeugt, wovon 37% an die Umgebung verloren gehen. Die anderen 63% können als Heizwasser, Prozesswasser, Siebwasser und Zuluft genutzt werden. Weiters ist im System Trockenpartie/Wärmerückgewinnungsanlage mit 800 kW an sonstigen Leistungsverlusten zu rechnen. Eine Berechnung des zur Trocknung erforderlichen Dampfes bei gegebenen Trockengehalt kann nach BERLIN, [62] durchgeführt werden.

Wie zuvor beschrieben, wird der Eigenstrombedarf teilweise durch interne Verstromung der Biomasseabfälle gedeckt. Die Wärme aus den Hoch- und Niederdruckturbinen aus der Stromproduktion wird, im Sinne einer Kraft-Wärme-Kopplung, wiederum für Fertigungsprozesse verwendet. Hier kommt es jedoch zu Situationen, in denen mehr elektrische Energie benötigt wird, und die gleichzeitig anfallende Wärmeenergie nicht zur Gänze genutzt werden kann. Dieser Wärmeüberschuss wird dann ungenutzt an die Umgebung abgegeben und

beträgt für ein repräsentatives Papierwerk mit einer Papierproduktion von 1,67 t/d in Form von Dampf nahezu 300 t/h mit 163°C bei 4 bar. [77, S. 196]

Strom: 30% des Strombedarfs in der Papierindustrie wird von Pumpen verbraucht. Die Pumpen arbeiten oft unter ungünstigen Bedingungen, da es oft Bypass- und Drosselregelungen gibt. Der Kernprozess der Stoffaufbereitung ist die Mahlung, welche in Einzelfällen bis zu 60% des Strombedarfs ausmachen kann. Die Mahlung tritt in der Regel als eine große Einheit mit hohem Strombedarf auf. [10]

2.5.4 Potentiale

Prinzipiell können im Papierherstellungsprozess vier Bereiche ausgemacht werden, die besonders energieintensiv sind. Dazu gehört unter den chemischen Verfahren die Zellstoffherstellung mittels Sulfatverfahren. Hier werden die Rohstoffe in einem Kessel 3-6 h bei 7-10 bar und 150-200°C erhitzt. Außerdem sind über alle Herstellungsverfahren Mahlen, Pressen und Trocknen Prozesse mit hohem Energiebedarf. In der Presspartie sind für die Hydraulikanlagen hohe Drücke erforderlich und in der Trockenpartie werden, wie erwähnt, große Mengen an Dampf benötigt. [98]

Die Möglichkeiten für Einsparungspotentiale sind in der Papierindustrie vielfältig, da die Vorgänge komplex und die Anlagen sehr unterschiedlich sind. Eine Rückgewinnung von Abwärme mit Temperaturen über 140°C zur internen Verwendung ist Stand der Technik. Es gibt die Möglichkeit, Wärme von Rauchgasen zu nutzen, was aber noch nicht üblich ist. Mehr als 50% der Wärmeenergie wird biogen gewonnen und der Rest vorwiegend aus Erdgas bezogen. Hier können Ersatzbrennstoffe eingesetzt werden, um die fossilen Energieträger zu reduzieren. In den bestehenden Anlagen wäre ein Betrieb mit biogenem Methan bereits möglich, sofern es die finanziellen Möglichkeiten zulassen. Ein bedeutendes Potential bieten auch Elektroantriebe im gesamten Betrieb. Pumpen werden oft mit konstanter Drehzahl betrieben und der Durchfluss wird über Ventile gesteuert. Diese können mit Frequenzumrichter ausgestattet werden, um die Drehzahl anzupassen und elektrische Energie einzusparen. Außerdem können die zur Papiertrocknung eingesetzten Vakuumgebläse mit

Wärmetauschern versehen werden. Bei der Kompression erreicht die Abluft aus dem Gebläse 130 - 160°C und damit könnten biogene Rohstoffe getrocknet oder es könnte Zuluft erwärmt werden. [96], [98]

Außerdem sind bei der Papierherstellung langfristig einige Breakthrough-Technologien zu erwarten. Zum einen sollen bei der Zellstoffherstellung neben den herkömmlichen Chemikalien auch Enzyme eingesetzt werden, um den Aufschluss effizienter zu gestalten, zum anderen können in der Streichanlage neue Beschichtungsverfahren eingesetzt werden, wie zum Beispiel die Pulverbeschichtung. [98]

2.5.5 Besonderheiten der Papierindustrie

Aufgrund der verwertbaren betriebsinternen Abfälle aus Holz kann bereits ein großer Teil der Brennstoffe biogen bezogen werden. Außerdem können Hackschnitzel, welche als Abfallprodukt in der Sägeindustrie anfallen, ohne zusätzliche Umrüstungen für die Dampferzeugung verwendet werden. Durch die zurückgewonnene Energie bei der Chemikaliengewinnung können Zellstoffanlagen im Idealfall energieautark produzieren. Dabei besteht ferner die Möglichkeit Niedertemperaturwärme und Strom auszuspeisen. [96]

In Papierfabriken ist der Energieeinsatz komplex und meist nicht transparent. Oft gibt es nur punktuelle Messungen des Energiebedarfs von Einzelverbrauchern. Zudem ist der spezifische Energieverbrauch in den einzelnen Fabriken sehr unterschiedlich und unterscheidet sich stark je nach Papiersorte und Anlagentechnik. Um ein Einsparungspotential zu finden, muss ein Prozess in der jeweiligen Fabrik umfassend analysiert werden. Durch gezielte Analyse können aber nach wie vor Potentiale zur Energieeinsparung gefunden werden. [28]

2.6 Zementindustrie

Wegen der zahlreich vorhandenen Literaturquellen bezieht sich die folgende Abhandlung (sofern nicht anders erwähnt) ausschließlich auf die Zementindustrie in Österreich.

2.6.1 Regionale Produktion und wichtige Erzeugnisse

Wie in Abbildung 2.30 dargestellt, sind in Österreich neun Werke zur Zementherstellung in Betrieb, wobei fünf Werke mit Drehrohrofenanlagen (inklusive Wärmetauscher mit Kalzinator), weitere drei mit Drehrohrofenanlagen (inklusive Wärmetauscher) ausgestattet sind und in einem weiteren Werk wird eine Lepolanlage betrieben. Außerdem sind in drei weiteren Mahlwerken Zementmühlen unterschiedlicher Bauart zur Zementproduktion in Betrieb. In Österreich werden etwa 60% des Zements an die Transportbetonindustrie geliefert. Weitere 20% werden in der Fertigteilindustrie, 10% als Sackware und die letzten 10% als Losezement an die Bauwirtschaft abgesetzt. [107], [72]

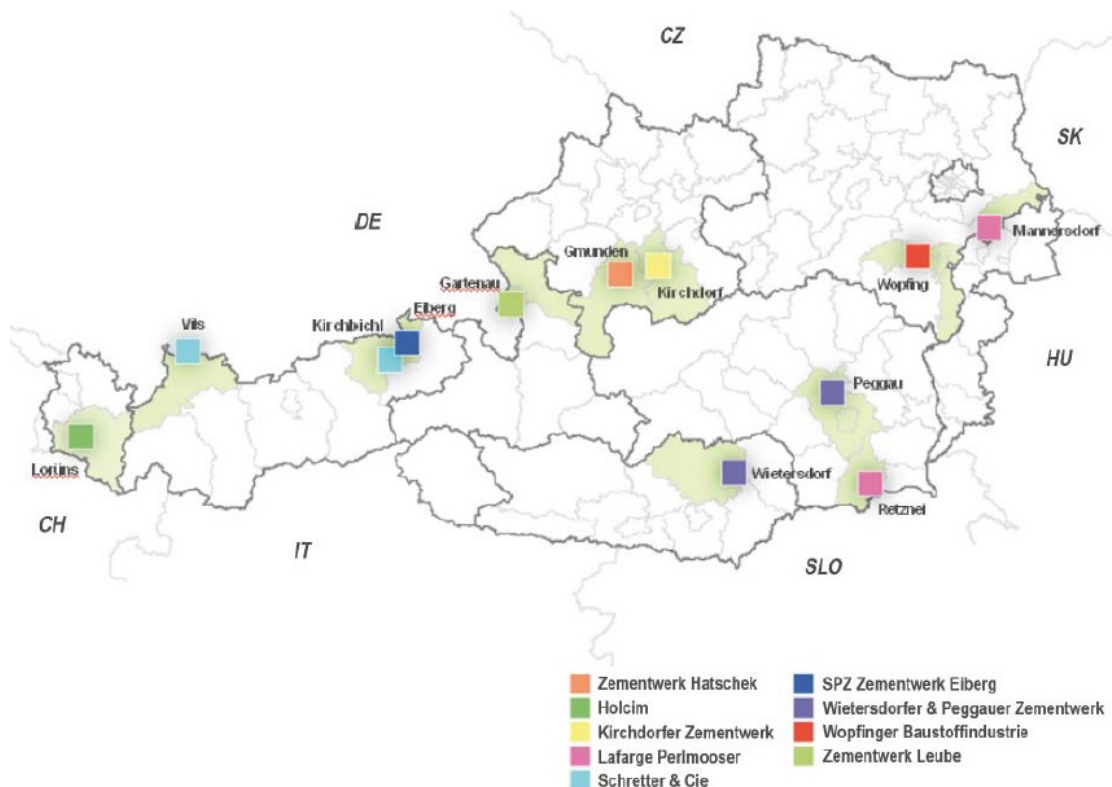


Abbildung 2.30: Standorte der Zementwerke in Österreich (Quelle: [8])

2.6.2 Verfahren

Gemäß Abbildung 2.31 wird die gewünschte Rohmischung mit Additiven wie Quarzsand und Eisenerz im Mischbett vermengt. In speziellen Mühlen (meist Kugel- oder Walzenschüsselmühlen) wird das Rohgemenge gemahlen und währenddessen mit dem Abgas der Drehrohrofenanlage getrocknet. In Drehrohrofenanlagen mit Wärmetauscher wird das Rohmehl mit dem Ofenabgas über mehrere übereinanderstehende Zyklone (Trockenverfahren) oder in Lepolanlagen mit Rostvorwärmern (Lepolverfahren) vorgewärmt. Durch die thermische Abspaltung des Kohlendioxids bei 800°C im Vorwärmer erfolgt die Kalzination bzw. die Entsäuerung des Kalksteins. Zementklinker entsteht, indem das Ofenmehl bei 1.450°C im Drehrohrofen gebrannt und die chemisch-mineralogischen Eigenschaften im Kühler fixiert werden. Der abgekühlte Klinker wird in Klinkersilos bevorratet und im letzten Schritt unter Zugabe von weiteren Stoffen wie Gips oder Zement gemahlen. [8]

In Österreich wird der Zementklinker fast ausschließlich in Drehrohrofenanlagen mit dem Trockenverfahren (vgl. 2.6.2.1) hergestellt. Nur ein Werk wärmt das Rohgemenge mit dem Halbtrockenverfahren (vgl. 2.6.2.2) in Kombination mit dem Lepolverfahren (vgl. 2.6.2.3) vor. Alternativ gibt es noch die Nass- bzw. Halbnassverfahren zur Vorwärmung, welche in Österreich nicht eingesetzt und deshalb hier nicht beschrieben werden.

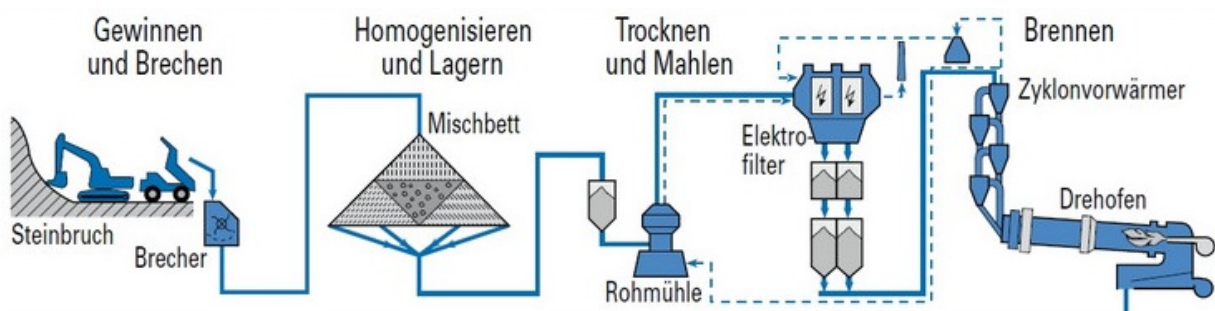


Abbildung 2.31: Schema eines Zementwerks (Quelle: [8])

2.6.2.1 Trockenverfahren

Beim Trockenverfahren (vgl. Abbildung 2.32) besteht der Vorwärmer üblicherweise aus 4-6 Zyklonen. Dabei wird das Rohmehl im Gegenstrom zu den Ofenabgasen geführt. In Öster-

reich sind fünf Anlagen mit einem zusätzlichen Vorkalzinator ausgestattet. Der Vorteil eines Kalzinators ist der flexiblere Einsatz von Sekundärbrennstoffen, welche recht unterschiedliche und vergleichsweise niedrige Heizwerte aufweisen. [14], [68]

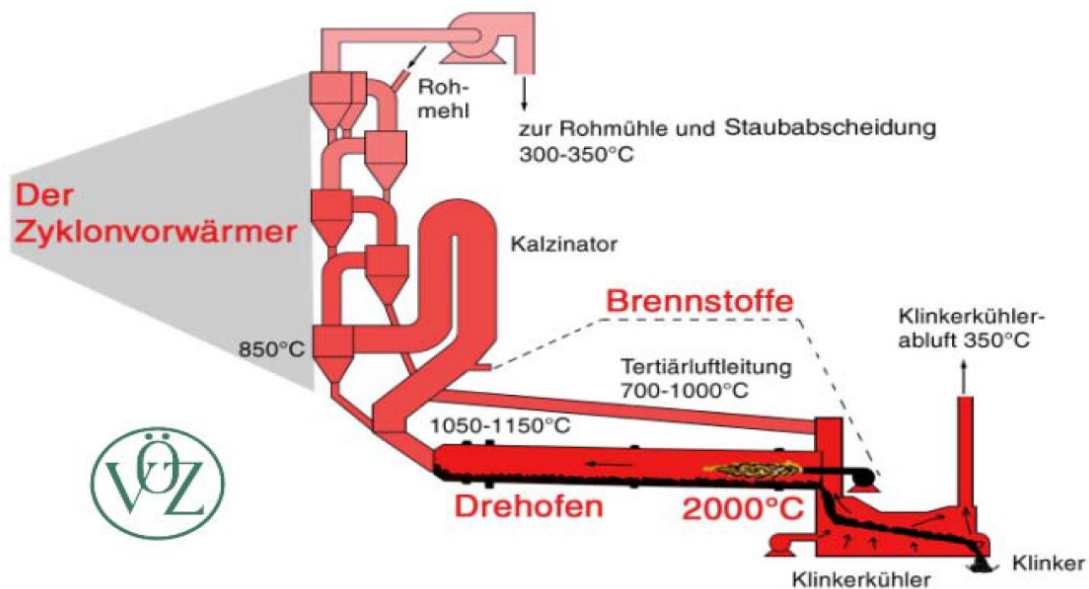


Abbildung 2.32: Trockenverfahren mit Kalzinator (Quelle: [14])

2.6.2.2 Halbtrockenverfahren

Aus Wasser und trockenem Rohmehl wird beim Halbtrockenverfahren ein Granulat erzeugt, welches etwa 10 - 12% Wasser enthält. Dieses Erzeugnis wird dann im Rostvorwärmerofen aufgegeben. [68]

2.6.2.3 Lepolofen

Der Rostvorwärmerofen, welcher auch als Lepolofen bezeichnet wird, ist in Abbildung 2.33 integriert im Prozessablauf dargestellt. In der ersten Stufe gelangen die im Halbtrockenverfahren (bzw. im Halbnassverfahren) hergestellten Pellets in die Trockenkammer, in der sie sich im Kreuzstrom zum Ofengas bewegen. Dabei werden sie auf 150°C erwärmt, getrocknet und in der zweiten Stufe, der Heizkammer, auf 700-850°C erhitzt. In der Trockenkammer des Lepolofens kühlt das Ofenabgas auf etwa 90-150°C ab. [8], [68]

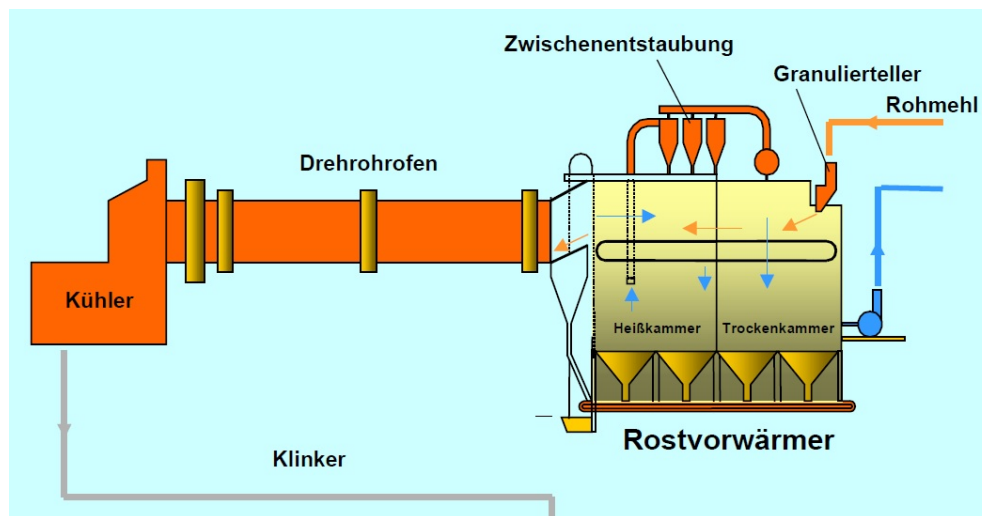


Abbildung 2.33: Lepolanlage (Quelle: [68])

Heutzutage werden die Anlagen ausschließlich als Drehrohrföfenanlagen mit Zyklonvorwärmer und Kalzinator errichtet. Diese Anlagen können bei gleicher Leistung kleiner dimensioniert und damit kostengünstiger errichtet und betrieben werden. [8]

2.6.3 Energiekennzahlen

Allein für die Abspaltung des Kohlendioxids, welches im Kalziumcarbonat des Gesteins gebunden ist, werden etwa 50% der spezifischen Brennstoffenergie verbraucht. Die Restenergie der Brennstoffe wird für die Trocknung und für die nachfolgende Aufheizung des Rohmaterials genutzt oder sie geht als Wärmeverlust verloren (vgl. 2.6.3.3). Der durchschnittliche Brennstoffenergiebedarf für die neun Klinker-erzeugenden Standorte in Österreich betrug im Jahr 2015 1,05 kWh/kg Klinker. In Deutschland werden bei einem gleichwertigen Brennstoffmix ähnliche Werte erreicht. [8], [72]

2.6.3.1 Brenn- und Rohstoffe

Rohstoffe: Als Ausgangsstoffe zur Erzeugung des Zementklinkers dienen Kalkstein, Ton und Mergel. Die Rohmischung der Ausgangsstoffe wird bei Bedarf über Dosiereinrichtungen mit Zuschlagstoffen wie Quarz und Eisenerz ergänzt. Nach Abbildung 2.34 werden beim Mahlen des gebrannten Klinkers verschiedene Zumahlstoffe, wie Gips oder Hüttensand,

beigefügt, um das Endprodukt Zement zu erreichen. [8]

Brennstoffe: Wie in Abbildung 2.34 dargestellt, werden feste und flüssige fossile Brennstoffe, wie Kohle, Heizöl und Erdgas, für die Befeuerung eingesetzt. Zusätzlich werden Sekundär- bzw. Alternativbrennstoffe verwendet, wie z.B. Altreifen.

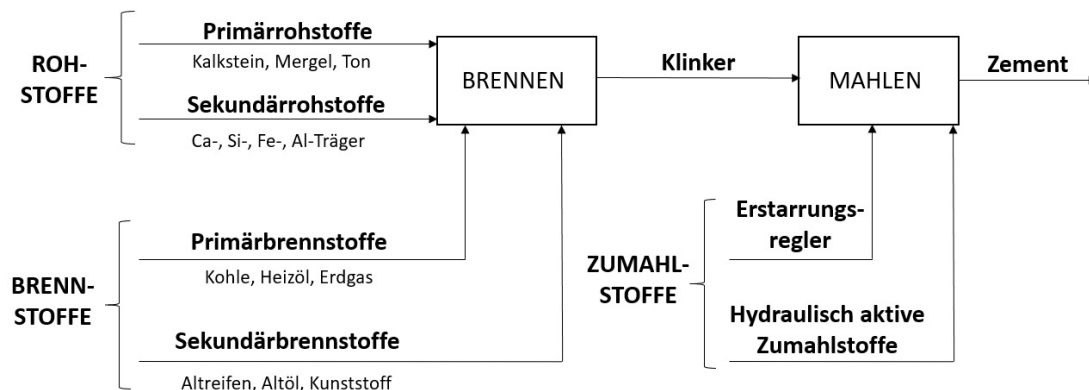


Abbildung 2.34: Einsatz von Roh-, Brenn-, und Zumaehlstoffen bei der Zementherstellung
(eigene Darstellung, Datenquelle: [14])

Laut MAUSCHITZ in [72] war der Anteil konventioneller Energieträger im Jahr 2015 bei etwa 24% und der Anteil der Ersatzbrennstoffe bei etwa 76%. Bei den konventionellen Brennstoffen wurden 30% Steinkohle und 35% Braunkohle verbrannt. Weitere konventionelle Energieträger waren Heizöl S 3,3%, Petrolkoks 29%, Erdgas 2,3%, Heizöl L 0,3%, und Sonstige 10%. Bei den Ersatzbrennstoffen wurden vorwiegend Kunststoffabfälle 62%, Altöl 3,8%, und Altreifen 16,9% verwendet. Andere Ersatzbrennstoffe waren Lösungsmittel 5,3%, Papierfaserstoff 2,2% und Sonstige 9,8%.

2.6.3.2 Strom und Wärme

Im Jahr 2015 lag der Gesamtenergiebedarf der österreichischen Zementwerke bei 3.953 GWh [8]. Dabei betrug der Anteil thermischer Energie 3.427 GWh und der Anteil elektrischer Energie 526 GWh [8]. Somit machte im Jahr 2015 der thermische Energieeinsatz 87% des Gesamtenergieeinsatzes aus.

2.6.3.3 Abwärme, Energiefluss und Verlustenergie

Wärme: Wie in Abbildung 2.35 dargestellt, kann der thermische Energieeinsatz in vier Bereiche gegliedert werden. Hierfür werden Daten aus dem Jahr 2007 herangezogen, da für dieses Jahr zuverlässige Kennzahlen vorliegen. Im Jahr 2007 wurde für die Klinkerproduktion in Österreich ein thermischer Energieeinsatz von 4.012 GWh ermittelt. Davon werden 48%, also 1.936 GWh, für die chemisch-mineralogische Reaktion aufgewendet. Nach dem Drehrohrföfen bleibt ein Abwärmestrom, das sogenannte Rohgas, von 710 GWh über, welcher zu einem großen Teil für Rohmaterialtrocknung und Rohmehlvorwärmung genutzt wird. Der Energieinhalt der Kühlerabluft aus dem Klinkerkühlprozess beträgt 225 GWh und wird zu 44% im Herstellungsprozess wiederverwendet. Die übrigen 1.142 GWh Energie stellen die verfahrenstechnisch nicht nutzbare Abwärme dar, welche sich unter anderem durch Wandwärmeverluste, Wasserverdampfung oder Niedrigtemperaturabwärme ergeben. Etwa 70% des Gesamtenergieeinsatzes in der Zementherstellung werden für die chemische Energie zur Bildung der Klinkermaterialien, sowie für die Trocknung und Wärmeauskopplung eingesetzt. Damit liegt hier im Vergleich zu anderen Industrien ein hoher Wirkungsgrad vor. [8], [45]

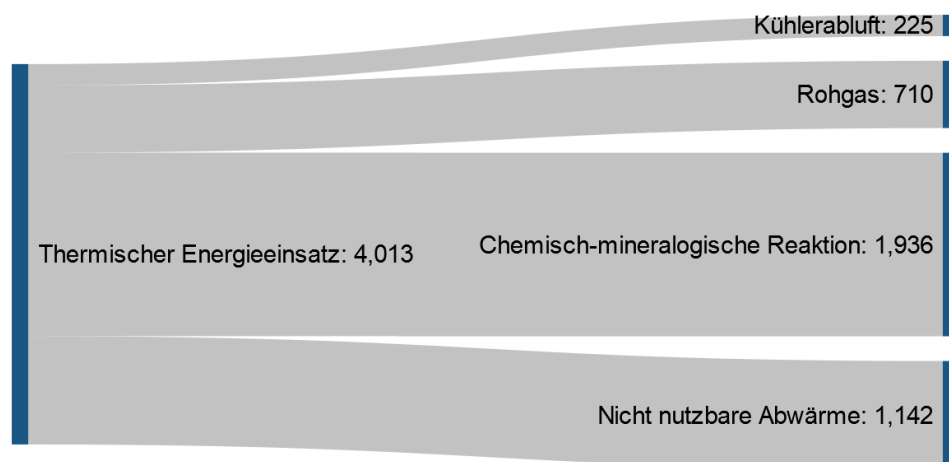


Abbildung 2.35: Energiebilanz der österreichischen Zementwerke in GWh (eigene Darstellung, Datenquelle: [8])

Strom: Mit 526 GWh machte der elektrische Energiebedarf im Jahr 2015 nur etwa 13% des Gesamtenergiebedarfs der Zementindustrie aus. Der Großteil, mehr als 95% der elektrischen Energie, wurden für elektrische Antriebe und weitere 2-5% für das Druckluftsystem eingesetzt. Kälteerzeugung, Raumheizung/Warmwasseraufbereitung und Beleuchtung verbrauchten jeweils etwa 1% des elektrischen Energieeinsatzes. [8]

Gliedert man den elektrischen Energieeinsatz in Prozessschritte, so entfallen etwa 35% auf die Rohmaterialaufbereitung, ca. 22% auf das Brennen und Kühlen des Klinkers und etwa 38% auf die Verpackung und Verladung.

2.6.4 Wärmenutzung

Die Abwärme in Zementwerken ergibt sich vorwiegend aus dem Rohgas und der Kühlerabluft. Da die Zementrohstoffe in feuchter Form abgebaut werden, kann ein Teil der Abwärme in den Mahltrocknungsanlagen genutzt werden. Außerdem wird die Abwärme auch für Fernwärmeeinspeisung und Verstromung genutzt. Im Jahr 2007 wurden aus der nutzbaren Abwärme von 935 GWh bereits 515 GWh (55%) für interne Anwendungen (vgl. Abbildung 2.36), wie Materialtrocknung und Rohmehlerwärmung, eingesetzt. Davon wurden 23 GWh (2%) für die Warmwasserbereitung, Raumheizung, Brennstofftrocknung, Brennstoffwärmung und Stromerzeugung eingesetzt (vgl. Abbildung 2.37). Für die externe Nutzung des Nutzpentials von 420 GWh (45%) ist eine Einspeisung in das Fernwärmenetz möglich, was an einem Standort in Österreich realisiert wird. In Kirchdorf/Micheldorf wird die Kühlerabluft des Klinkerkühlers ausgekoppelt und per Wärmetauscher in das Fernwärmenetz eingespeist. Etwa 10 GWh Abwärme wurden im Jahr 2007 vorwiegend an Einkaufszentren und ein Krankenhaus ausgespeist. [8]

Beim Drehrohrofen mit dem üblich eingesetzten Trockenverfahren ohne Vorwärmer liegt die Abgastemperatur bei etwa 450°C. Die Abwärmtemperatur sinkt bei Anwendung von Vorwärmern – je nach Anzahl der Stufen – auf 200-340°C. Mit vier Stufen sinkt die Temperatur des Abgasstroms auf 340°C, mit 5-6 Stufen auf etwa 200°C. [51]

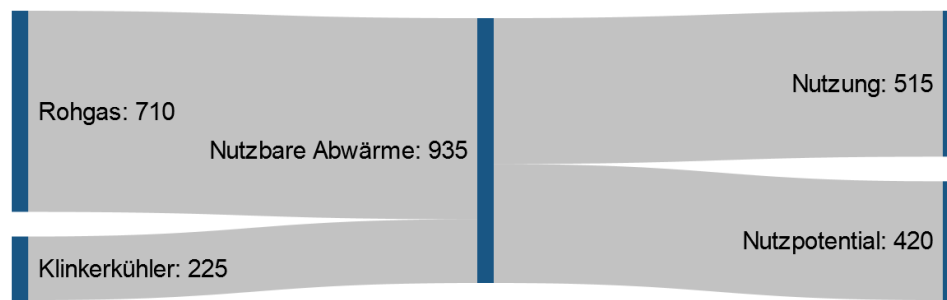


Abbildung 2.36: Nutzungspotentiale der verwendbaren Abwärme in GWh (eigene Darstellung, Datenquelle: [8])

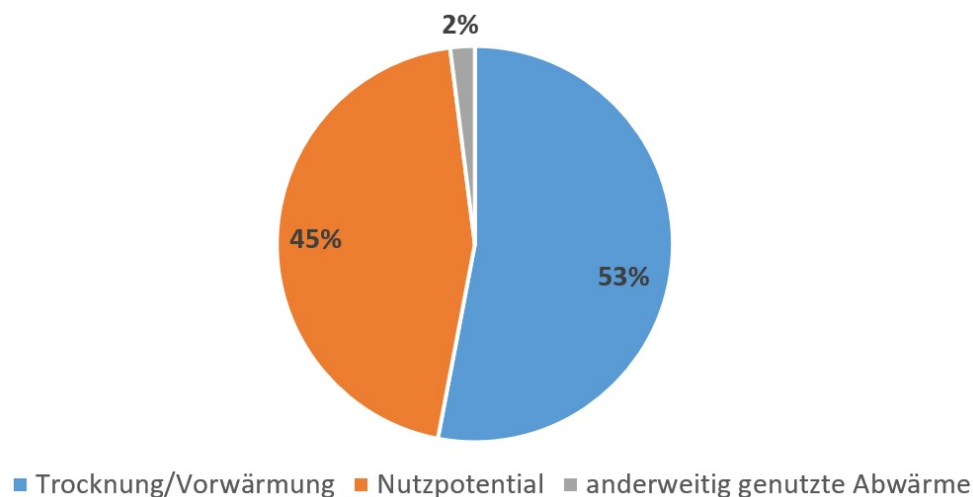


Abbildung 2.37: Nutzbare Abwärme (>100°C) in der Zementindustrie (eigene Darstellung, Datenquelle: [8])

2.6.5 Potentiale

Die Abwärmenutzung in der Zementindustrie gilt in Österreich als Stand der Technik. Vorwiegend wird die Abwärme werksintern zum Trocknen der Roh- und Brennstoffe eingesetzt. Außerdem wird Abwärme auch in externe Wärmenetze eingespeist. Auch das Trockenverfahren für die Herstellung des Zementklinkers gilt als Stand der Technik. Es ist wesentlich effizienter im Vergleich mit dem Nass- oder Halbnassverfahren, welche in Österreich nicht eingesetzt werden. Derzeit sind keine Breakthrough-Technologien in Sicht, die gegenüber dem Trockenverfahren zu einer wesentlichen Effizienzsteigerung führen könnten. In der österreichischen Zementindustrie produzieren alle Werke nach dem Trockenverfahren und

sind somit auf dem modernsten Stand. Eine Möglichkeit den thermischen Energiebedarf zu senken, ist den Klinkeranteil zu minimieren. Der geringere Klinkeranteil wird durch zusätzliche Zumahlstoffe wie Hüttensand oder Kalkstein ausgeglichen, wobei sich allerdings die Produkteigenschaften ändern. Jedoch haben die Produktanforderungen meist Vorrang vor der Energieeffizienz. Um Energie- und Rohstoffkosten zu senken, kann der Anteil der Ersatzbrennstoffe erhöht werden. Zu erwähnen ist, dass Ersatzbrennstoffe in der Zementindustrie nicht nur thermisch, sondern auch stofflich verwertet werden, denn sie werden vollständig in das Produkt eingebunden. [45]

2.6.6 Besonderheiten der Zementindustrie

Im Vergleich zu anderen Industrien ist der Anteil der Energiekosten insgesamt relativ hoch. Der Energiekostenanteil macht etwa 30-40% der gesamten Produktionskosten aus; folglich ist die Energieeinsparung eine bedeutende Aufgabe. In der Zementindustrie ist insbesondere der thermische Energieeinsatz aufgrund des hohen Kostenanteils ein wichtiges Kriterium. [69]

Kapitel 3

Thermische Energiespeicher

Thermische Energiespeicher (TES) oder Wärmespeicher können nach dem physikalischen Speicherprinzip in sensible, latente und thermochemische Speicher eingeteilt werden (vgl. Abbildung 3.1). Im Folgendem werden sensible und latente Wärmespeicher näher beschrieben. Sensible Speicher erfordern beim Be- und Entladen eine Temperaturdifferenz, wohingegen bei latenten Wärmespeichern die Wärmeenergie auf konstantem Temperaturniveau genutzt wird, welche bei einer Phasenumwandlung aufgenommen bzw. abgegeben wird. Der charakteristische Temperaturverlauf der Speichertechnologien wird in Abbildung 3.2 dargestellt. Grundsätzlich ist anzumerken, dass der Entwicklungsstand bei sensiblen Speichern weiter fortgeschritten ist als bei Latentwärmespeichern. [97], [46]

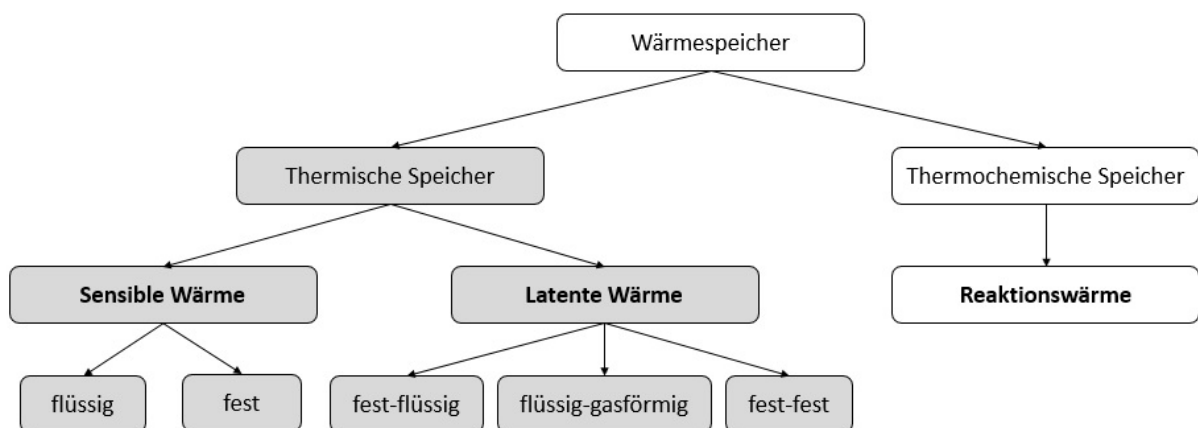


Abbildung 3.1: Einteilung der Wärmespeicher (eigene Darstellung)

Um die Eignung eines Wärmespeichers zu beurteilen, sind verschiedene Kennzahlen wichtig, wie z.B. die Speicherdichte. Diese reicht bei sensiblen Speichern von etwa 20-100 kWh/m³, bei Latentwärmespeichern von etwa 50-150 kWh/m³. Ein weiterer wichtiger Kennwert ist der Nutzungsgrad. Der Nutzungsgrad ist der Quotient aus der eingespeicherten, nutzbar gemachten und der zugeführten Energie. Bei vielen thermischen Energiespeichern sinkt der Nutzungsgrad mit der Speicherdauer, da Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Weitere wichtige Kennzahlen sind die Be- und Entladezeit, die Betriebstemperatur und die Zyklenzahl. Im Folgenden werden die Anwendungsmöglichkeiten der Speicher erläutert, sowie die Funktionsweisen, Materialien und Eigenschaften der sensiblen und latenten Wärmespeicher beschrieben. Auf die Eignung thermischer Wärmeenergiespeicher im industriellen Umfeld (Performance) wird ebenfalls eingegangen. [46], [97]

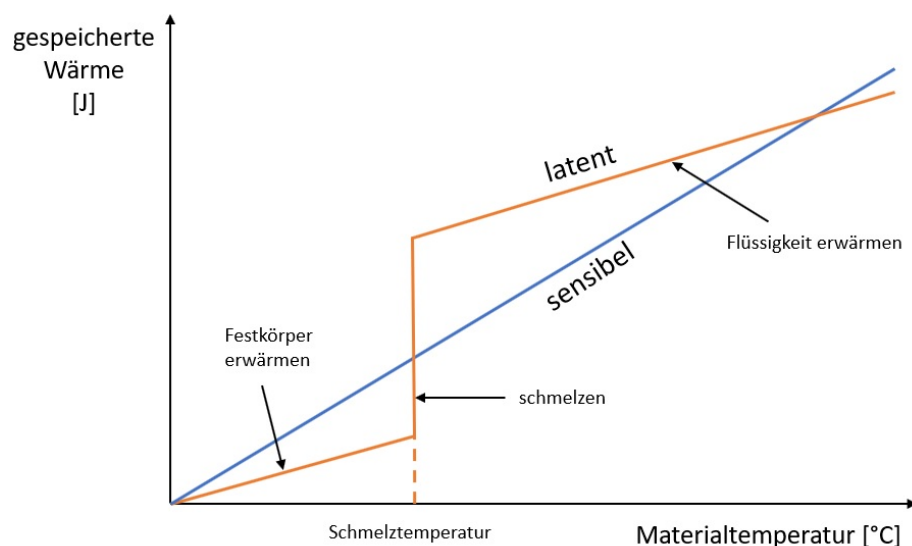


Abbildung 3.2: Schematischer Temperaturverlauf von sensiblen und latenten Speichern
(eigene Darstellung)

3.1 Speicheranwendung

Eine Speicherintegration im industriellen Prozess erlaubt es, die zeitliche Lücke zwischen Energieangebot und Energiebedarf zu überbrücken. Man kann die Lasten flexibel betreiben, wodurch die Stabilisierung des Stromnetzes unterstützt werden kann. Das ermöglicht

es in weiterer Folge den Anteil erneuerbarer Energien (EE) zu erhöhen, da im Zeitintervall hoher EE-Produktion die Speicher günstig geladen werden können und sodann die Energie zu Produktionszeiten zur Verfügung steht. Bei breiter Anwendung können Industriebetriebe somit Speicheraufgaben übernehmen, welche ansonsten die Stromnetzbetreiber erbringen müssen, um den Anteil der EE gesetzteskonform zu erhöhen. Außerdem ermöglicht die Speicherintegration eine Brennstoffeinsparung durch die Verwendung von nicht genutzter (Ab-)Wärme. Gerade bei Abwärme aus Batchprozessen ist die zeitliche Entkopplung von Bedarf und Verbrauch sinnvoll. Ungenutzte Abwärme aus Batchprozessen kann außerdem in TES gespeichert und kontinuierlich im ORC-Process verstromt werden, um den Fremdstromverbrauch zu minimieren oder Strom in das Netz einzuspeisen. Weiters können mit Speichern Lastspitzen gedeckt werden, was eine kleinere Dimensionierung von Anlagenkomponenten ermöglicht und somit die Installationskosten senkt und die Energieeffizienz steigern kann. [100]

3.2 Sensible Speicher

Für alle sensiblen Wärmespeicher gilt das selbe physikalische Grundprinzip zum Speichern von Energie. Beim Laden wird dem Speicher Wärme zugeführt, wobei ein höheres Temperaturniveau erreicht wird. Das Produkt (nach Formel 3.1) aus Masse, spezifischer Wärmekapazität und dem realisierten Temperaturunterschied berechnet die eingespeicherte Wärme des sensiblen Speichers.

$$\begin{aligned} Q &= \int_{T_i}^{T_f} m c_p dT \\ &= m c_{ap} (T_f - T_i) \end{aligned} \tag{3.1}$$

mit:

- Q gespeicherte Wärmemenge (J)
- m Masse des Wärmespeichermediums (kg)

- T_i Initialtemperatur (K)
 T_f Endtemperatur (K)
 c_p spezifische Wärmekapazität (J/kgK)
 c_{ap} durchschnittliche Wärmekapazität zwischen T_i und T_f (J/kgK)

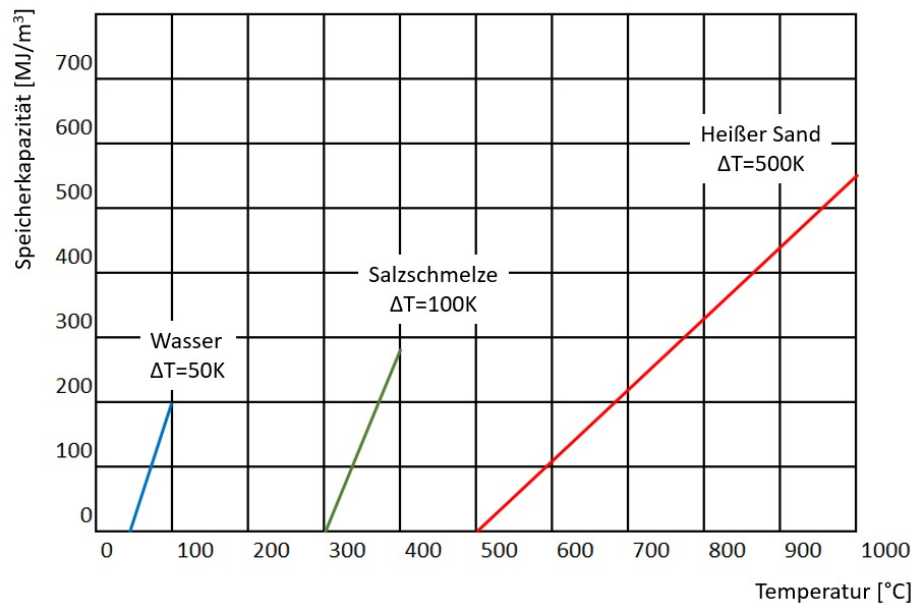


Abbildung 3.3: Volumetrische Speicherkapazität sensibler Wärmespeicher (eigene Darstellung, Datenquelle: [46])

Beim Entladen wiederum wird dem System Energie entzogen, wodurch die Temperatur abnimmt. Das Be- und Entladen kann direkt über das Speichermedium oder indirekt über einen Wärmeüberträger erfolgen. Bei direkten Systemen dient das Speichermedium auch als Arbeitsmedium, wie es bei Heizungssystemen meist der Fall ist. Bei indirekten Systemen hingegen wird zwischen Speicher- und Arbeitsmedium ein Wärmeüberträger installiert, womit die Temperatur für den Verbraucher besser gesteuert werden kann. Am häufigsten werden Warmwasserspeicher eingesetzt, welche drucklos nur einen Betrieb bis 100°C ermöglichen. Für höhere Temperaturen ist aufgrund des hohen Dampfdrucks von Wasser ein Drucksystem erforderlich. Bei hohen Temperaturen werden Flüssigkeiten wie Flüssigsalz oder Feststoffe wie Beton und Sand verwendet. Die Abbildung 3.3 zeigt die Arbeitsbereiche von Wasser, Salzschnmelze und heißem Sand. Im Vergleich zu Wasser erzielt heißer Sand als Feststoffspeicher neben hohen Speicherkapazitäten auch hohe Temperaturhübe von bis zu

$$\Delta T = 500 K. [46]$$

Nachfolgend werden die drei Technologien Heißwasserspeicher, Flüssigsalzspeicher und Feststoffspeicher detailliert beschrieben. Am Ende dieses Abschnitts befindet sich die Tabelle 3.2, eine Übersicht ausgewählter sensibler Speicher mit deren spezifischen Wärmekapazitäten, Temperaturbereichen und Speicherdichten. [84]

3.2.1 Heißwasserspeicher

Bei Heiß- bzw. Warmwasserspeicher befindet sich Wasser in einem isolierten Behälter. Vorwiegend werden diese Speicher als Schichtenspeicher ausgeführt, da die geringe Temperaturleitfähigkeit von $a = 0,142 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ genutzt wird. Das erlaubt eine Ausführung als Ein-Tank-Konzept in einfacher Bauweise, wobei das Wasser mit hoher Temperatur vom oberen Bereich des Kessels entnommen werden kann, während das Wasser mit niedriger Temperatur vom Verbraucher zurückgeführt wird. Eine längere Einspeicherdauer im Heißwasserspeicher ist ein Nachteil dieser Technologie, wie aus der Grafik 3.4 entnommen werden kann. Die Abbildung zeigt, dass die Gradientenzone im Verlauf der Zeit an Höhe zunimmt. Aufgrund transients Wärmeübertragung durch Wärmeleitung löst sich die Schichtung mit zunehmender Zeit auf, sogar in gut isolierten Kesseln. [102]

Heißwasserspeicher sind einfach, kostengünstig und kommerziell verfügbar. Ein Nachteil von Wasser als Wärmespeicher ist der hohe Dampfdruck, welcher bei 155°C bereits bei 5 bar liegt. Der Dampfdruck kann jedoch durch Zugabe verschiedener Chemikalien gesenkt werden. So kann bei einer 1:1 Mischung mit Natriumhydroxid eine Temperatur von 140°C erreicht werden, ohne dass ein Druckkessel verwendet werden muss. [76], [102]

3.2.2 Flüssigsalze

Für Speichertemperaturen über 100°C sind geschmolzene Salze geeignete Speichermedien für sensible Wärmespeicher. Die offensichtlichen Vorteile der Flüssigsalze sind die hohe thermische Stabilität und der geringe Dampfdruck, welcher Konstruktionen ohne Druckkessel erlaubt. Als Flüssigsalz wird oft eine Mischung aus 60 Gew.-% Natriumnitrat (NaNO_3) und

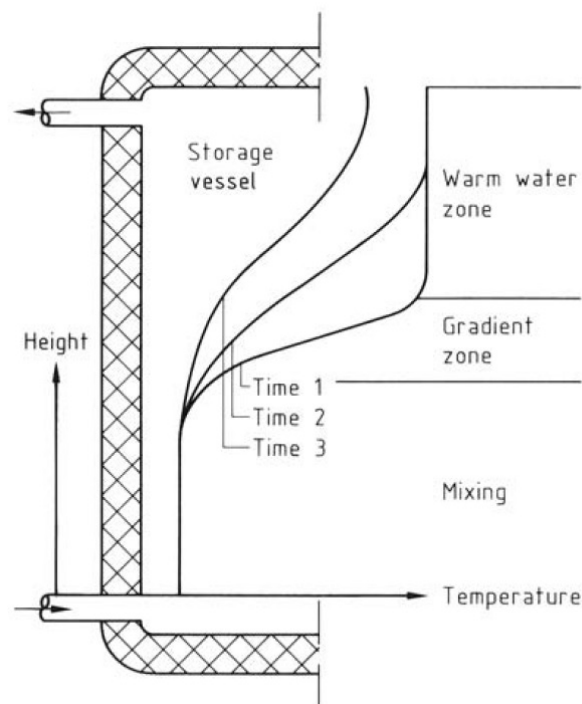


Abbildung 3.4: Thermische Schichtung im Heißwasserkessel (Quelle: [102])

40 Gew.-% Kaliumnitrat (KNO_3) eingesetzt. Der Nachteil bei Flüssigsalzen ist das ungewollte Erstarren während des Betriebs bei Unterschreiten der Erstarrungstemperatur, was zum Erliegen des Prozesses führt. Diese Problematik erfordert oft zusätzliche Heizsysteme. [76], [102]

Zwei-Tank-Konzepte für Flüssigsalzspeicher (vgl. Abbildung 3.5) sind kommerziell verfügbar; Ein-Tank-Konzepte befinden sich in Entwicklung. Die Basiskomponenten sind beim Zwei-Tank-Konzept ein permanenter Heißtank (hier 386°C) und ein permanenter Kalttank (hier 292°C). Die Wärmeübertragung zwischen flüssigem Wärmeüberträger (*HTF* - *heat transfer fluid*) und geschmolzenem Salz findet typischerweise durch drei in Serie geschaltete Wärmeaustauscher statt. [109]

3.2.3 Feststoffspeicher

Sensible Wärmespeicher aus Feststoffen können erstens als Schüttungen, wie Sand oder Kies, und zweitens als kompakte Feststoffe, wie Beton oder Metalle ausgeführt sein. Hierbei erfolgt die Wärmeübertragung per Wärmeleitung über eine große Oberfläche im Speicher.

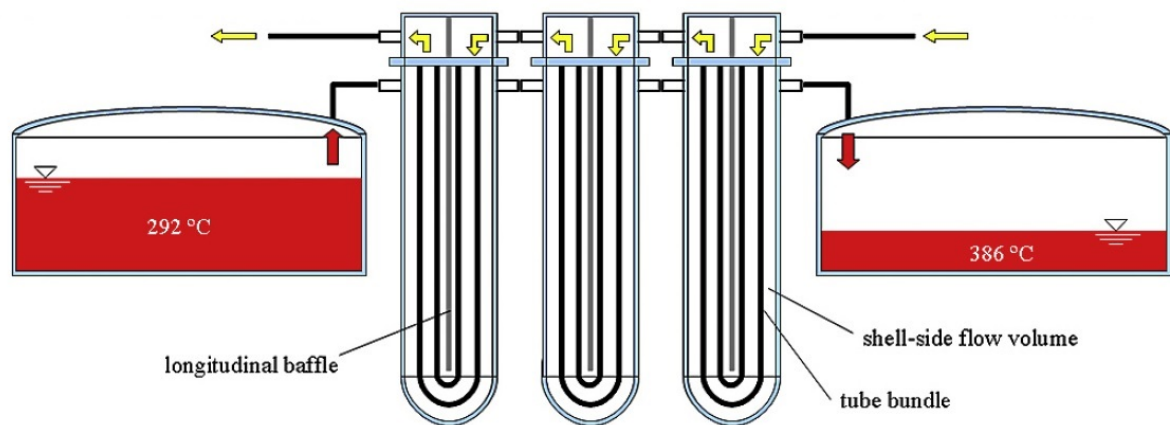


Abbildung 3.5: Zwei-Tank-Konzept Flüssigsalz (Quelle: [109])

Die Abbildung 3.6 zeigt das Modul eines Betonspeicherlayouts mit triangulärer Anordnung des Rohrbündels in geeigneter Dimensionierung. Das Rohrbündel wird mit einem HTF zum Be- und Entladen durchströmt. Abgesehen von diesem strukturierten Kanalsystem werden Festkörperspeicher in Modulbauweise gefertigt, um die Anwendbarkeit zu verbessern. [109], [76]

Feststoffspeicher können über einen weiten Temperaturbereich erhitzt werden und sind für Hochtemperaturanwendungen bis über 1.300°C geeignet. Vorteilhaft ist zum einen, dass keine Mindesttemperatur für den Betrieb erreicht werden muss, und zum anderen, dass eine beliebig tiefe Abkühlung und eine hohe Zyklenzahl möglich ist. [76]

Bei der Auswahl eines sensiblen Wärmespeichers für einen industriellen Prozess ist auch die Entladetemperatur im Verlauf der Zeit zu beachten. Die Abbildung 3.7 zeigt die zur Verfügung stehende HTF-Temperatur (rot) des in Abbildung 3.6 dargestellten Betonspeichers. Für diese Auswertung wurde N4-Beton, welcher frei von korrosiven Bestandteilen ist, als Speichermedium eingesetzt. Das Rohrbündel wurde aus 18Cr-7Ni rostfreiem Stahl gefertigt und wird von dem HTF Syltherm 800 mit einem Druck von 12 bar durchströmt. Der Abstand periodischer Temperaturspitzen kann verkürzt werden, indem mehrere sequenziell geschaltete Module entladen werden. Ein konventioneller Zwei-Tank TES nach Abbildung 3.5 kann hingegen mit einer konstanten Temperatur (schwarz) entladen werden. [109]

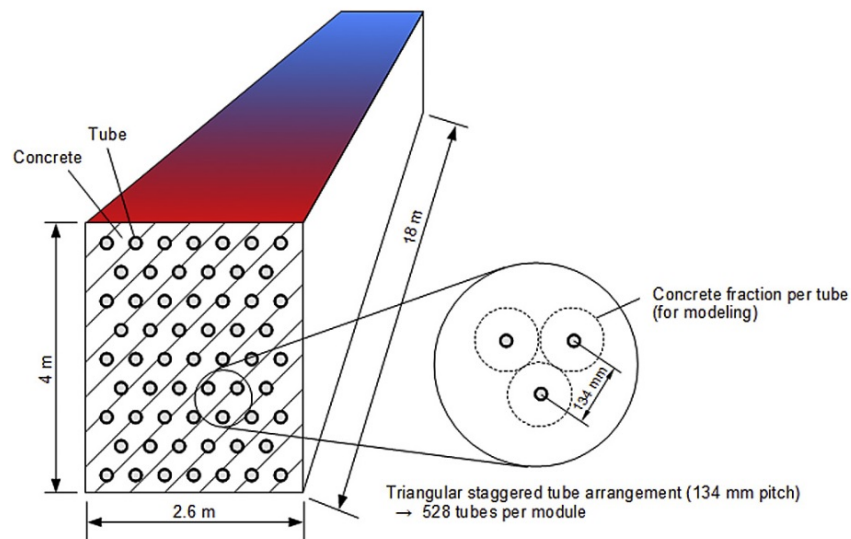


Abbildung 3.6: Betonspeicher-Layout mit Dimensionierung (Quelle: [109])

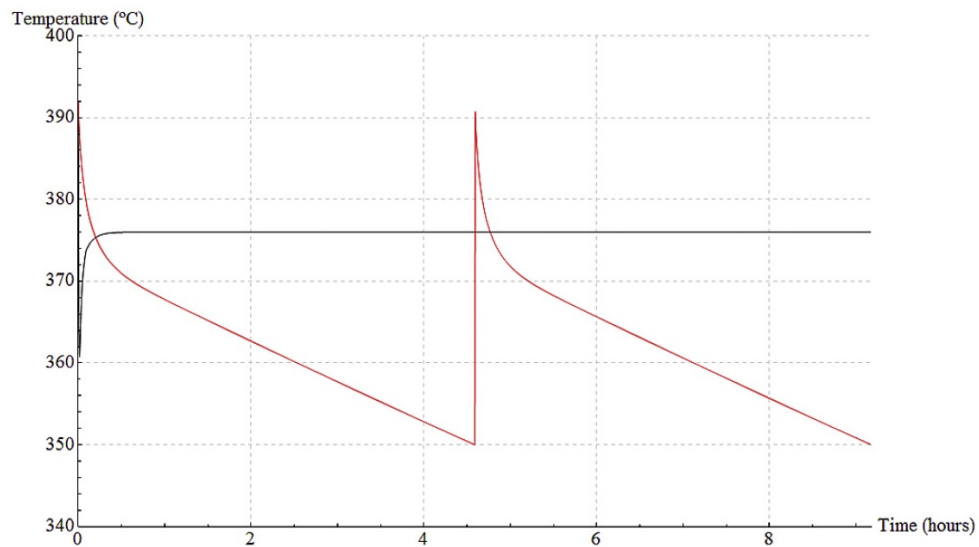


Abbildung 3.7: HTF Entladetemperatur für ein Zwei-Tank Flüssigsalz-TES (schwarz) und ein Beton-TES (rot) (Quelle: [109])

Tabelle 3.2: Sensible Wärmespeicher (Quelle: [44])

Speicher	Speichermedium	spez. Wärmekapazität [kWh/m ³ K]	Temperaturbereich [°C]	Speicherdichte [kWh/m ³]
atm. Wärmespeicher	H ₂ O	1,11	40-95	50
Druckwärmespeicher	H ₂ O	1,11	40-150	85
Flüssigsalzspeicher	NaNO ₃ /KNO ₃	0,78	40-150	80-300
Sand-TES	Sand	0,53	10-700	50-160
Betonspeicher	Spezialbeton	0,78	10-400	150
Festbetspeicher	Keramik, Ziegel, Kies	0,61	10-1.000	300

3.3 Latentwärmespeicher

Bei Latentwärmespeichern findet im Speichermedium (*PCM - Phase Change Material*) ein Phasenwechsel statt, wobei der Phasenwechsel immer dann mit der Absorption von Wärme im PCM verbunden ist, wenn der Feststoff schmilzt oder die Flüssigkeit verdampft. Mittels Wärmeträgermedium wird Wärme zugeführt und durch die latente Wärmespeicherung erhöht sich die Temperatur zunächst nicht. Durch die Wärmezufuhr steigt die Unordnung im Atomgitter, die Entropie nimmt zu und die Temperatur erhöht sich erst, wenn das PCM vollständig geschmolzen bzw. verdampft ist. Durch die Wärmeabgabe bei der Kühlung vermindert sich die Entropie und es kommt zur Kristallisation bzw. Kondensation und das Medium liegt wieder als Feststoff bzw. Flüssigkeit vor. [46]

Die eingespeicherte Wärme Q wird bei Fest-Flüssig-Speicherung durch die Schmelzenthalpie im Phasenwechsel und den Temperaturerhöhungen außerhalb des Phasenwechsels berechnet:

$$\begin{aligned}
 Q &= \int_{T_i}^{T_m} m c_p dT + m a_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m c_p dT \\
 &= m [c_{sp} (T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + c_{lp} (T_f - T_m)]
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

mit:

Q	gespeicherte Wärmemenge (J)
m	Masse des Wärmespeichermediums (kg)
T_i	Initialtemperatur (K)
T_m	Schmelztemperatur (K)
T_f	Endtemperatur (K)
c_p	spezifische Wärmekapazität (J/kgK)
c_{sp}	durchschnittliche Wärmekapazität zwischen T_i und T_m (J/kgK)
c_{lp}	durchschnittliche Wärmekapazität zwischen T_m und T_f (J/kgK)
a_m	Anteil geschmolzen
Δh_m	Schmelzwärme (J/kg)

Eine Übersicht spezifischer Schmelzenenergien der PCM in Abhängigkeit von den Schmelztemperaturen zeigt die Abbildung 3.8, wobei man erkennt, dass die Schmelzenthalpien mit steigenden Schmelztemperaturen zunehmen. In der Literatur werden PCM häufig in Niedrigtemperaturanwendungen ($<200^{\circ}\text{C}$) und Hochtemperaturanwendungen ($>200^{\circ}\text{C}$) eingeteilt. Als Material für solarthermische Energiespeicherung haben sich Nitrate und Salzhydrate bereits bewährt. In der Praxis wird der Phasenwechsel von fest zu flüssig bevorzugt, da Übergänge von flüssig zu gasförmig aufgrund der großen Volumenänderung ungeeignet sind. [97], [46], [110]

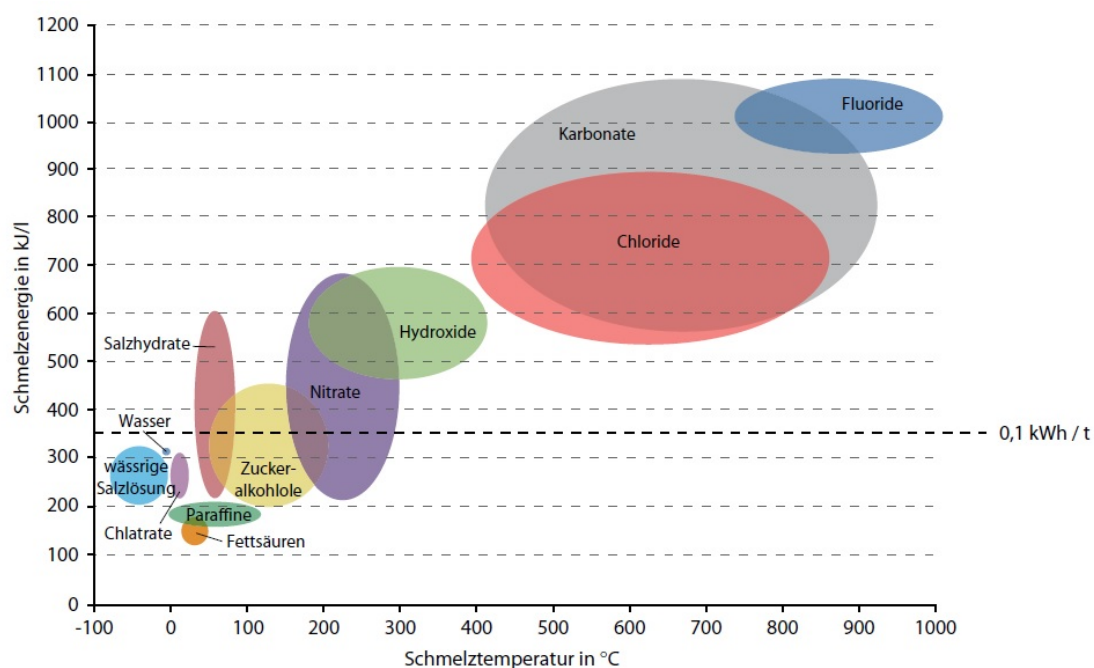


Abbildung 3.8: Schmelzenergie verschiedener PCM (Quelle: [97])

Vorteilhaft gegenüber den sensiblen Speichern ist die höhere Speicherdichte der PCM und das gleichbleibende Temperaturniveau für Einspeicherung und Entladung [97]. Der große Nachteil von PCM ist die vergleichsweise niedrige Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,2 - 0,8 \text{ W/(mK)}$. Im nachfolgenden Abschnitt werden die drei Funktionsweisen flüssig-gasförmig, fest-fest und fest-flüssig für Latentwärmespeicher näher beschrieben. In Tabelle 3.7 werden abschließend die beschriebenen Speicher zusammengefasst, sowie deren spezifische Wärmekapazitäten, Temperaturbereiche, Speicherdichten und Schmelzenthalpien angegeben.

3.3.1 Phasenübergang flüssig-gasförmig

Als Vertreter dieser Gruppe der Latentwärmespeicher gelten Ruths-Dampfspeicher, welche auch als Gefällespeicher bezeichnet werden. Hierbei werden druckdichte Stahlkessel mit Wasserdampf geladen, der bei Einleitung auskondensiert. Bei Dampfantnahme verdampft eine Teilwassermenge und dem Wasser wird Verdampfungswärme entzogen. Die Temperatur des Wassers liegt bei der Siedetemperatur, welche jedoch aufgrund von Drücken bis zu 100 bar deutlich höher als 100°C sein kann. Die schnelle Verfügbarkeit der Energie ist ein Vorteil dieser Speicher. Jedoch eignen sie sich nur als Kurzzeitspeicher, da bei Dampfantnahme Temperatur und Druck abfallen und somit keine konstanten Temperaturen verfügbar sind. Im Vergleich zu anderen Latentwärmespeicher haben Dampfspeicher geringe Speicherdichten (vgl. Abbildung 3.7). Ruths-Dampfspeicher sind gut erprobt und kommerziell verfügbar. [84, S. 57], [44]

Die Be- und Entladung des Gefällespeichers stellt einen instationären, offenen thermodynamischen Prozess dar. Die potentielle und kinetische Energie beim Betrieb können vernachlässigt werden und somit kann die innere Energie des Speichers nach Formel 3.3 berechnet werden. [40]

$$U_2 - U_1 = Q_{12} + \int_{t_1}^{t_2} \dot{m}_{ein} h_{ein} dt - \int_{t_1}^{t_2} \dot{m}_{aus} h_{aus} dt \quad (3.3)$$

mit:

U_2	innere Energie im Behälter zu Prozessende (J)
U_1	innere Energie im Behälter zu Prozessbeginn (J)
Q_{12}	Wärme die über den Behälter zugeführt wird - bei idealer Dämmung gilt: $Q_{12} = 0$ (J)
$\dot{m}_{ein}$	einströmender Dampfstrom (kg/s)
$\dot{m}_{aus}$	verfügbarer Nutzdampfstrom bei Entladung (kg/s)
h_{ein}	spezifische Enthalpie des Dampfs bei Beladung (J/kg)
h_{aus}	spezifische Enthalpie des Dampfs bei Entladung (J/kg)

Um die Behälterdimension zu bestimmen, wird zunächst der Füllgrad β , welcher üblicherweise zwischen 0,90 und 0,95 liegt, festgelegt:

$$\beta = \frac{m'_1 v'_1}{V_B} \quad (3.4)$$

mit:

- m'_1 Masse des Wassers im Zustand 1 (kg)
- v'_1 spezifisches Volumen des Wassers im Zustand 1 (m^3/kg)
- V_B Behältervolumen (m^3)

Aus Formel 3.3 und 3.4 ergibt sich nach GLÜCK, [40] ein Zusammenhang für die Dampfmasse, dem Behältervolumen und dem Füllgrad zwischen Zustand 1 und 2:

$$\frac{m_{Dampf}}{V_B} = \frac{\beta}{v'_1} \frac{h'_1 - h'_2}{0,5 (h''_1 + h''_2) - h'_2} \quad (3.5)$$

mit:

- m_{Dampf} Dampfmasse (kg)
- h'_1, h'_2 spezifische Enthalpie von Wasser in Zustand 1 und 2 (kJ/kg)
- h''_1, h''_2 spezifische Enthalpie von Dampf in Zustand 1 und 2 (kJ/kg)

3.3.2 Phasenübergang fest-fest

Vernetzte Polyethylene werden als Speichermaterial für Fest-Fest-Latentwärmespeicher verwendet. Diese schmelzen bei Wärmezufuhr nicht, sondern ändern die kristalline Struktur und speichern somit die Wärme latent. Fest-fest-Speichermaterialien bleiben durchgehend im festen Aggregatzustand, sind reaktionsträge und weisen eine geringere Speicherdichte als gängige Latentwärmespeichermaterialien auf. [84]

3.3.3 Phasenübergang fest-flüssig

Hierbei ändert das PCM durch Wärmezufuhr den Aggregatzustand bei Erreichen der Phasenwechseltemperatur von fest zu flüssig und umgekehrt bei Wärmeabfuhr. Die Phasenwechselmaterialien sind durch die Phasenwechseltemperatur und die Schmelzenthalpie gekennzeichnet. Je nach Temperaturanforderung können verschiedene PCMs wie Metalle, Salzhydrate oder Zuckeralkohole eingesetzt werden. Bei Salzlatentwärmespeichern wird oft eine Graphitmatrix eingebettet, um eine bessere Wärmeleitfähigkeit zu erreichen. Die Konstruktion 3.9 zeigt ein für industrielle Prozesswärme geeignetes PCM-Speichermodul. [102], [84]

3.4 Performance

Im Rahmen der Branchenanalyse (Kapitel 2) konnten, speziell in der Nahrungsmittelindustrie, einige Prozesszeiten von Produktionsvorgängen ausgemacht werden. Die Dauer eines Wärmebedarfs reicht von einer Sekunde beim Sterilisieren der Milch bis hin zu 240 Minuten beim Erhitzen der Würze in den Brauereien. Deshalb werden im Folgenden relevante

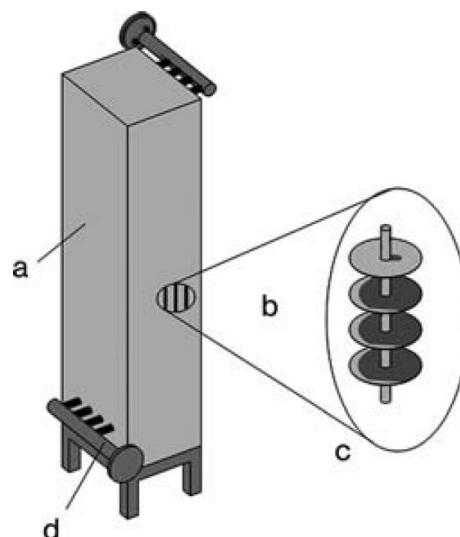


Abbildung 3.9: Aufbau eines PCM-Speichermoduls mit: (a) Tank mit PCM befüllt; (b) Rohrbündel; (c) einzelnes Rohr mit Rippen; (d) Abnehmer (Quelle: [102])

Tabelle 3.7: Latentwärmespeicher (Quelle: [44], [46], [71])

Speicher	Speichermedium	spez. mekapazität [kWh/m ³ K]	Wär- Temperatur- bereich [°C]	Speicher- dichte [kWh/m ³]	Schmelz- enthalpie [Wh/kg]
Ruths Dampf-Speicher	H ₂ O/Stahl	1,11/0,87	120-250	30-40	92,78
Rippenrohr Salz	NaNO ₃ , KNO ₃ , NaNO ₂	0,92/0,91/1,28	142 (SP)	etwa 100	48,61
Glattrohr Salz-Graphit	EG+NaNO ₃ , KNO ₃ , NaNO ₂	0,92/0,91/1,28	SP etwa 142	etwa 100	etwa 49
Glattrohr Metall	z.B.: Mg ₄₉ Zn ₅₁	N/A	etwa 340	etwa 140	etwa 28
Drei-Tank-Flüssigsalz	NaNO ₃ +KNO ₃	0,87	222 (SP)	55	27,78

Speichereigenschaften zur Industrieintegration untersucht. Die in der Branchenanalyse geschilderten Prozesszeiten erfordern kurze Be- und Entladezeiten. Für kurze Ladezeiten sind gute Wärmeleitfähigkeiten λ (bzw. k) der Speichermaterialien signifikant; zusätzlich bestimmt die Wärmeleitfähigkeit die Flächengröße für den Temperatúraustausch. In diesem Abschnitt soll nun die Eignung thermischer Wärmespeicher für die ermittelten Prozesse erörtert werden. Ein besonders Augenmerk wird auf PCM-Speicher und sensible Feststoffspeicher gelegt, da diese für die späteren Berechnungen (Kapitel 5) herangezogen werden. Die Visualisierung 3.10 zeigt die Erstarrungsdauer zweier PCM-Schichten, welche einem Rohr rundum anliegen, in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Schmelzenthalpie nach PLANK und NESSELMANN, [7] und [15].

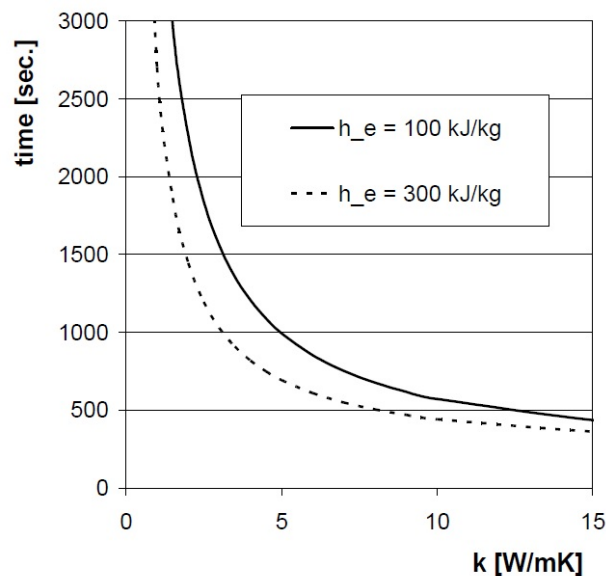


Abbildung 3.10: Erstarrungsdauer in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit (Quelle: [15])

Verglichen werden zwei PCMs mit einer Schmelzenthalpie von $h_e = 100 \text{ kJ/kg}$ ($27,78 \text{ Wh/kg}$), wie etwa die Mischung von Natriumnitrat mit Kaliumnitrat, und einer Schmelzenthalpie von $h_e = 300 \text{ kJ/kg}$ ($83,33 \text{ Wh/kg}$), wie etwa Kaliumnitrat. Für das Material mit der geringeren Schmelzenenthalpie beträgt die Dicke der PCM-Schicht im Versuchsaufbau aufgrund der geringeren Energiedichte 20 mm. Für das Material mit $h_e = 300 \text{ kJ/kg}$ beträgt die Schichtdicke hingegen nur 9 mm. In beiden Fällen sind die Materialien zu Beginn vollständig geschmolzen. Die Analyse zeigt ein deutliches Ansteigen der Erstarrungszeit unter einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 5 \text{ W/(mK)}$.

Über diesem Wert ist der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit gering. Höhere Schmelzenthalpien ergeben aufgrund größerer volumetrischer Energiedichten, und daraus resultierenden geringeren Distanzen zur Wärmeübertragung, kürzere Erstarrungszeiten.

Für effektive Anwendungen im industriellen Prozess sind für kurze Lade- und Entladezyklen hohe Leistungen unerlässlich. Gängige Salzhydrate und Nitrate erfüllen diese Leistung jedoch nicht, da deren Wärmeleitfähigkeit mit etwa $\lambda = 0,5 \text{ W/(mK)}$ gering ist. Prinzipiell kann die Leistung durch eine Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche oder einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit erreicht werden. Eine Option, die Wärmeübertragungsfläche zu erhöhen, ist die Makroverkapselung des Speichermaterials. Ein mit Speichermaterial gefülltes und verschweißtes Rohrbündel wird dabei in einem Kessel zum Wärmeaustausch mit dem Thermofluid eingebettet, wobei das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen des Rohrbündels möglichst groß sein soll. Die Abbildung 3.11 zeigt, dass für diese Konstruktion die Entladeleistung zu Beginn des Betriebes einen kurzen Peak aufweist, welcher aus dem vorhanden Thermofluid im Tank resultiert. Im direkten Vergleich von Paraffin, Natriumacetat ($\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$) und Natriumacetat mit Graphit zeigt sich, dass die Entladeleistung bei Natriumacetat mit Graphit aufgrund der größeren Wärmeleitfähigkeit durch die Graphiteinbettung, am höchsten ist. Durch die lange Entladedauer und die geringe Entladeleistung ist die Anwendung von reinem $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$ und Paraffin im industriellen Umfeld limitiert.

Alternativ kann das PCM mit Graphitfolien hoher Wärmeleitfähigkeit durchzogen werden, wie in Abbildung 3.12 dargestellt. Vielversprechend ist hierfür die Anwendung von verdichtetem, expandiertem Graphit (EG) mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 150 \text{ W/(mK)}$. Außerdem kann durch das Verdichten von PCM-Pulver mit Graphitpulver (Gewichtsanteil 30% Graphit) ein Composite mit einer Wärmeleitfähigkeit von bis zu $\lambda = 25 \text{ W/(mK)}$ erzeugt werden. [15], [49], [101]

Abbildung 3.13 zeigt experimentell ermittelte Abkühlkurven von eutektischen Kaliumnitrat-Natriumnitrat-Mischungen, makroverkapselt in rostfreien Stahlrohren (AISI 321) unter verschiedenen Bedingungen. Durch Erhitzen auf 270°C wird das PCM-Gemisch vollständig geschmolzen und dann in einem Kessel mit Zugang zu Kühlluft bzw. Kühlwasser montiert. Durch das Einbetten von Metallschaum und der Anwendung von Wasserkühlung wird mit einem Temperaturabfall auf 160°C innerhalb eines Zeitraums von weniger als 700 Sekunden

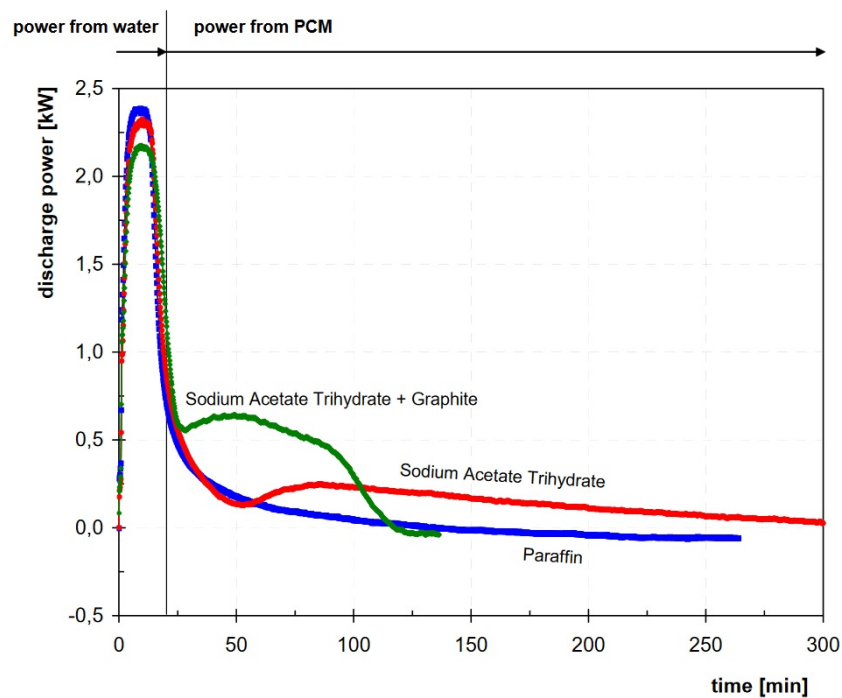


Abbildung 3.11: Entladeleistung verschiedener PCMs (Quelle: [49])

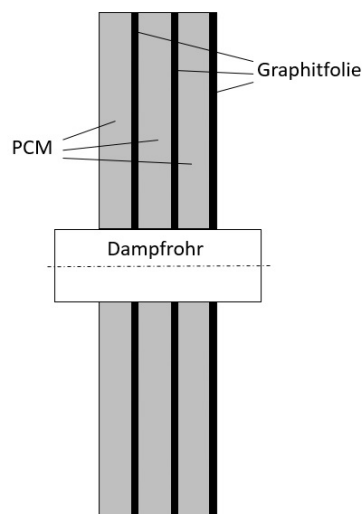


Abbildung 3.12: Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Graphitfolien (eigene Darstellung, Datenquelle: [101])

den die beste Performance erzielt. Wesentlich länger ist die Entladedauer bei Luftkühlung, Einbettung in Metallschwamm und bei reinem PCM-Gemisch. Zu beachten ist, dass sich die Schmelztemperatur durch die Einbettung verschiedener Materialien leicht verändert im Vergleich zum reinen PCM-Gemisch. [110]

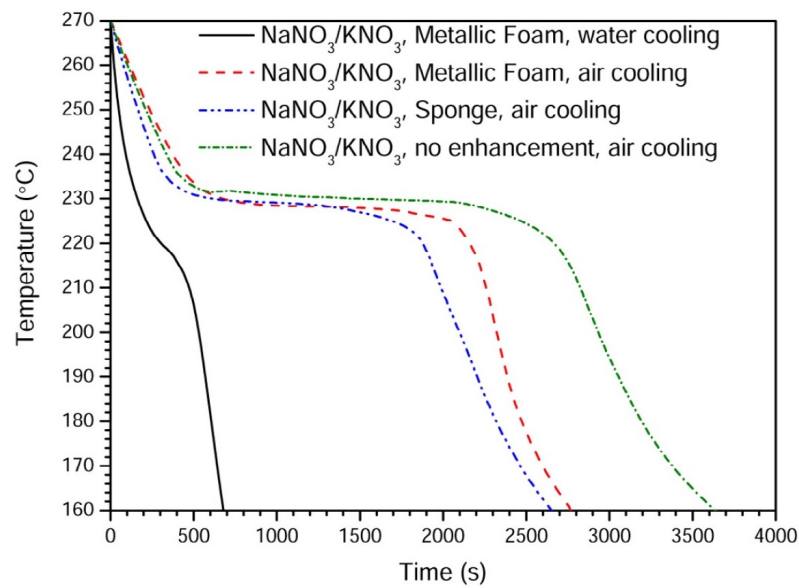


Abbildung 3.13: Abkühlzeit eines PCM (Nitrate) (Quelle: [110])

Beladezeiten können durch Einbindung wärmeleitender Bauteile in Sandwichbauweise deutlich verkürzt werden. Die Performancesteigerung durch Graphit- oder Stahlrippen wird in Abbildung 3.14 dargestellt. PCMs ohne Rippen weisen wie erwartet längere Ladezeiten als PCMs mit Stahlrippen auf. Die beste Wärmeleitung und somit auch die beste Performance beim Laden weisen PCM-Composites mit Graphitrippen auf, wo eine vollständige Beladung nach 30 Minuten möglich ist. [99]

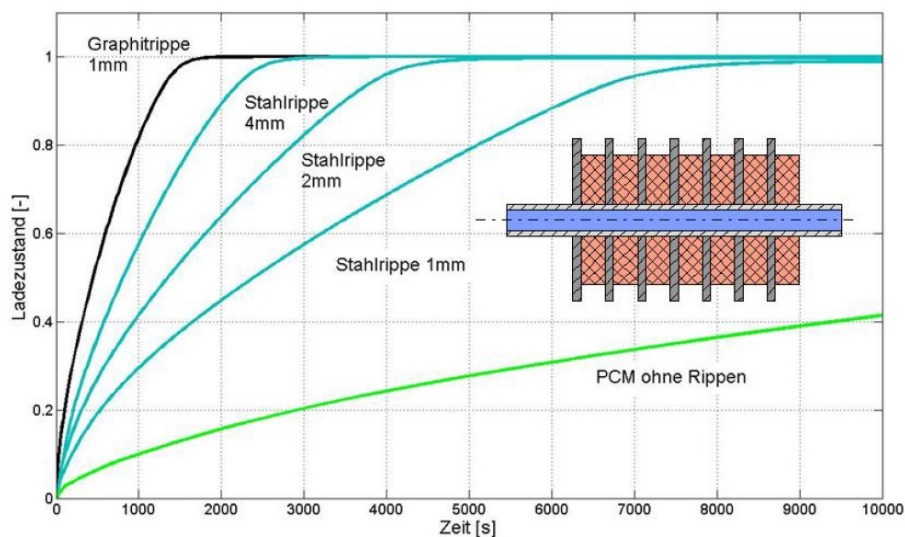


Abbildung 3.14: Aufladekurven von PCM mit und ohne Rippen (Quelle: [99])

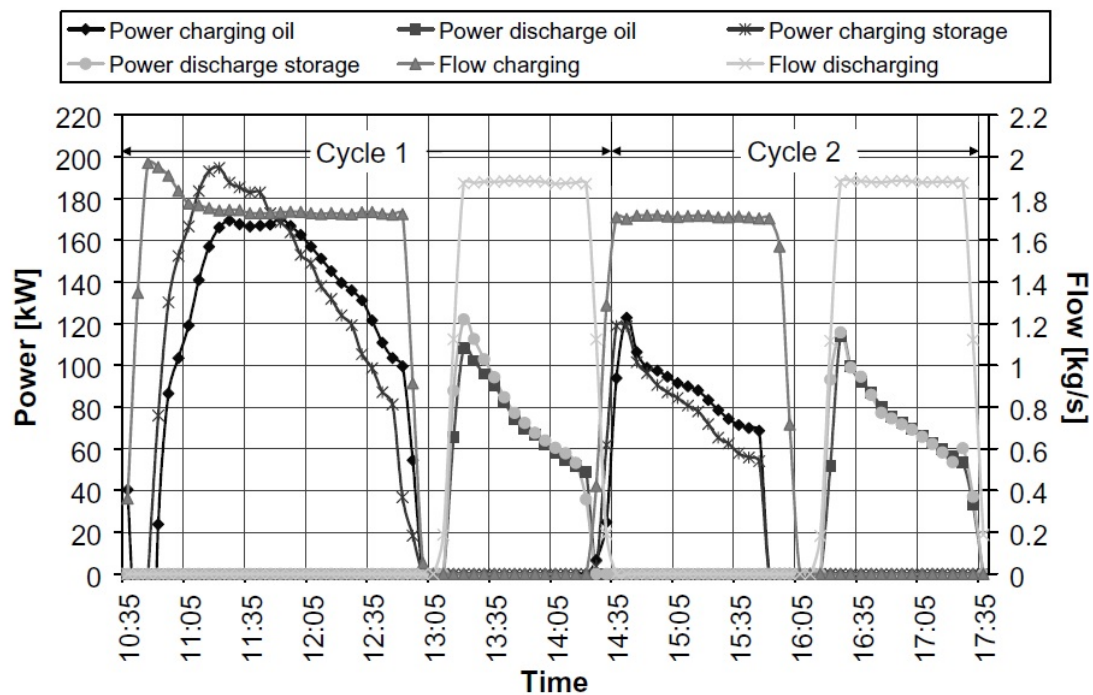


Abbildung 3.15: Leistung und Ölstrom für Betonspeicher (Quelle: [67])

Auch sensible Feststoffwärmespeicher weisen charakteristische Lade- und Entladekurven auf, welche unter Laborbedingungen analysiert wurden. Hier wurde eine Kombination aus Beton- und Keramikspeichern mit einer Kapazität von insgesamt 200 kWh und einem Betriebsbereich von 122-169°C untersucht. Diese Materialien können kombiniert betrachtet werden, da die Eigenschaften, wie Temperaturgradienten für Be- und Entladung, thermische Wärmeleitung und Wärmeausdehnung sehr ähnlich sind. Aufgrund der einfacheren Handhabbarkeit und geringeren Kosten ist Beton der Keramik für Neuinstallationen vorzuziehen. Die Abbildung 3.15 zeigt die Leistungskurven des Betons und des Thermofluids des oben beschriebenen Betonspeichers. Dieser Versuch zeigt, dass die Entladedauer eines sensiblen Feststoffspeichers mit einer Stunde etwa doppelt so lange dauert wie die des oben genannten PCM-Speichers. Auch mit einer deutlich längeren Ladedauer von 2,5 Stunden ist der sensible Feststoffspeicher dem PCM-Speicher unterlegen. [67]

Eine Reihe zu Testzwecken errichteter Latentwärmespeicher, für Kurzzeitanwendungen im industriellen Umfeld, ist in Tabelle 3.8 zu finden.

Tabelle 3.8: Kennzahlen errichteter Latentwärmespeicher (Quelle: [99], [95])

Konzept	Speichermedium	PCM- Masse [kg]	Leistung [kW]	thermische Kapazität [kWh]	Schmelz- temperatur [°C]
Sandwich	KNO ₃ -NaNO ₃	100	2-4	N/A	225
Composite EG/Salz	EG / KNO ₃ - NaNO ₃	300	10	N/A	N/A
Sandwich	NaNO ₂ - ,NaNO ₃ - KNO ₃	400	10, 15 (max.)	7	145
Sandwich	KNO ₃ -NaNO ₃	2000	100	55	225
N/A	KNO ₃ -NaNO ₃	130	2 (max.)	3,5	225
N/A	NaNO ₃	140	5 (max.)	8	306
Sandwich	NaNO ₂ - ,NaNO ₃ - KNO ₃	5500	200	200	145
N/A	NaNO ₃	14000	700 (max.)	700	306

3.5 Speicherauswahl

Für die Plausibilitätsberechnung und die zusätzliche wirtschaftliche Betrachtung für einen industriellen Einsatz, wird ein geeigneter Speicher gewählt. Da atmosphärische Wasserspeicher bereits gut erprobt und industriell häufig installiert sind, werden diese hier nicht zur Berechnung herangezogen. Zusätzlich werden Latentwärmespeicher mit Metallen aus PCM ausgeschlossen, da hier weiterer Forschungsbedarf besteht und eine Wirtschaftlichkeitsanalyse wegen zu weit streuenden Labordaten nicht zielführend ist. Schließlich werden auch Flüssigsalzspeicher ausgeschlossen, denn die ermittelten Prozesstemperaturen liegen häufig unter 200°C. Der Aufwand für den Einsatz dieser Speicher würde beträchtlich steigen, da Zusatzheizungen nötig wären, aufgrund der höheren Erstarrungstemperatur des Speichermaterials. Dagegen sind PCM-Speicher für viele der recherchierten Prozesse hinsichtlich der Betriebskennzahlen gut geeignet. Auch Betonspeicher überschneiden sich gut mit den Prozessparametern der Branchenanalyse und werden alternativ als Vergleich zum PCM-Speicher berechnet. Um für die Plausibilitätsberechnung schließlich ein aussagekräftiges Endergebnis zu erhalten, wird auch ein Ruths-Dampfspeicher für die Berechnungen in Kapitel 5 herangezogen.

Kapitel 4

Ökonomische Grundlagen

In Kapitel 2 konnten einige Potentiale für Energieeffizienzmaßnahmen aufgezeigt werden. Investitionen in Effizienzmaßnahmen sind für einen Unternehmer jedoch nicht immer wirtschaftlich. Um die Wirtschaftlichkeit einer Investition zu bewerten, werden im Folgenden verschiedene Techniken der Investitionsrechnung vorgestellt und deren Vor- und Nachteile diskutiert. Zusätzlich werden grundlegende Kennzahlen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung behandelt. Zur Bewertung von Speichersystemen werden die *Levelized Cost of Storage (LCOS)* vorgestellt, mit deren Hilfe man die Speicherkosten verschiedener Technologien ermitteln und vergleichen kann. Als Ergänzung und Abschluss wird die Pinchanalyse vorgestellt. Neben einzelnen Energieeffizienzmaßnahmen ermöglicht die Pinchanalyse eine optimale Ausnutzung aller Wärmeströme in einem Betrieb. Diese Analyse ist von der angestrebten Speicherintegration in dieser Arbeit als abgegrenzt zu betrachten, und soll einen Einblick in eine alternative Methode zur Verbesserung der Energieeffizienz geben.

4.1 Investitionsrechnung

Durch Effizienzmaßnahmen können erhebliche Energieeinsparungen erzielt werden. Die Umsetzung der Einsparung erfordert je nach Technologie einen mehr oder weniger hohen Kapitaleinsatz, welcher durch den reduzierten Energieverbrauch monetäre Vorteile ergibt. Obwohl durch Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz die Kosten oft beträchtlich gesenkt werden könnten, bleiben viele Maßnahmen aufgrund falscher Bewertungskriterien ungenutzt. In den Betrieben wird vorwiegend die Amortisationszeit zur Bewertung einer Effizienzmaßnahme eingesetzt. Nach einer Unternehmensbefragung der IHK Rheinland-Pfalz/Saarland verwenden 63% der Unternehmen die Amortisationsrechnung zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Investitionsentscheidung. 15% vertrauen auf die Barwertmethode, weitere 15% verwenden die Interne Verzinsung, der Rest macht keine Angaben. Die Amortisationszeit zeigt jedoch nur den Zeitraum an, bis das eingesetzte Kapital wieder in das Unternehmen zurückgeflossen ist und demonstriert nicht den Gesamtwert der Investition, da die Nutzungsdauer unberücksichtigt bleibt. [89]

Kritisch zu betrachten ist außerdem die Erwartungshaltung gegenüber der Amortisationszeit. 41,8% der Unternehmen erwarten einen Amortisationszeitraum von drei Jahren oder weniger. Weitere 35,2% der Unternehmen fordern von getätigten Investitionen eine Amortisation in weniger als 5 Jahren. Viele Investitionsvorhaben scheitern somit an den geforderten, kurzen Amortisationszeiten. Auf diese Weise werden insbesondere lang dauernde Projekte mit großem Einsparpotential systematisch ausgeschlossen. Diese Diskrepanz zeigt, dass die Methode der Internen Verzinsung der Amortisationsmethode vorzuziehen ist, um auch die Nutzungsdauer zu berücksichtigen. Projekte mit kurzer Amortisationszeit sind zwar sehr rentabel, jedoch besitzen lang dauernde Projekte einen besonders großen Anteil zur Ausgabenreduzierung durch die erzielte Kapitalverzinsung. [9], [50]

4.1.1 Grundlagen

Bei der Investitionsrechnung wird mit Kennzahlen die Wirtschaftlichkeit einer Investition beurteilt. Dabei werden die durch die Investition vermiedenen Kosten mit den Investiti-

onskosten ins Verhältnis gesetzt. Die allgemein anerkannten Kalkulationsverfahren sind in der VDI-Richtlinie 2067 zu finden, wo grundsätzlich zwischen statischen und dynamischen Verfahren unterschieden wird. Statische Verfahren sind mit wenig Aufwand verbunden, da diese von gleichbleibenden Rückflüssen ausgehen, wobei die häufigste Methode die Amortisationsrechnung ist. Die Vernachlässigung der Zinseffekte bei statischen Methoden ist nur bei kurzen Berechnungszeiträumen sinnvoll. Dynamische Verfahren liefern deutlich aussagekräftigere Informationen, da zeitliche Veränderungen bei den Kosten bzw. Einsparungen berücksichtigt werden. Zu diesen Verfahren zählen die Barwertmethode, die Kapitalwertmethode, die Interne Zinsfußmethode und die Annuitätenmethode. [50]

4.1.1.1 Statische Investitionsrechnung

Bei den statischen Methoden wird der zeitliche Verlauf der Aus- und Einzahlungen nicht berücksichtigt. Grundsätzlich sind dynamische Verfahren, insbesondere bei längeren Projekten, den statischen Verfahren vorzuziehen. [50]

Amortisationsmethode: Bei der statischen Amortisationsmethode (*Pay-off-method*) wird der Zeitraum berechnet, in dem die Investitionsausgaben (IA) durch die erzielten Überschüsse bzw. Kapitalrückflüsse (G) wieder gewonnen werden. Das bedeutet, dass der Zeitraum errechnet wird, bis sich die Anschaffungskosten aus den periodischen Gewinnen der Investition refinanzieren. Die Amortisationszeit (AZ) nach der Durchschnittsmethode wird gemäß Formel 4.1 berechnet. [22]

$$AZ = \frac{IA}{G} \quad (4.1)$$

4.1.1.2 Dynamische Investitionsrechnung

Bei der dynamischen Investitionsrechnung werden Geldströme als Zahlungsreihen erfasst. Dabei sind Zahlungen Geldbeträge, welche ausgegeben oder eingenommen werden. Neben der Höhe der Zahlung ist hier auch der Zeitpunkt der Zahlung wichtig. Eine heute angelegte

Geldmenge wird aufgrund aufsummierter Zinsen zu einem späteren Zeitpunkt einen höheren Wert aufweisen als der heute angelegte Geldbetrag.

Barwertmethode: Um den Zeitwert des Geldes zu berücksichtigen, werden die Zahlungen, die zu verschiedenen Zeiten t anfallen, bei der Barwertmethode auf einen bestimmten Zeitpunkt umgerechnet. Formel 4.2 zeigt die Errechnung des Barwerts BW , wobei Z genau einer zukünftigen Zahlung zum Zeitpunkt t und i dem Zinssatz entspricht. [24]

$$BW = \frac{Z_t}{(1+i)^t} \quad (4.2)$$

Kapitalwertmethode: Die Kapitalwertmethode berechnet den Kapitalwert (*Net Present Value*) einer Investition nach Formel 4.3. Der Kapitalwert ist der mit dem Kalkulationszinsfuß abgezinste Betrag aus allen Aus- und Einzahlungen, welche mit der Investition verbunden sind. C_0 ist der Kapitalwert bezogen auf den Zeitpunkt $t = 0$, welcher abhängig ist vom kalkulatorischen Zinssatz i , und den Zahlungsströmen (*Cashflow*) Z_t in den Periode t (Element aus $[0, T]$). Der Zahlungsstrom ergibt sich aus den Einzahlungen minus den Auszahlungen in der Periode t . [26]

$$C_0(i) = -I + \sum_{t=0}^T \frac{Z_t}{(1+i)^t} \quad (4.3)$$

Durch die Abzinsung der Aus- und Einzahlungen auf den Zeitpunkt des Beginns der Investition werden die Zahlungen vergleichbar gemacht. Anders ausgedrückt entspricht der Kapitalwert auch der Summe der Barwerte. Ergibt sich ein positiver Wert, dann ist die Investition sinnvoll. Bei einem Wert von Null ist die Investition gerade noch rentabel und bei einem negativen Wert ist die Investition nicht vorteilhaft und sollte unterlassen werden.

Interner Zinsfuß: Die Kapitalwertmethode ist für Budgetentscheidungen oft nicht aussagekräftig genug. Ein positiver Kapitalwert zeigt zwar an, dass eine Investition vorteilhaft ist, aber erst die errechnete Rendite der Internen Zinsfußmethode (*Internal Rate of Return*) ergibt aussagekräftige Entscheidungshilfen. Zur Berechnung des internen Zinsfußes

ist eine Nullstellenbestimmung und anschließende Interpolation erforderlich. Um den Zinssatz zu berechnen, wird die aus der Kapitalwertmethode bekannte Gleichung 4.3 mit dem Kapitalwert KW gleich Null gesetzt. [25]

$$KW = -I + \sum_{t=0}^T \frac{Z_t}{(1+i)^t} \stackrel{!}{=} 0 \quad (4.4)$$

Zuerst wählt man einen geschätzten Zinssatz i_1 , um den Kapitalwert KW_1 zu ermitteln. Ist der $KW_1 > 0$, so ist ein $i_2 > i_1$ zu wählen, um KW_2 zu berechnen oder umgekehrt. Mit den Werten i_1 , i_2 , KW_1 und KW_2 erhält man eine Geradengleichung, woraus der tatsächliche Zinsfuß i^* mittels Interpolation ermittelt werden kann:

$$i^* = i_1 - \frac{KW_1}{KW_2 - KW_1} \cdot (i_2 - i_1) \quad (4.5)$$

Schließlich errechnet man mit Gleichung 4.4 den Kapitalwert KW_3 . Sollte dieser nicht nahe genug bei Null liegen, wird das Verfahren wiederholt, bis eine ausreichende Genauigkeit vorliegt. Schlussfolgernd ist zu sagen, dass dem Unternehmen beim internen Zinsfuß die Unsicherheit bleibt, dass fließende Zahlungen für gewöhnlich nicht vollständig im Voraus eingeschätzt werden können. [18]

Annuitätenmethode: Die Annuitätenmethode ist eine Fortsetzung der Kapitalwertmethode. Diese Methode berechnet aus dem Kapitalwert gleichbleibende Zahlungen, die sogenannten Annuitäten. Beim Annuitätenverfahren können Investitionen mit verschiedenen Investitionsausgaben und verschiedener Nutzungsdauer direkt miteinander verglichen werden. In der Formel 4.6 ist die Annuität a als Produkt aus dem Kapitalwert C_0 und dem Annuitätenfaktor $ANF(n, i)$ dargestellt. [23]

$$a = C_0 \cdot ANF(n, i) \quad (4.6)$$

Der Annuitätenfaktor wird auch als Kapitalwiedergewinnungsfaktor bezeichnet und errechnet sich nach Formel 4.7 mit dem Zinssatz i und der Nutzungsdauer n .

$$ANF(n, i) = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (4.7)$$

Die Investition ist einer Nichtinvestition vorzuziehen, wenn sich positive Zahlungen ergeben.

4.2 Wirtschaftliche Grundlagen der Speicher

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Speichersysteme ist aufwändig und problembehaftet. Die erste Herausforderung sind die stark schwankenden Angaben der Investitionskosten für die einzelnen Speichersysteme in der Literatur. So reichen zum Beispiel die Angaben für Investitionskosten eines Schwungradspeichers von einigen hundert €/kW bis hin zu einigen zehntausend €/kW. Ursache hierfür sind die fehlende Marktreife der Technologien oder rechtliche Unklarheiten. Auch regionale Unterschiede und ungleiche Dimensionierungen, oder verschiedene Energiepreisszenarien machen eine wirtschaftliche Prognose oft schwierig. Es ist zu erwähnen, dass Speicher bei unterschiedlicher Anwendung verschiedene Anforderungen erfüllen müssen und daher oft nicht nur nach wirtschaftlichen Aspekten ausgewählt werden können. [29]

4.2.1 Kommerzielle Grundlagen

Ein guter Überblick über die verfügbaren Speichersysteme kann aus RUNDEL und MEYER, [84] entnommen werden; deshalb wird hier nur kurz auf ökonomisch relevante Grundlagen der Speicher eingegangen. Die Grafik 4.1 gibt einen Überblick über die aktuell verfügbaren Speichermöglichkeiten, um auch die Positionierung der Wärmespeicher im Vergleich gegenüber andere Energiespeicher zu sehen. Hierbei werden die wichtigsten Charakteristika, wie Entladedauer und Speicherkapazität, abgebildet. Die Speicher im TWh-Bereich, wie Power-to-Gas-Anlagen, sind prädestiniert für den Wochen- und Jahreslastausgleich. Die Speicher im GWh-Bereich hingegen, wie Druckluftspeicher, eignen sich für den Ausgleich der Tageslast. Für den Stundenlastausgleich eignen sich die Speicher im MWh-Bereich, insbesondere Batterien. [29]

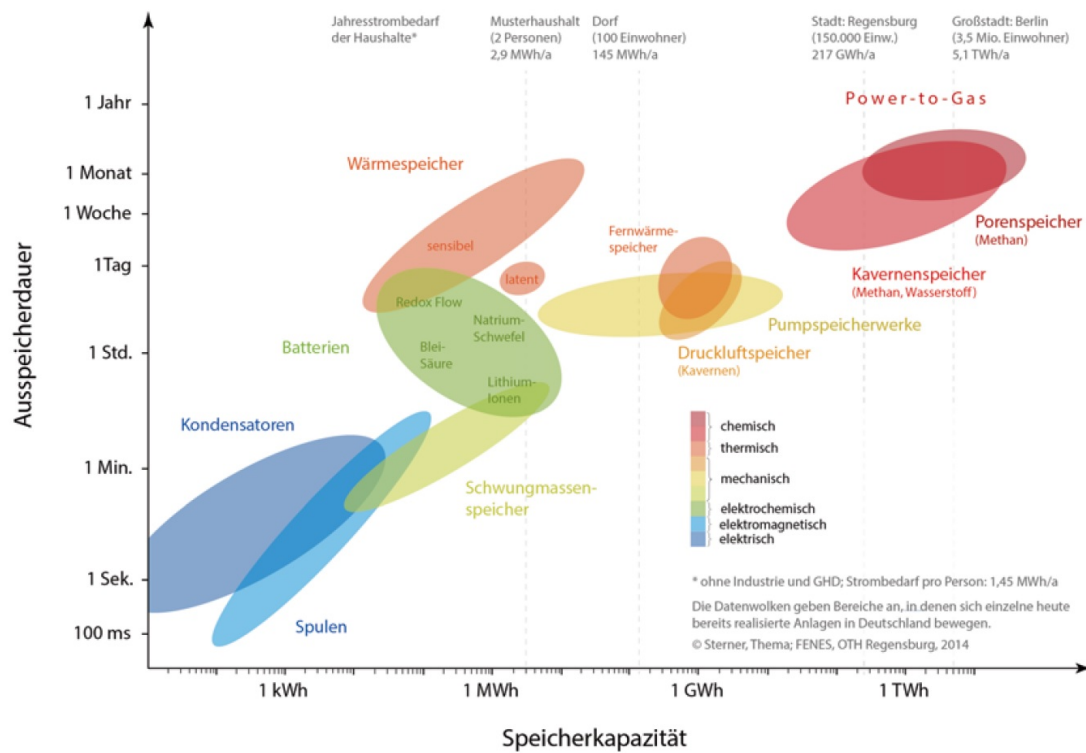


Abbildung 4.1: Eigenschaften aktueller Energiespeicher (Quelle: [97])

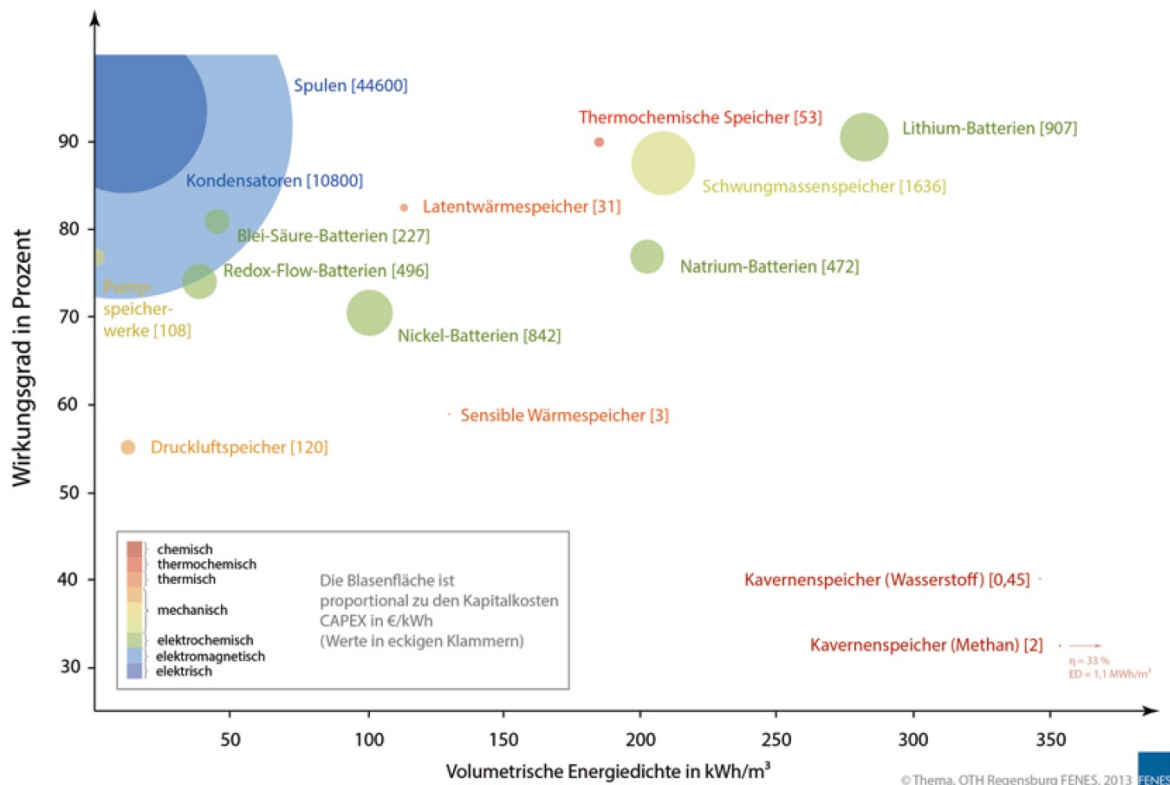


Abbildung 4.2: Investitionskosten bekannter Speicher (Quelle: [97])

Im Diagramm 4.2 ist der Wirkungsgrad verschiedener Speichersysteme gegen die volumetrische Energiedichte aufgetragen. Die Zahlen in den eckigen Klammern bzw. die Fläche der Kreise geben die mittleren Kapitalkosten der Speichertechnologie an, wobei zu erkennen ist, dass Spulen und Kondensatoren überdurchschnittlich hohe Investitionskosten verursachen und ungünstige Energiedichten haben.

Volumetrische Energiedichte, Wirkungsgrad, Investitionsausgaben (*Capital expenditure - CAPEX*) und Betriebskosten (*Operational expenditure - OPEX*) sind vier wichtige Parameter bei der Ermittlung der Wirtschaftlichkeit. Es müssen jedoch noch andere Faktoren, wie Speicherkapazität, Ausspeicherdauer und Zyklenzahl berücksichtigt werden, welche in Tabelle 4.1 für die bedeutendsten Speicher im Vergleich angeführt werden.

4.2.2 Levelized Cost of Storage

Ein neuer Ansatz, um die Wirtschaftlichkeit eines Speichers zu ermitteln, ist die Berechnung der Levelized Cost of Storage. Dieser Ansatz leitet sich vom Prinzip der Berechnung der Stromgestehungskosten (*Levelized Cost of Electricity - LCOE*) ab, wobei die LCOS direkt die Kosten eines Speichersystems berechnet und nicht nur die Kosten der Stromerzeugung wie bei den LCOE. Die LCOS ermöglicht den Vergleich verschiedener Speichertechnologien für jeweils einen Anwendungsfall. Hier ist zu berücksichtigen, dass Speicher für verschiedene Anwendungen eingesetzt werden können, wie Peak-Shaving oder die Bereitstellung von Reserveleistung. Die verschiedenen Anwendungsfälle müssen bei der Berechnung getrennt betrachtet werden, da sich auch die Parameter zur Berechnung verändern. Unter Berücksichtigung aller Parameter berechnen sich die LCOS für die geplante Laufzeit in Stromkosten pro kWh, nach Formel 4.8. [73]

Tabelle 4.1: Eigenschaften der Speichertechnologien (Quelle: [97])

Technologie	Volumetrische Energiedichte [kWh/m ³]	Wirkungsgrad [%]	Zyklenzahl	CAPEX [€/kWh]	OPEX [€/kWh]
Kondensator	10	90-95	1 Mio.	5.150-12.000	
Spule	10	92	>1 Mio.	13.570-75.670	
Blei-Säure-Batterie	25-65	74-89	203-1.315	90-355	0,16-0,76
Nickel-Batterie	60-105	71	350-2.000	385-1.100	
Lithium-Batterie	190-375	90-97	400-1.900	170-600	0,13-0,76
Pumpspeicherwerk	0,35-1,1	70-82	12.800-33.000	40-180	0,08
Druckluft diabat	2-7	40-55	8.620-17.100	40-80	0,01-0,26
Druckluft adiabatisch	2-8	60-68	N/A	N/A	N/A
Schwungmasse	210	83-93	>1 Mio.	650-2.625	1
Sensibler Wärmespeicher	100-300	45-75	5.000	0,2-8	0,1
Latentwärmespeicher	113	75-90	5.000	15-50	0,1-0,5
Thermochemischer Speicher	120-250	80-100	3.500	8-100	

$$\begin{aligned}
LCOS = & \frac{CAPEX}{\#cycles \cdot DOD \cdot C_{rated} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{1-DEG \cdot n}{(1+r)^n}} \\
& + \frac{O\&M \cdot \sum_{n=1}^N \frac{1}{(1+r)^n}}{\#cycles \cdot DOD \cdot C_{rated} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{1-DEG \cdot n}{(1+r)^n}} \\
& + \frac{\frac{V_{residual}}{(1+r)^{N+1}}}{\#cycles \cdot DOD \cdot C_{rated} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{1-DEG \cdot n}{(1+r)^n}} \\
& + \frac{P_{elec-in}}{\eta \cdot (DOD)}
\end{aligned} \tag{4.8}$$

mit:

$\#cycles$	Lade/Entladezyklen pro Jahr
DOD	Entladetiefe
C_{rated}	Kapazität
DEG	jährlicher Kapazitätsverlust
N	Projektlaufzeit in Jahren
r	Abzinsungssatz
$O\&M$	Betriebs- und Instandhaltungskosten
$V_{residual}$	Restwert
$P_{elec-in}$	Stromtarif
$\eta \cdot (DOD)$	Zykluseffizienz

4.2.3 LCOS einer Lithium-Ionen-Batterie

Im Folgenden soll die Wirtschaftlichkeit einer Lithium-Ionen-Batterie für den Einsatz an einer Photovoltaik-Anlage, um Spitzenlasten auszugleichen, errechnet werden. Angenommen wird ein CAPEX von 500 €/kWh und 350 Zyklen im Jahr mit einer Entladetiefe von 80%. Die Projektlaufzeit soll 15 Jahre betragen, die Betriebs- und Instandhaltungskosten 10 €/kWh und der konstante Stromtarif zur Beladung 0.06 €/kWh. Der Abzinsungssatz wird mit 10% und der Restwert wird mit 20% des CAPEX angenommen. Mit der Formel 4.8 ergeben sich hierbei 35 Eurocent/kWh für die LCOS. Bei diesem Ergebnis zeigt sich, dass

die Investition nur sinnvoll wäre, wenn die Alternativen einen sehr hohen LCOE hätten. Die üblichen LCOE liegen jedoch aktuell bei 2,9-11,4 Eurocent/kWh für Wind-Onshore-Anlagen, über 2,9-8,4 Eurocent/kWh für Braunkohleenergieträger bis hin zu 3,5-18,0 Eurocent/kWh für Photovoltaik Großkraftwerke [33]. Ohne Förderung erscheint eine Investition in diesem Beispiel nicht sinnvoll. Erst mit der technologischen Weiterentwicklung, einer höheren Marktdurchdringung und dem damit zu erwartenden Abfall der LCOS werden Lithium-Ionen-Speicher in dieser Anwendung wettbewerbsfähig werden. [73]

4.2.4 LCOS aktueller Technologien

Die Abbildung 4.3 zeigt eine Gegenüberstellung verschiedener aktueller Speichersysteme, inklusive der Kostenzusammensetzung. Verglichen werden hier Speicher mit einer Leistung von 100 MW und einer Kapazität als Kurzzeitspeicher von 400 MWh für 365 Zyklen pro Jahr und angenommenen Stromkosten von 3 Eurocent/kWh. Die Kostenanteile in der Grafik lassen erkennen, dass bei den Batterien die Speichereinheit der größte Kostenfaktor ist, und bei Power-to-Gas die Ladeeinheiten und das Laden selbst die größten Kostentreiber sind. [61]

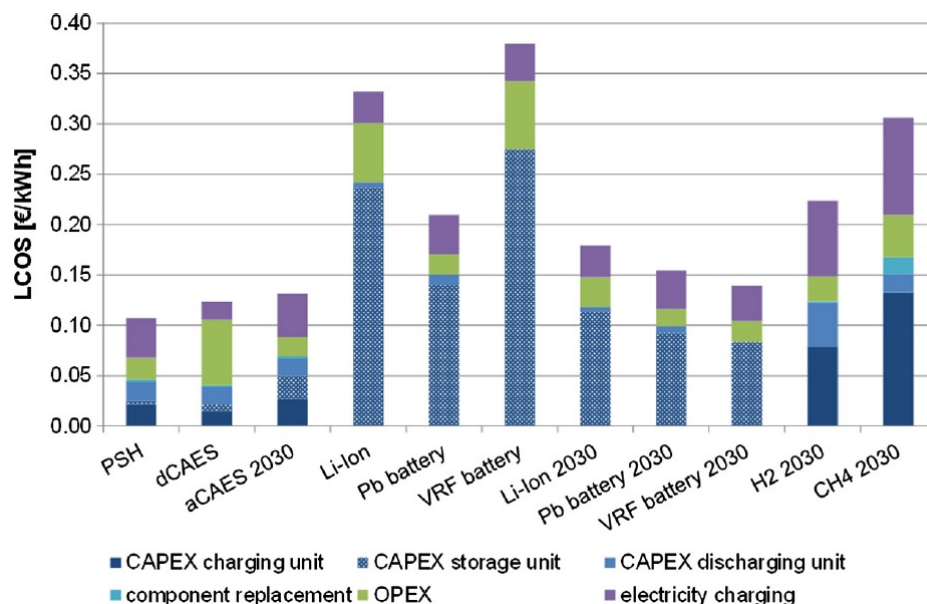


Abbildung 4.3: LCOS und Kostenanteile für Kurzzeitspeicher (Quelle: [61])

Man erkennt, dass die Pumpspeicher als ausgereifte Technologie die geringsten Speicherko-

sten aufweisen. Batterien sind noch immer kostspielig, jedoch ist aufgrund der Nachfrage eine weitere Kostensenkung für die Zukunft zu erwarten. Auch von den Power-to-Gas-Speichern (H_2 , CH_4) und Druckluftspeichern werden bis 2030 konkurrenzfähige Preise erwartet. Auch hier gilt, dass jeder Anwendungsfall gesondert betrachtet werden muss, da unterschiedliche Anforderungen an die Speicher die Preise deutlich verändern. [61]

4.3 Pinchanalyse

4.3.1 Grundlagen

Ziel dieser Optimierung ist eine effiziente Versorgung eines beliebigen Prozesses mit Energie. Insbesondere die Verschaltung von Wärmeüberträgern kann damit optimiert werden. Dazu nutzt man die Charakteristik der Prozessströme, wie die Anfangs- und Endtemperatur und die Enthalpie. Das Ergebnis der Pinchmethode ergibt den minimalen Betriebsmittelbedarf bzw. die thermodynamisch minimal erreichbaren Dimensionen der betroffenen Installationen. [70]

4.3.2 Durchführung

Die Basis zur Bestimmung des minimalen Energieverbrauchs einer thermischen Einrichtung bilden die Composite-Kurven. Die Tabelle 4.3 zeigt exemplarisch zwei Wärmeströme zur Demonstration der Pinchanalyse.

Tabelle 4.3: Exemplarische Wärmeströme

Strom	Eingangs- temperatur [°C]	Ziel- temperatur [°C]	Enthalpie- strom [kW]	CP [KW/°C]
Heiß 1	125	50	-150	2
Heiß 2	90	40	-300	6

Zu Beginn wird der CP-Wert (*heat capacity flow rate*) eingeführt, welcher als Enthalpiestromänderung pro Temperatureinheit $[\text{kW}/^{\circ}\text{C}]$ definiert ist. Für den Kaltstrom 1 ergibt das $165 \text{ kW}/(125^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}) = 3 \text{ kW}/^{\circ}\text{C}$. Mit $1/CP$ erhält man die Steigung im Diagramm.

Die Grafik 4.4 zeigt die Heißströme aus der Wärmestrom-Tabelle 4.3. Man erkennt, dass es im Temperaturintervall zwischen 50°C und 125°C zwei Wärmeströme gibt, und bis 50°C bzw. über 125°C nur einen Wärmestrom gibt. Die Temperaturen von 50 - 90°C können somit von beiden Wärmeströmen bedient werden. Die Kurven können nun horizontal verschoben werden, wodurch sich die Steigungen der überlappenden Wärmeströme addieren, wie in Abbildung 4.5 dargestellt. Nach dem Splitten der Kurven ergibt sich erneut der gesamte verfügbare Wärmestrom der Kombination, in diesem Fall $60 + 320 + 70 = (150 + 300) = 450 \text{ kW}$. Diese Kombination der Kurven für die Heißströme ergibt die sogenannte Composite-Kurve. Würden sich die Temperaturen der Heißströme nicht überlappen, wäre an dieser Stelle ein vertikaler Sprung in der Composite-Kurve.

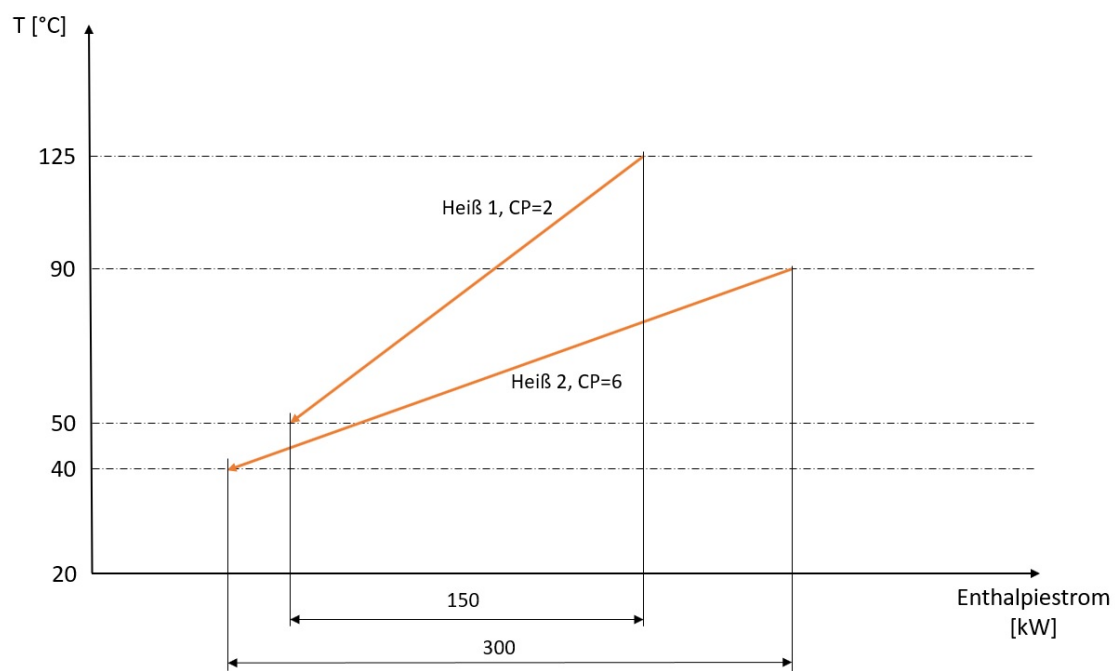


Abbildung 4.4: Heißströme im Temperatur-Enthalpiestrom-Diagramm (eigene Darstellung)

Wie für die Heißströme wird nun auch für die Kaltströme in Tabelle 4.4 eine Composite-Kurve erstellt. Die gesamte Composite-Kurve des Kaltstroms kann nun horizontal, wie in

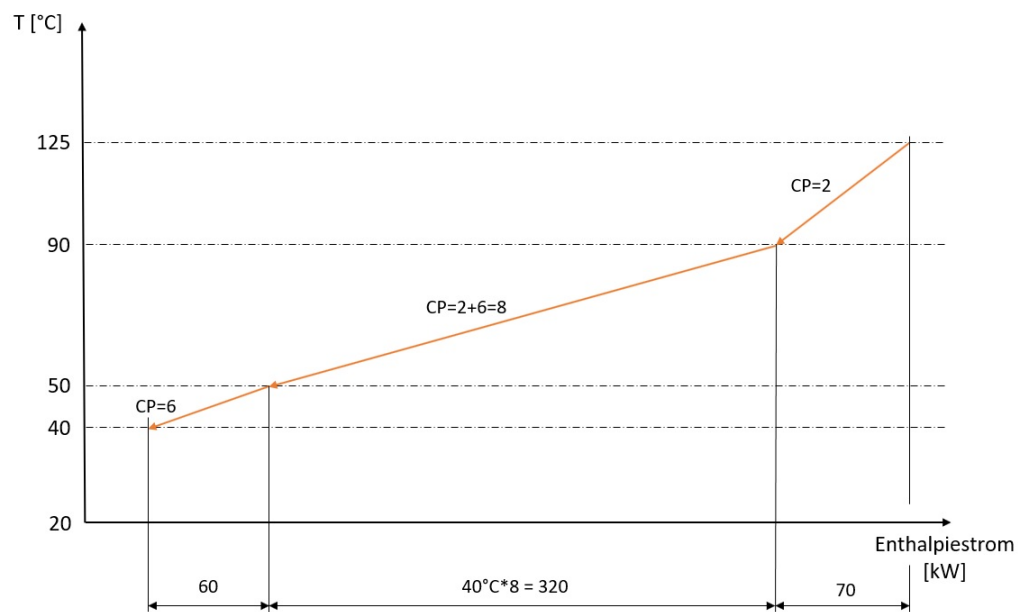


Abbildung 4.5: Composite-Kurve für die Heißströme (eigene Darstellung)

Abbildung 4.6 gezeigt, verschoben werden, bis das erwünschte ΔT_{min} erreicht wird. Damit der Wärmeaustausch stattfinden kann, muss die Composite-Kurve des Heißstroms über der Composite-Kurve des Kaltstroms liegen. Der Wert für ΔT_{min} hängt von den Betriebstemperaturen des Wärmetauschers ab und kann mit Supertargeting (Abschnitt 4.3.3) zusätzlich optimiert werden. Der Pinchpunkt, die Stelle von ΔT_{min} , ist die treibende Kraft. Die Wärmetauscher am Pinchpunkt werden die größten Flächen zum Wärmeaustausch, und somit auch die größte Baugröße, haben. Der Bereich der Wärmerückgewinnung soll maximal werden, um die Energiekosten zu minimieren.

Tabelle 4.4: Exemplarische Kälte- und Wärmeströme

Strom	Eingangstemperatur [°C]	Zieltemperatur [°C]	Enthalpiestrom [kW]	CP [kW/°C]
Heiß 1	140	50	-180	2
Heiß 2	90	40	-300	6
Kalt 1	30	150	240	2
Kalt 2	70	125	165	3

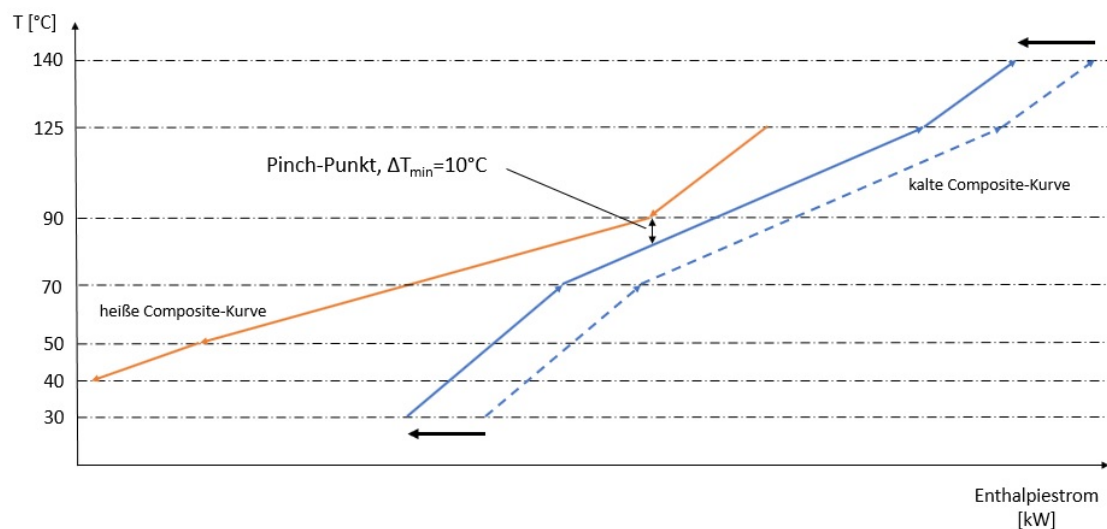


Abbildung 4.6: Darstellung des Pinchpunktes (eigene Darstellung)

Bei vielen Kälte- und Wärmeströmen unterstützt die Pinchanalyse auch die Erstellung des Produktionslayouts. Dazu wird das Diagramm in einem Bereich rechts vom Pinch-Punkt (Wärmesenke) und einen Bereich links vom Pinchpunkt (Wärmequelle) laut Abbildung 4.7 aufgeteilt. So sollen die Anlagen der Heiß- und Kaltströme rechts vom Pinchpunkt nahe zusammen gebaut werden, da diese von der Wärmeübertragung betroffen sind. Das selbe gilt für Installationen links vom Pinchpunkt. So werden die Investitionskosten für die Leitungen auf ein Minimum reduziert.

Rechts von der gemeinsamen Composite-Kurve erkennt man die erforderliche externe Wärmeleistung $Q_{min,heiss} = 175 \text{ kW}$; links der gemeinsamen Composite-Kurve beträgt die erforderliche externe Leistung für eine Kühlung $Q_{min,kalt} = 250 \text{ kW}$.

Der Bereich rechts vom Pinchpunkt verhält sich wie eine Wärmesenke, da hier eine Wärmezufuhr erforderlich ist, im Gegensatz zum Bereich links vom Pinchpunkt, der sich wie eine Wärmequelle verhält, da hier Wärme vom System abgegeben wird. Im Bereich der Wärmesenke darf keine zusätzliche externe Wärmequelle für Heizzwecke eingebracht werden; im Bereich der Wärmequelle darf keine weitere Kälteanlage installiert werden. Außerdem darf zwischen der Wärmequelle und der Wärmesenke keine Wärmeübertragung stattfinden, da die gewünschte Optimierung ansonsten nicht erreicht wird.

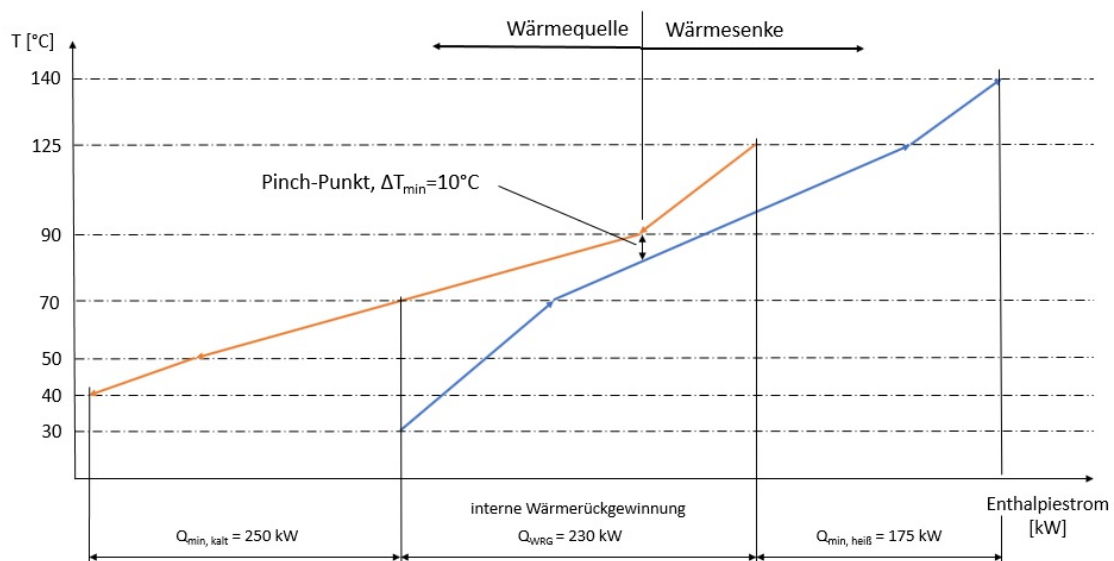


Abbildung 4.7: Auswertung im Temperatur-Enthalpiestrom-Diagramm (eigene Darstellung)

4.3.3 Optimierung durch Supertargeting

ΔT_{min} kann per Supertargeting auf die optimale Temperaturdifferenz gebracht werden, da beim Supertargeting auch Aspekte der Wirtschaftlichkeitsrechnung mitberücksichtigt werden. Werden die Composite-Kurven horizontal angenähert, so sinkt der Bedarf an zusätzlichen Kühl- und Heizanlagen.

Es steigt jedoch der Preis des Wärmetauschers, da eine kleinere Temperaturdifferenz größere Wärmetauscherflächen erfordert. Die erforderliche Fläche A kann mit der umgeformten Übertragungsgleichung 4.9 berechnet werden [94].

$$A = \frac{Q}{k \cdot \Delta T_{m,log}} \quad (4.9)$$

mit:

Q	Wärmestrom (W)
k	Wärmedurchgangskoeffizient ($\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$)
$\Delta T_{m,log}$	mittlere, logarithmische Temperaturdifferenz (K)

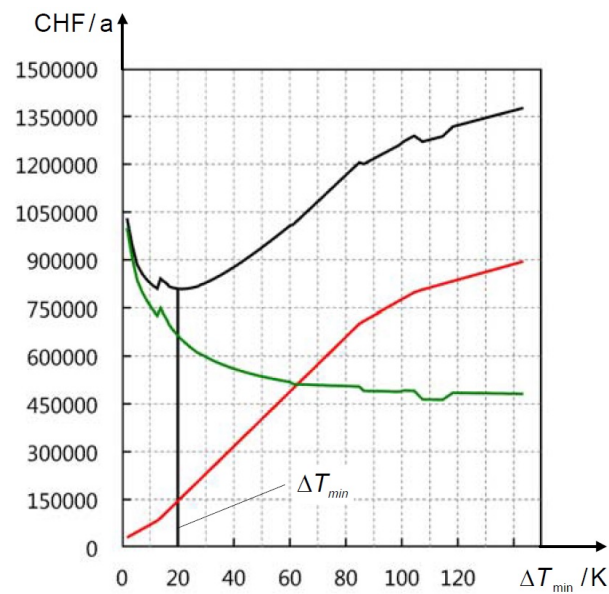


Abbildung 4.8: Kostendiagramm Wärmeüberträger-Netzwerk (Quelle: [66])

Die Abbildung 4.8 zeigt exemplarisch ein Kostendiagramm für einen Wärmeüberträger-Netzwerk. Die rote Kurve stellt die Betriebskosten dar, die grüne die Investitions- und Fixkosten. Die schwarze Kurve gibt die Gesamtkosten einer Heizung bzw. Kühlung wieder. In diesem Beispiel ergibt sich anhand der Gesamtkostenlinie, dass die Investition für ein Wärmeüberträger-Netzwerk mit einem $\Delta T_{min} = 20^\circ\text{C}$ die geringsten Kosten verursacht. Darauf sollte auch die Pinchanalyse ausgelegt werden, um die Betriebskosten zu minimieren. [66]

Kapitel 5

Technische und wirtschaftliche Berechnungen

Dieser Abschnitt führt die vorherigen Kapitel zusammen. Hier werden für die Sauerstoffentlignifizierung in der Papierindustrie, die aus der Speicherauswahl (Abschnitt 3.5) gewählten Speicher, Ruths-Dampfspeicher, PCM- und Beton-TES, berechnet. Hierzu werden die TES für den Wärmebedarf, die Prozessdauer und die Temperatur der Entlignifizierung ausgelegt. Die Integration der PCM- und Beton-Speicher in den Prozess wird zusätzlich durch Fließdiagramme dargestellt. Mit der notwendigen Dampfmenge, PCM-Speichermasse bzw. Spezialbetonmasse werden auch Gesamtinvestitionskosten und folglich die jährlichen Betriebskosten ermittelt. Aus der Literatur stehen mehrere Möglichkeiten zur Berechnung der Investitionskosten zur Verfügung. Allgemein können Investitionsausgaben für Industrieanlagen mit der Chilton-Methode nach COUPER, [19, S. 90] berechnet werden. Diese Methode wird später beim Ruths-Dampfspeicher gezeigt. Für die die Anlagenkosten der PCM- und Beton-TES wurden genauere Kostensätze zur Berechnung aus Referenzprojekten eruiert, welche folglich auch verwendet werden.

Untersucht wird die Integration für EE und interner Abwärme als Energiequelle. Aus der internen Abwärmequelle steht Dampf mit 163°C bei 4 bar zur Verfügung (nach Kapitel 2.5.3.4). Bei EE als Energiequelle wird elektrischer Strom aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen und über eine Power-to-Heat-Anlage in Wärme umgewandelt. Damit ergibt sich

eine jährliche Kostensenkung, je nach Zyklenzahl und Stromeinkaufspreis. Darauf aufbauend wird mittels Investitionsrechnung die Rentabilität bewertet. 13 Fälle sollen berechnet werden, wobei das Speichermedium, die Auslastung, der interne Zinsfuß, die Lebensdauer und die Energiequelle variiert werden. Mit Hilfe der LCOS-Berechnung wird die Plausibilität der Berechnung geprüft. Die vollständige Rechnung der Speicherauslegung (Kapitel 5.1) kann dem Anhang B entnommen werden, wo auch weitere Rechenschritte (wie Machbarkeitskontrollen) und zusätzliche Literaturquellen zu finden sind. Der Anhang C zeigt die Auswertung der Wirtschaftlichkeitsanalyse (Kapitel 5.3) in vollem Umfang, inklusive grafischer Darstellungen.

Relevanz erneuerbarer Energien: Die Energiewirtschaft wird durch EE mit zunehmenden Herausforderungen konfrontiert. Zum Beispiel sind an der Strombörse durch Einspeisung unbepreister Elektrizität aus EE zunehmende Preisschwankungen zu beobachten [103]. Es kommt dabei zu Negativstrompreisen, wodurch der Strom für den Abnehmer vorübergehend günstig verfügbar ist.

Außerdem ist die vollständige Integration hoher Anteile regenerativer Energien ohne Stromspeicher unmöglich. In Zukunft sollen Energiespeicher ein fester Bestandteil im Verteilernetz des Netzbetreibers werden [39]. Zentrale Speicher mit großen Kapazitäten sind jedoch teuer und somit kann es sinnvoll sein, Stromüberschüsse aus EE dezentral an verschiedenen Standorten des produzierenden Gewerbes mit TES zu speichern (Power-to-Heat). Die resultierende zeitliche Entkopplung des Energieangebots vom Energiebedarf ermöglicht eine Erhöhung des Solar- und Windanteils gegenüber fossilen Energieträgern [100].

Nachstehend werden die Speichieranwendungen auch für die Nutzung von EE-Überschüssen berechnet, um einen Vergleich zur Nutzung von interner Abwärme zu bekommen.

5.1 Auslegung

Die Berechnungen für die Speicherauslegung des Dampf-, PCM- und Betonspeichers werden im MathCAD durchgeführt. Für den als Abnehmer gewählten Prozess, der Sauerstoffentli-

gnifizierung, liegen folgende Daten von KLEMENS, [64, S. 768] und [80] vor:

$d_O = 60 \text{ min}$	Prozessdauer Entlignifizierung
$t_O = 100^\circ\text{C}$	Prozesstemperatur Entlignifizierung
$q_O = 125 \text{ kWh/adt}$	spezifischer Wärmebedarf Entlignifizierung
$\dot{m}_O = 1.250 \text{ t/d}$	Tagesproduktion Entlignifizierung bzw.
$m_{O,h} = 52.08 \text{ t}$	Produktion in 1 h Entlignifizierung

Um die Speicherdimensionierung in einem realistischen Rahmen zu halten, soll der Speicher für 30 Minuten Entlignifizierungsbetrieb ausgelegt werden. Somit ergibt sich für 30 Minuten Entlignifizierung ein Energiebedarf Q_{O30min} von

$$Q_{O30min} = q_O \cdot m_{O,h} \cdot 0,5 = 3.255 \text{ kWh}. \quad (5.1)$$

Der Wärmebedarf Q_{O30min} muss nun sowohl von den zwei Latentwärmespeichern, als auch vom sensiblen Speicher gedeckt werden. Der Wert überschreitet die Kapazität bis jetzt errichteter Latentwärmespeicher deutlich (vgl. Tabelle 3.8). Dennoch wird dieser Prozess gewählt, da mehrere Speichermodule gleichzeitig eingesetzt werden können; außerdem soll die Anwendung von Speichern für industrielle Prozesse überprüft werden. Im Folgenden werden nun die erforderlichen Speichermassen und die daraus resultierenden Kosten für beide Speicher ermittelt.

5.1.1 Latentwärmespeicher 1: PCM-Sandwich mit EG

Als Speichermaterial für den ersten Latentwärmespeicher wird ein PCM-Sandwich aus $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_2$ mit Graphit gewählt (vgl. Tabelle 3.7). Dieses Gemisch trifft die Schnittmenge aus den Anforderungen des Energieabnehmers und -lieferanten sehr gut, denn der Schmelzpunkt liegt bei etwa $t_{SPPCM} = 145^\circ\text{C}$, bei einer vergleichsweise hohen Schmelzenthalpie von etwa $h_{PCM} = 49 \text{ Wh/kg}$. Die Abbildung 5.1 zeigt das Fließbild der Speicherintegration. Diese Anordnung erlaubt drei Betriebszustände. Erstens kann der Speicher aus der Prozessabwärme geladen werden, zweitens die Entlignifizierung mittels Abwärme

ohne Speichieranwendung betrieben werden und drittens kann der Speicher für den Entlignifizierungsbetrieb ohne weitere Energiequelle entladen werden. Statt dem Wärmetauscher kommt bei Strom als Energielieferant ein Durchlauferhitzer zum Einsatz (Abbildung 5.2). Der Wirkungsgrad der Gesamtinstallation mit Förderpumpen und Leitungen mit dessen Wärmeverlust kann nicht genau eruiert werden. Dazu müssten Lagen, Geometrien und Pumpenleistungen genau bekannt sein. Aus Referenzwerten wird jedoch ein Wirkungsgrad von $\eta_{ges} = 0,7$ angenommen, welcher für alle drei Speichertechnologien gelten soll.

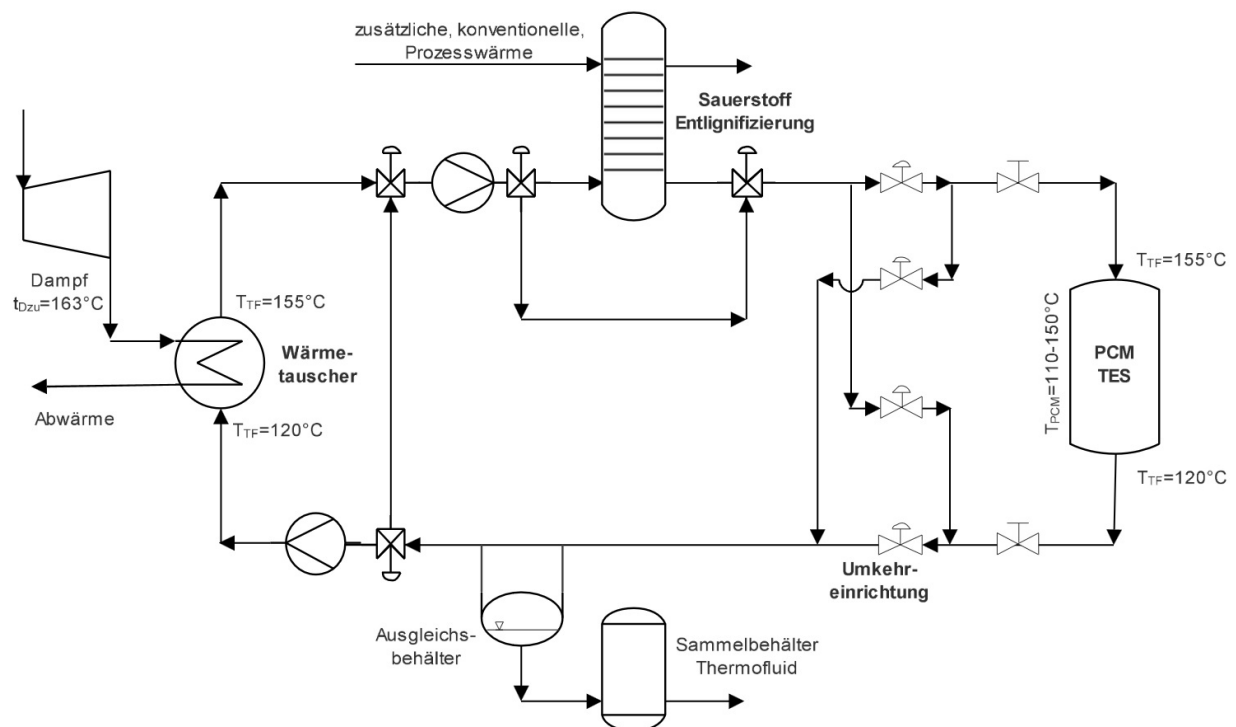


Abbildung 5.1: Fließbild zur PCM-Speicherintegration (eigene Darstellung)

Folgende Kennzahlen wurden für den gewählten Speicher aus Tabelle 3.7, [44], [47] und ELSNER und SAUER, [86, S. 59] entnommen:

$\eta_{PCM} = 0,8$	Wirkungsgrad für den Speicher
$T_{SPPCM} = 418,15 \text{ K}$	Schmelztemperatur
$\rho_{PCM} = 1.900 \text{ kg/m}^3$	spezifische, volumetrische Dichte
$c_{pPCM} = 5,263 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kWh}}{\text{kgK}}$	isobare, spezifische Wärmekapazität
$h_{PCM} = 0,04861 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$	spezifische Schmelzenthalpie
$P_{PCM} = 2.000 \frac{\text{€}}{\text{ton}}$	Preis für $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_2$ mit EG

$$\eta_{ges} = 0,7$$

Wirkungsgrad Gesamtinstallation ohne Speicher

Das ergibt mit den Wirkungsgraden für den PCM-Speicher und der Gesamtinstallation einen Wärmebedarf Q_{PCM} von

$$Q_{PCM} = \frac{Q_{O30min}}{\eta_{PCM} \cdot \eta_{ges}} = 5.813 \text{ kWh} \quad (5.2)$$

für 30 Minuten Entlignifizierungsbetrieb. Die Temperaturgrenzen lauten für den Speicher, nach Abbildung 5.1

$$T_{iPCM} = 383,15 \text{ K} \quad \text{Initialtemperatur}$$

$$T_{fPCM} = 423,15 \text{ K} \quad \text{Endtemperatur}$$

und ergeben aus der Formel 3.2 eine erforderliche Speichermasse m_{PCM} von

$$m_{PCM} = 83,34 \text{ t} \quad (5.3)$$

und einen Gesamtpreis für das PCM von:

$$PCM_{Kosten} = P_{PCM} \cdot m_{PCM} = 166.900 \text{ €}. \quad (5.4)$$

Die Aufschlüsselung für die Installationskosten eines PCM-Speichers wurden aus CHIU, [17, S. 37] entnommen, wobei die Kosten für das PCM-Material 43% ausmachen. Die Tabelle 5.4 zeigt die Berechnung der vollständigen Kosten für eine Installation. Es ergeben sich also Gesamtinvestitionskosten für das erste Jahr von 443.733 €. Die laufenden Betriebskosten setzen sich zusammen aus den Instandhaltungs- und Energiekosten und ergeben eine jährliche Zahlung von 19.407 €. Die vollständige Ausführung dieser Berechnungen kann dem Anhang B entnommen werden. Die Ergebnisse der Installations- und Betriebskosten werden in der Wirtschaftlichkeitsanalyse dieser Arbeit (Kapitel 5.3) unter anderem als Grundlage für die Kapitalwertrechnung, herangezogen.

Tabelle 5.4: Kosten für PCM-Speicher

Kostenanteil	Kostenstelle	Kosten
0,43	PCM-Material	166.900
0,17	Tank	65.984
0,01	Raum	3.881
0,1	Installation	38.814
0,24	Steuerung	93.153
0,03	Instandhaltung (Betriebskosten)	11.644
0,02	Energiekosten (Betriebskosten)	7.763
1	Gesamtkosten Speicher	388.140
	Peripherie (Wärmetauscher, Pumpen, Rohre...)	75.000
	Installationskosten gesamt	443.733

5.1.2 Latentwärmespeicher 2: Dampfspeicher

Hier kommt ein Ruths-Dampfspeicher nach Kapitel 3.3.1 zum Einsatz. Mit der Wärmequelle aus Kapitel 2.5.3.4 soll ein Gefällespeicher direkt beladen werden. Die Abwärme steht als Wasserdampf mit einer Temperatur von 163°C und 4 bar zur Verfügung und dafür soll der Speicher ausgelegt werden. Der Dampf wird als Wasser kurzzeitig gespeichert und mit der Abgabe von Nutzdampf soll wie vorhin der Entlignifizierungsprozess betrieben werden. Die Sättigungstemperatur bei einem Druck von 4 bar liegt bei 143,6°C - die Temperatur des geladenen Speichers ist somit bestimmt. Der Druck soll bei der Entladung auf 2 bar absinken, wobei eine Sättigungstemperatur von 120,2°C erreicht wird.

Folgende Kennzahlen sind für den Speicher bei Standardumgebungsbedingungen (25°C, 1013 mbar) nach GLÜCK, [40] und [44] bekannt:

$\eta_R = 0,9$	Wirkungsgrad des Dampfspeichers
$\beta = 0,9$	Füllgrad
$V_{Bmax} = 70 \text{ m}^3$	maximales Behältervolumen

$P_{RWasser} = 4 \frac{\text{€}}{m^3}$	Preis pro Kubikmeter Wasser
$P_{RStahl} = 6000 \frac{\text{€}}{ton}$	Preis pro Tonne Stahl mit Fertigung
$\eta_{ges} = 0,7$	Wirkungsgrad der Gesamtinstallation ohne Speicher

Mit den bekannten Wirkungsgraden muss der Dampfspeicher für die Entlignifizierung eine Wärmemenge Q_R von

$$Q_R = \frac{Q_{O30min}}{\eta_R \cdot \eta_{ges}} = 5.167 \text{ kWh} \quad (5.5)$$

bereitstellen.

Die Folgenden Werte für die Speicherentladung können aus der Wasserdampf tafel entnommen werden - „Start“ entspricht 4 bar und 143,6°C bzw. „Ende“ entspricht 2 bar und 120,2°C. [74], [91]

$p_{RStart} = 4 \text{ bar}$	Speicherdruck „geladen“
$p_{REnde} = 2 \text{ bar}$	Speicherdruck „entladen“
$T_{RStart} = 143,6^\circ \text{C}$	Speichertemperatur „geladen“
$T_{REnde} = 120,2^\circ \text{C}$	Speichertemperatur „entladen“
$v'_{Start} = 0,001082 \text{ m}^3/\text{kg}$	spezifisches Volumen Wasser
$h'_{Start} = 0,168 \text{ kWh/kg}$	spezifische Enthalpie Wasser
$h'_{Ende} = 0,14 \text{ kWh/kg}$	spezifische Enthalpie Wasser
$h''_{Start} = 0,761 \text{ kWh/kg}$	spezifische Enthalpie Dampf
$h''_{Ende} = 0,752 \text{ kWh/kg}$	spezifische Enthalpie Dampf
$\Delta h = 0,601 \text{ kWh/kg}$	mittlere Kondensationsenthalpie zwischen 2 u. 4 bar

Die Kondensationsenthalpie Δh entspricht der Energieabgabe bei Druckabfall mit resultierender Temperaturminderung und ermöglicht einen Zusammenhang für die Berechnung der erforderlichen Dampfmasse. Für den Betrieb der Entlignifizierung für 30 Minuten wird mit der verfügbaren, mittleren Kondensationsenthalpie Δh ein Dampfbedarf von

$$m_{DampfD} = \frac{Q_R}{\Delta h} = 8.597 \text{ kg.} \quad (5.6)$$

errechnet.

Mit der erforderlichen Dampfmasse ergibt sich nach Formel 3.5 ein Behältervolumen von:

$$V_{Bgesamt} = 227,57 \text{ m}^3. \quad (5.7)$$

Da der Gefällespeicher die Behältergröße von $V_{Bmax} = 70 \text{ m}^3$ nicht überschreiten soll, werden mehrere Speicher parallel geschaltet um den erforderlichen Nutzdampf zu decken. Hier bietet sich die Verwendung von $R = 4$ Speichern an, womit sich das einzelne Speichervolumen zu

$$V_B = \frac{V_{Bgesamt}}{R} = 56,89 \text{ m}^3. \quad (5.8)$$

ergibt.

Für die Behälterfertigung wird der warmfeste Druckbehälterstahl TK P235GH der Firma Thyssenkrupp AG gewählt. Um die Wandstärke des Dampfspeichers und weiters den Stahlbedarf zu berechnen, werden zur Berechnung die DIN 2413 und DIN EN 10028-2 herangezogen. Daraus können die Kosten der vier Speicher ermittelt werden und ergeben:

$$R_{Kosten} = 170.200 \text{ €}. \quad (5.9)$$

Die ausführliche Berechnung der erforderlichen Stahlmasse und der daraus resultierenden Equipmentkosten kann aus dem Anhang B entnommen werden. Da aus der Literatur kein geeignetes Referenzbeispiel für die Ermittlung der gesamten Installationskosten der Gefällespeicher - im Gegensatz zum vorangegangenen Latentwärmespeicher - verfügbar ist, wird hier die Chilton-Methode nach COUPER, [19, S. 90] herangezogen. Die Tabelle 5.7 zeigt die entsprechende Aufschlüsselung - es ergeben sich Gesamtinvestitionskosten von 868.766 € für das erste Jahr. Nach FÜRSTENWERTH und WALDMANN, [39, S. 45] betragen die jährlichen Instandhaltungskosten 2% der Investitionskosten und ergeben hier 17.375 €.

Tabelle 5.7: Kosten für vier Ruths-Dampfspeicher

Position	Anteil	aus Position	Kostenstelle	Kosten
1	1		Equipmentkosten	(170.200)
2	1,43	1	Installationskosten	243.386
3	0,45	2	Verrohrung (Fluid)	109.524
4	0,12	2	Instrumentierung (mittel - stark)	29.206
5	0,8	2	Standort und Gebäude (geschlossen)	194.709
6	0,025	2	Nebenaggregate (minimal)	6.085
7	0,025	2	Außenanlagen (minimal)	6.085
8			Gesamtkosten der Anlage	(588.994)
9	0,275	8	Planung und Konstruktion (einfach)	161.973
10	0,15	8	Eventualverbindlichkeiten (minimal)	88.349
11	0,05	8	Größenfaktor (mittel)	29.450
Installationskosten gesamt				868.766

5.1.3 Sensibler Wärmespeicher

Die Abbildung 5.2 zeigt das Schema der Integration eines Beton-TES. Die Schaltung entspricht der Latentwärmespeicherintegration, jedoch werden hier EE anstatt Abwärme als Energiequelle dargestellt. Die Berechnung dieser Speicherintegration ist ähnlich wie die vorangegangene Berechnung des PCM-Speicher und wird zur besseren Übersicht ähnlich abgehandelt. Als Speichermaterial wurde hier ein temperaturbeständiger Spezialbeton nach LAING ET AL., [67] gewählt. Dieser Beton enthält als Hauptbestandteil Hochofenzement als Binder und Eisenoxide mit Flugasche [67].

Folgende Kennzahlen sind vom Betonspeicher aus [57], [67, S. 1284] und ELSNER und SAUER, [86, S. 61] bekannt:

$\eta_C = 0,9$	Wirkungsgrad des Betonspeichers
$\rho_C = 2.750 \text{ kg/m}^3$	spezifische, volumetrische Dichte

$c_{pC} = 2,836 \cdot 10^{-4} \frac{kWh}{kgK}$ isobare, spezifische Wärmekapazität

$P_C = 300 \frac{\text{€}}{\text{ton}}$ Preis pro Tonne

$\eta_{ges} = 0,7$ Wirkungsgrad der Gesamtinstallation ohne Speicher

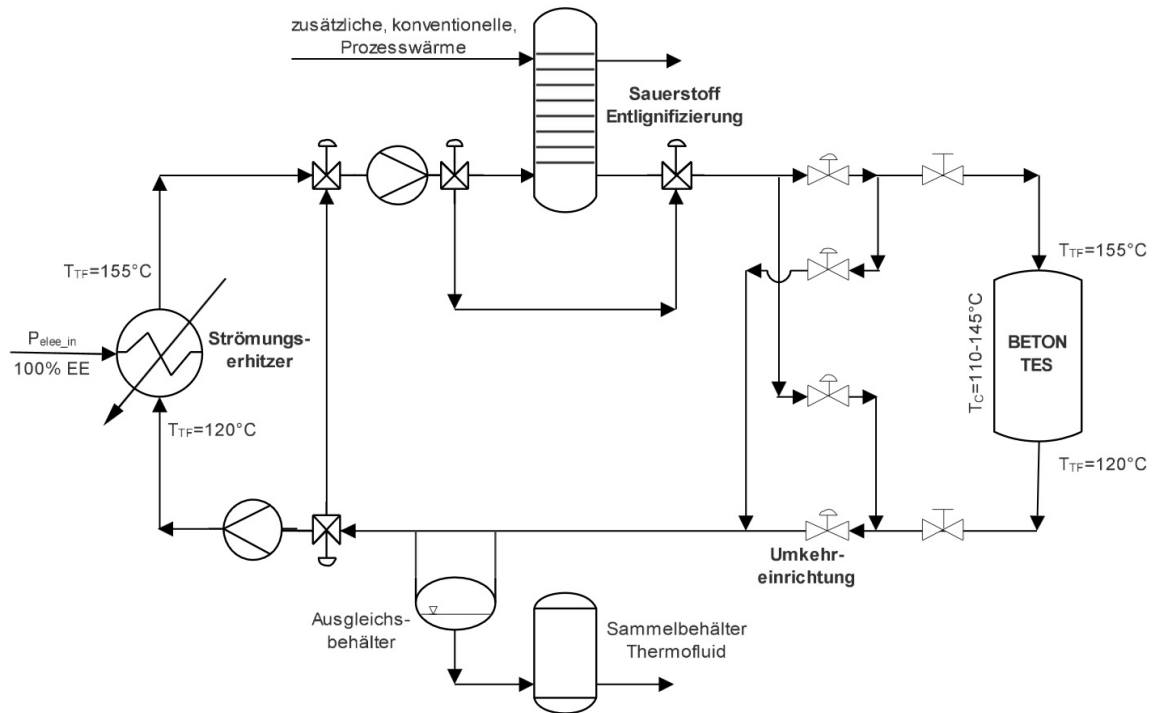


Abbildung 5.2: Fließbild zur Beton-Speicherintegration (eigene Darstellung)

Das ergibt mit den Wirkungsgraden einen Wärmebedarf Q_C von

$$Q_C = \frac{Q_{O30min}}{\eta_C \cdot \eta_{ges}} = 5.167 kWh \quad (5.10)$$

für 30 Minuten Entlignifizierungsbetrieb. Die Temperaturgrenzen für den Speicher, nach Abbildung 5.2, lauten

$T_{iC} = 383,15 K$ Initialtemperatur

$T_{fC} = 418,15 K$ Endtemperatur

und ergeben aus der Formel 3.1 eine erforderliche Speichermasse m_C von

$$m_C = 520,5 \text{ t} \quad (5.11)$$

und einen Gesamtpreis für den Spezialbeton von:

$$C_{Kosten} = P_C \cdot m_C = 156.100 \text{ €}. \quad (5.12)$$

Man erkennt, dass der Betongesamtpreis trotz der großen Masse günstiger ist, als die PCM-Masse. Das zeigt bereits einen der Vorteile des Betonspeichers, nämlich die geringeren Investitionskosten. Zusätzlich ist der Wirkungsgrad höher und der Aufbau weniger komplex.

Hier gibt es wieder ein Referenzprojekt aus der Literatur und es können die Gesamtkosten des Speichers aus den Kosten der Betonmasse nach JIAN ET AL., [55, S. 41] errechnet werden. Dabei machen die Spezialbetonkosten 53,8% der gesamten Speicherkosten, welche aus Tabelle 5.10 entnommen werden können, aus. Die Investitionskosten des Betonspeichers sind mit knapp 295.000 € deutlich geringer als die des PCM-Speichers. Die Summe der jährlichen Betriebskosten ist mit knapp 20.000 € in beiden Fällen ähnlich hoch. Auch hier dienen die Kosten als Ausgangswerte für die folgende Wirtschaftlichkeitsrechnung. Die detaillierte Berechnung kann aus dem Anhang C entnommen werden.

Tabelle 5.10: Kosten für Betonspeicher

Kostenanteil	Kostenstelle	Kosten
0,538	Spezialbeton	156.100
0,052	Isolierung	15.088
0,339	Wärmetauscher	98.360
0,012	Strom (laufend)	3.482
0,059	Pumpe (laufend)	17.119
1	Gesamtkosten Speicher	290.149
	Peripherie (Verrohrung, Manpower...)	25.000
	Installationskosten gesamt	294.548

5.2 Ergänzende Berechnungen

Aus den bisher vorliegenden Ergebnissen können ergänzend weitere Daten für die Speicherinstallation gewonnen werden, wie die Leistung des Wärmetauschers oder die des Durchlauferhitzers. Weiteres kann der Massenstrom des Thermofluids errechnet werden, um das Rohrleitungs- und Pumpensystem angemessen zu dimensionieren. Prinzipiell ist der PCM-, bzw. Betonspeicherintegration ein Thermofluid gegenüber Wasser vorzuziehen, da bei 160°C heißem Wasser bereits ein Dampfdruck von etwa 5 bar vorliegt, was ein teures Drucksystem erfordert. Diese Berechnung ist lediglich eine Ergänzung zur Speicherauslegung und ist aus Gründen der Übersichtlichkeit ausschließlich dem Anhang B zu entnehmen.

5.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Grundsätzliche Investitions- und Betriebskosten für latente und sensible TES für die Entlignifizierung konnten im vorstehenden Kapitel ermittelt werden. Mit diesen Werten kann jedoch die Sinnhaftigkeit der Investition für den Unternehmer nicht festgestellt werden. Im Abschnitt „Grundlagen der Investitionsrechnung“ (Kapitel 4.1.1) wurden verschiedene Methoden zur Investitionsrechnung vorgestellt und bewertet. Um eine Investition monetär zu bewerten und um diese mit anderen Investitionen vergleichbar zu machen, wird die Kapitalwertmethode (nach Formel 4.3) auf Basis der Barwertmethode (nach Formel 4.2) eingesetzt. Bei einem positiven Kapitalwert innerhalb der Laufzeit ist eine Investition als sinnvoll anzusehen. Um eine größere Datenmenge, und somit eine nützliche und übersichtliche Auswertung zu bekommen, wurden die Berechnungen in MS Excel durchgeführt.

Zunächst muss ein geeigneter Zinsfuß i zur Berechnung des Zeitwertes des Geldes festgelegt werden. Der kalkulatorische Zinssatz i entspricht dem Zinssatz, mit welchem das Kapital alternativ zur Investition angelegt werden kann. Dieser ist für jedes Unternehmen und jeden Investor unterschiedlich, und muss in diesem Fall gewählt werden, da kein konkretes Unternehmen vorliegt. Um hinsichtlich des Zinssatzes mehrere Szenarien zu berücksichtigen, werden die Investitionsrechnungen mit zwei verschiedenen Zinssätzen von

$$i_1 = 0,07 \quad \text{Zinssatz 1: 7\%}$$

$$i_2 = 0,12 \quad \text{Zinssatz 1: 12\%}$$

durchgeführt. Es wird sich später in der Berechnung herausstellen, dass der Zinssatz nicht das wesentliche Kriterium für die Rentabilität von TES ist.

Von wesentlicher Bedeutung ist jedoch die Auslastung des Speichers über die Laufzeit. Grundsätzlich ist eine hohe Zyklenzahl anzustreben, um den externen Energiebedarf zu senken. Bei elektrischen Speichern ist eine große Zyklenzahl, aufgrund des Kapazitätsverlustes nicht unbedingt erstrebenswert, bei TES hingegen ist dieser Einflussfaktor vernachlässigbar. Auch beim Parameter Auslastung ist eine pauschale Aussage ohne konkrete Prozessdaten eines bestimmten Unternehmens schwierig. Interne Abwärme fällt zu unterschiedlichen Zeiten und in verschiedener Mengen an. Relevant ist jene Abwärme, die über der aktuellen Speichertemperatur liegt und bei nicht vollständig geladenem Speicher anfällt. Anhand der hier gewählten Auslegungen wären täglich bis zu sechs Zyklen möglich. Für die Investitionsrechnung wird mit einem Zyklus bzw. drei Zyklen pro Tag für 330 Arbeitstage im Jahr gerechnet. Für die Verwendung von EE wird ohnehin nur ein Zyklus täglich für 147 Tage im Jahr analysiert, da die Verfügbarkeit von Stromüberschüssen aus EE derzeit noch gering ist [87]. Man wird im Folgenden erkennen, dass die Auslastung der TES eine große Relevanz für die Investitionsentscheidung hat.

Der Zahlungsstrom Z_t in der Periode t ergibt sich aus der Differenz der Einsparung und der Einzahlung im jeweiligen Jahr. Neben den Speicherbetriebskosten ist der Zahlungsstrom in dieser Analyse lediglich von der Auslastung des Speichers abhängig. Eine bessere Auslastung ergibt eine höhere Einsparung und spiegelt hier rechnerisch die Kosten des Stroms wider, welcher nicht zugekauft werden muss. Um die Ersparnis aus dem verminderten Strombedarf zu berechnen, muss ein Stromeinkaufspreis gewählt werden. Ein exakter Strombezugspreis kann jedoch nicht eruiert werden, da dieser für große Stromabnehmer individuell vereinbart und nicht veröffentlicht wird. Laut dem STATISTIK-PORTAL, [93] liegen die durchschnittlichen Stromkosten für Industriebetriebe in Österreich im Jahr 2017 bei 84 €/MWh. Nach GRAVE ET AL., [41, S. 39] ist anzunehmen, dass für die Papierindustrie ein geringerer Strompreis vorliegt. Der Stromeinkaufspreis inklusive Steuern und Abgaben wird in dieser Arbeit folglich auf 62 €/MWh festgelegt.

Als Energiequelle zum Laden des Speichers dient zum einen die Nutzung von interner Abwärme aus der Stromproduktion in einer integrierten Papierfabrik nach ORR, [77]. Zum Anderen wird, als Vergleich, die Möglichkeit der Nutzung von Produktionsspitzen aus der EE-Erzeugung betrachtet. Die vollständige Rechnung, inklusive Grafiken, befindet sich in Anhang C. 13 Fälle werden nach Tabelle 5.12 berechnet.

Tabelle 5.12: 13 mögliche Szenarien

Fall	TES-Material	Wärmequelle	Zinsfuß	Zyklen pro Jahr	Lebensdauer
1	PCM	interne Abwärme	0,07	3x330	20
2	Beton	interne Abwärme	0,07	3x330	40
3	PCM	interne Abwärme	0,12	3x330	20
4	Beton	interne Abwärme	0,12	3x330	40
5	PCM	interne Abwärme	0,12	1x330	20
6	Beton	interne Abwärme	0,12	1x330	40
7	PCM	EE	0,12	1x147	20
8	Beton	EE	0,12	1x147	40
9	PCM	EE	0,07	1x147	20
10	Beton	EE	0,07	1x147	40
11	Dampf	interne Abwärme	0,07	3x330	40
12	Dampf	interne Abwärme	0,12	3x330	40
13	Dampf	interne Abwärme	0,12	1x330	40

5.3.1 Berechnung Fall 1

Für den ersten Fall, einem PCM-TES mit 20 Jahren Lebensdauer, gelten folgende Angaben:

$$P_{StromMittel} = 62 \frac{\text{€}}{MWh} \quad \text{Strompreis nach [93]}$$

$$Q_{O30min} = 3.255 \text{ kWh} \quad \text{Ersparnis des externen Energiebedarfs pro Zyklus nach Glg. 5.1}$$

$$z_{IAPCM1} = 3 \quad \text{tägliche Zyklenzahl}$$

$$b_{IAPCM} = 330 \quad \text{Betriebstage pro Jahr}$$

$$i_1 = 0,07 \quad \text{interner Zinssatz}$$

Daraus lässt sich die Stromkostensparnis $P_{ZyklusIAPCM}$ pro Zyklus mit

$$P_{ZyklusIAPCM} = Q_{O30min} \cdot P_{StromMittel} = 201,82 \text{ €} \quad (5.13)$$

errechnen. Das ergibt eine jährliche Einsparung der Stromkosten P_{Jahr1} von

$$P_{Jahr1} = P_{ZyklusIAPCM} \cdot z_{IAPCM1} \cdot b_{IAPCM} = 199.800 \text{ €}. \quad (5.14)$$

JAHR	AUSGABEN	EINSPARUNG	CF	PV	NPV
1	443733	0	-443732,56	-443733	-443732,558
2	19407	199800	180393,02	168592	-275140,948
3	19407	199800	180393,02	157562	-117578,695
4	19407	199800	180393,02	147254	29675,7471
5	19407	199800	180393,02	137621	167296,721
6	19407	199800	180393,02	128618	295914,453
7	19407	199800	180393,02	120203	416117,942
8	19407	199800	180393,02	112340	528457,65
9	19407	199800	180393,02	104990	633448,032
10	19407	199800	180393,02	98121,9	731569,884
11	19407	199800	180393,02	91702,7	823272,55
12	19407	199800	180393,02	85703,4	908975,976
13	19407	199800	180393,02	80096,7	989072,636
14	19407	199800	180393,02	74856,7	1063929,33
15	19407	199800	180393,02	69959,5	1133888,85
16	19407	199800	180393,02	65382,7	1199271,58
17	19407	199800	180393,02	61105,4	1260376,94
18	19407	199800	180393,02	57107,8	1317484,75
19	19407	199800	180393,02	53371,8	1370856,54
20	19407	199800	180393,02	49880,2	1420736,71

Abbildung 5.3: Investitionsrechnung Fall 1 (eigene Darstellung)

Damit ergibt sich, als Differenz von Einsparung und Ausgaben, ab der zweiten Periode ein jährlicher Zahlungsstrom von $Z = 180.393 \text{ €}$; der zugehörige Barwert nach Gleichung 4.2 beträgt $BW = 168.592 \text{ €}$. Der Kapitalwert ergibt sich aus der Summe aller Barwerte bis zur aktuellen Periode, minus den Investitionskosten nach Gleichung 4.3 und beträgt hier $C_0 = -275.141 \text{ €}$. Diese Berechnung wiederholt sich für alle Perioden innerhalb der Laufzeit

und ist in Abbildung 5.3 zu sehen, wobei die eben beschriebene Rechnung fett gedruckt dargestellt ist. Eingabewerte aus der MathCAD-Berechnung sind grün und Eingabewerte aus der Berechnung nach Abschnitt 5.1 blau hinterlegt. Ergänzend zeigt das Diagramm 5.4 den NPV über die Laufzeit. Die Berechnungen der Fälle 2-13 sind dem Anhang C zu entnehmen; die Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt übersichtlich erörtert.

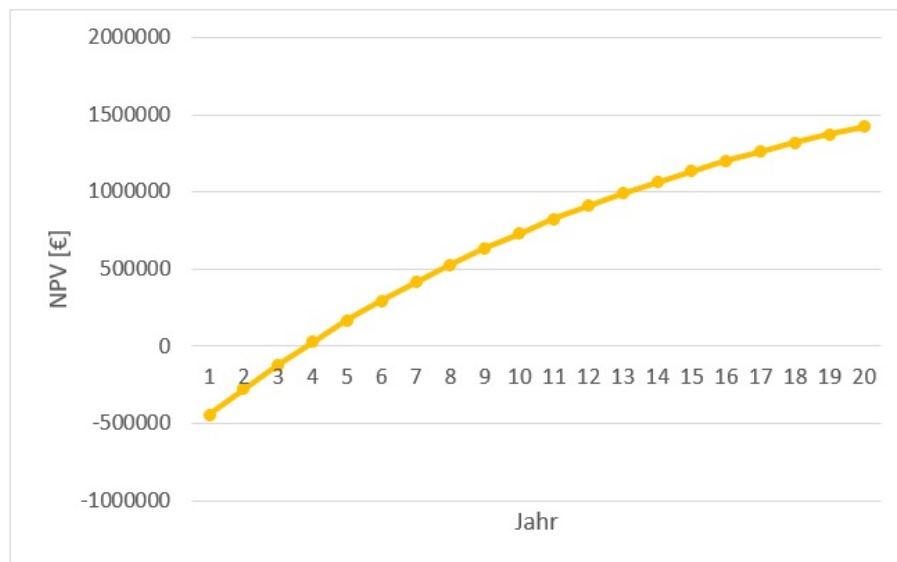


Abbildung 5.4: NPV Fall 1 (eigene Darstellung)

5.3.2 Ergebnistabelle und Zwischenfazit der Fälle 1-13

Die Tabelle 5.14 zeigt, dass die Fälle mit hoher Zyklenzahl, also die ersten vier bzw. elf und zwölf, die besten Ergebnisse bzw. überhaupt positive Ergebnisse erzielen. Den höchsten Kapitalwert von 2.082.520 € liefert ein Betonspeicher mit 40 Jahren Laufzeit und einem Zinssatz von 7%. Auch ein Dampfspeicher mit gleicher Laufzeit und Auslastung liefert mit 1.551.083 € einen guten Erlös. Vergleicht man alle Speicher für eine Laufzeit von 20 Jahren, ist auch hier der Betonspeicher von Vorteil. Der PCM-Speicher liefert im Fall eins einen beachtlichen NPV von 1.420.737 € nach 20 Jahren, jedoch erreicht der Beton-TES in dieser Zeit bereits 1.557.585 € und ist dabei noch nicht am Ende der Lebensdauer. Bei allen Speichern würden geringe Auslastungen zu monetären Verlusten führen und sind ökonomisch nicht sinnvoll. Lediglich im Fall sechs kann mit einem Betonspeicher bei einer Laufzeit von 40 Jahren und geringer Auslastung ein positiver Kapitalwert von 83.803 € erzielt werden.

Tabelle 5.14: Ergebnistabelle

Fall	Break-Even	NPV nach Laufzeitende [€]
1	Jahr 7	1.420.737
2	Jahr 3	2.082.520
3	Jahr 5	885.002
4	Jahr 3	1.179.390
5	Nie	-96.119
6	Jahr 14	83.803
7	Nie	-368.137
8	Nie	-219.951
9	Nie	-337.658
10	Nie	-174.243
11	Jahr 7	1.551.084
12	Jahr 9	631.700
13	Nie	-463.887

Insbesondere der Betrieb mit Strom aus EE ist wegen der geringen umsetzbaren Zyklenzahl aus heutiger Sicht für Unternehmer nicht rentabel.

5.3.3 LCOS

Ergänzend soll hier kontrolliert werden, ob die Ergebnisse der Investitionsrechnung plausibel sind. Die ausführliche Rechnung mit allen zugehörigen Angaben befindet sich im Anhang B. Hier werden lediglich die Ergebnisse diskutiert. Wie im Abschnitt „Levelized Cost of Storage“ (4.2.2) vorgestellt, können die Stromkosten aus Speichern, ähnlich den Stromgestehungskosten, errechnet werden. Mit der dazugehörigen Formel 4.8 ergibt sich für die Stromkosten aus dem Speicher im Fall 1:

$$LCOS_1 = 15,24 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \quad (5.15)$$

In der Investitionsrechnung wurde für den Fall 1 über die Laufzeit ein deutlich positiver Kapitalwert ermittelt, was sich hier widerspiegelt, da der $LCOS_1 = 15,24 \text{ €/MWh}$ deutlich günstiger ist, als der alternativ zugekaufte Strompreis $P_{StromMittel} = 62 \text{ €/MWh}$. Ein deutliches Ergebnis liefert auch der Fall 7, wo wegen des negativen Kapitalwerts von der Investition abzuraten ist, was sich bestätigt durch die

$$LCOS_7 = 107,15 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}, \quad (5.16)$$

welche deutlich höher sind, als der Stromeinkaufspreis. Wenn die Stromkosten des Speichers höher sind als der Stromeinkaufspreis, kann sich die Investition nicht rentieren.

Kapitel 6

Schlussfolgerungen und Ausblick

Schlussfolgerungen: Im Zuge des Branchenscreenings konnte eine umfangreiche Analyse von Energiekennzahlen in sechs verschiedenen Industriezweigen durchgeführt werden. Da sich die Unternehmen mit der Bekanntgabe von internen Prozesskennzahlen sehr zurückhalten, musste eine Literaturrecherche mit einer umfangreichen Datensammlung durchgeführt werden. Basierend auf den entscheidenden Produktionsprozessen und den zugehörigen Kennzahlen wird ein Einblick in mehrere Sektoren der österreichischen Industrie gegeben. Damit wurde eine Grundlage für die Planung von Speicheranwendungen geschaffen.

Der Grundlagenteil enthält weiters eine Darstellung bekannter thermischer Speicher, verknüpft mit Recherchen zum aktuellen Stand der Technik. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die in Entwicklung befindlichen Salz-Graphit-Latentwärmespeicher und die sensiblen Festkörperspeicher gelegt. Bei PCM-Speichern stellte sich heraus, dass die Be- und Entladezeiten, aufgrund geringer Wärmeleitfähigkeiten, ein Hindernis für die industrielle Anwendung sein können. Durch genaue Recherchen der aktuellen Forschungsergebnisse konnte jedoch gezeigt werden, dass mit eingebettetem Graphit, einer Sandwichbauweise und einer großen Wärmeübergangsfläche, im Labormaßstab gute Be- und Entladegradienten erreicht werden.

Mit den gewonnen Erkenntnissen aus Industrie und Speichertechnik wurde die Sauerstoffentlignifizierung aus der Papierindustrie für den Einsatz sensibler und latenter Wärmespeicher gewählt. Eine Speicherauswahl kann nur bei genauer Analyse der Prozesse und Speicher

getroffen werden, da Kennzahlen wie Temperatur, Prozessdauer und Energieinhalt aufeinander abgestimmt sein müssen. Finalisiert wurde der Grundlagenteil mit einem Einblick in die Investitionsrechnung, wobei klar gestellt wurde, dass dynamische Investitionsrechnungen den statischen überlegen sind. Speziell die häufig verwendete Amortisationsmethode gibt dem Investor nur unzureichende Informationen über den Wert einer Kapitalanlage.

Durch die finale Berechnung wird die Anwendbarkeit eines TES in der Papierindustrie gezeigt. Dafür wurde eine Anlageninstallation mittels Flussbild für Beton- und PCM-TES geplant. Für ein aussagekräftiges Endergebnis wurde auch die Integration der kommerziell gut verfügbaren Ruths-Dampfspeicher berechnet. Basierend auf dem Wärmebedarf der Entlignifizierung wurden die Dimensionen der Speicher ermittelt. Bereits die Betriebszeit von 30 Minuten ergibt für alle TES einen Speicherbedarf von knapp 6.000 kWh. Bei der errechneten PCM-Speicherdimension ist mit Investitionskosten von über 440.000 € und mit jährlichen Betriebskosten von fast 20.000 € zu rechnen. Dem stehen jedoch jährliche Stromkosteneinsparungen von 199.800 € gegenüber, wenn interne Abwärme genutzt werden kann. Bei einer guten Auslastung würde diese Investition bereits nach vier Jahren einen Gewinn erwirtschaften. Sensible Betonspeicher, bei gleichen Betriebsbedingungen, können durch geringere Investitionskosten bereits nach drei Jahren und Gefällespeicher nach sieben Jahren einen Gewinn erzielen. Anders ist die Situation, wenn günstiger Strom aus EE zu Spitzenzeiten bezogen wird. Hier ist es kaum möglich, die Investitionskosten über die Laufzeit zurück zu verdienen. Investitionen in TES würden hier zu nennenswerten Verlusten führen. Das liegt daran, dass im Stromnetz bis jetzt nur wenige Stunden und an wenigen Tagen Überschüsse aus EE erzielt werden [87]. Für spätere Berechnungen soll insbesondere auf die reale Auslastung bzw. Zyklenzahl des Speichers geachtet werden, denn diese hat den größten Einfluss auf die Rentabilität.

Ausblick: Es wäre wünschenswert, eine Kooperation mit einem Industriebetrieb eingehen zu können, um tatsächliche Prozessdaten zu erhalten. Mit diesen Vorgaben könnte ein Speicher konkret geplant werden. Außerdem wäre es sinnvoll, die Branchenanalyse auf alle Industriezweige in Österreich auszuweiten. Speziell in der Chemie, Petrochemie und der Eisen- bzw. Stahlerzeugung sind große Potentiale zu erwarten. Ein Hindernis hierfür ist, vor

allem in der Chemie und Petrochemie, die große Produktvielfalt, welche eine zeitintensive Recherche bedingt.

Die erstellte MathCAD-Berechnung stellt ein gutes Grundgerüst für weitere Plausibilitätsrechnungen dar. Mit der Kenntnis der Betriebskennzahlen können weitere Speicher und Prozesse einfach berechnet werden. Die Excel-Berechnung liefert die Wirtschaftlichkeit der Speicher unter verschiedenen Bedingungen. Der Aufbau der Excel-Berechnung ermöglicht schnelle Ergebnisse für weitere Fragestellungen unter beliebigen Betriebsbedingungen.

Manche Temperaturen mussten für die Berechnung aus vorhandener Literatur abgeschätzt werden. Exakte Ergebnisse hätte jedoch nur eine Simulation ergeben, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden konnte. Für die Simulation der Energiespeicher im Prozess würde sich die Software TRNSYS oder MATLAB mit Simulink eignen. Gleichwohl ermöglicht bereits die vorhandene Berechnung eine gute Plausibilitätskontrolle, ohne Erstellung einer umfangreichen Simulation.

Eine zentrale Voraussetzung für die Speicherintegration ist die weitere Forschung und die Weiterentwicklung der TES. Sensible Feststoffspeicher und Dampfspeicher können bereits gut eingesetzt werden, jedoch gibt es bei PCM-Speichern noch Probleme bei der Skalierung auf Industriegröße. In Laborgröße können PCM-Speicher gute Ergebnisse erzielen, jedoch gibt es bei Speichern mit vielen hundert kWh noch Probleme mit der Wärmeübertragung.
[58]

Abbildungsverzeichnis

1.1	Gesamtenergiebilanz nach Sektoren (eigene Darstellung)	4
1.2	Gesamtenergiebilanz nach Branchen (eigene Darstellung)	5
2.1	Wannenofen mit Verlauf von Temperatur und Viskosität (Quelle: [88])	9
2.2	Verfahren zur Formgebung (eigene Darstellung, Datenquelle: [90])	10
2.3	Produktionslinie für Flachglas (eigene Darstellung, Datenquelle: [42])	13
2.4	Produktionslinie für Behälterglas (eigene Darstellung, Datenquelle: [42])	14
2.5	Abhitzeverwertung in der Behälterglasproduktion - Vorderansicht und Draufsicht (Quelle: [106])	15
2.6	Anteile Biersorten (eigene Darstellung, Datenquelle: [21])	18
2.7	Brauvorgang (eigene Darstellung, Datenquelle: [30])	19
2.8	Strombedarfsanteile Brauvorgang (eigene Darstellung, Datenquelle: [85])	21
2.9	Wärmebedarfsanteile beim Brauen (eigene Darstellung, Datenquelle: [85])	22
2.10	Input-Output-Bilanz zur Herstellung von 1 hl Bier (eigene Darstellung, Datenquelle: [59])	24
2.11	Fließbild Bierherstellung (Quelle: [53])	25
2.12	Kochen bei Atmosphärendruck ohne WRG (Quelle: [36])	26
2.13	Kochen bei Niederdruck (150 mb) mit WRG (Quelle: [36])	27

2.14 Flussdiagramm verschiedener Fleischerzeugnisse (eigene Darstellung, Datenquelle: [82])	32
2.15 Energiebedarfsanteile der fleischverarbeitenden Industrie (eigene Darstellung, Datenquelle: [43])	35
2.16 Fließschema für den Schweineschlachthof (eigene Darstellung, Datenquelle: [3])	35
2.17 Wärmerückgewinnung Schlachthof (eigene Darstellung, Datenquelle: [63])	38
2.18 Flussdiagramm verschiedener Molkereierzeugnisse (eigene Darstellung, Datenquelle: [81])	41
2.19 Stromeinsatz in Molkereien (eigene Darstellung, Datenquelle: [37])	47
2.20 Schema Milcherhitzer (eigene Darstellung, Datenquelle: [37])	48
2.21 Buttereie Ablaufschema (eigene Darstellung, Datenquelle: [37])	48
2.22 Wärmerückgewinnung Molkerei (eigene Darstellung, Datenquelle: [63])	50
2.23 Papierherstellung: Halbstoffherzeugung und Stoffaufbereitung (Quelle: [6])	53
2.24 Papierherstellung: Papiermaschine und Veredelung (Quelle: [6])	53
2.25 Aufschlussverfahren (eigene Darstellung)	54
2.26 Temperaturen industrieller Abwärme (Quelle: [60])	58
2.27 Energiebedarf Papierproduktion (Quelle: [28])	61
2.28 Spezifischer Energieverbrauch einer Papiermaschine (Quelle: [28])	63
2.29 Wärmeströme über Trockenpartie und WRG (Quelle: [28])	64
2.30 Standorte der Zementwerke in Österreich (Quelle: [8])	67
2.31 Schema eines Zementwerks (Quelle: [8])	68
2.32 Trockenverfahren mit Kalzinator (Quelle: [14])	69
2.33 Lepolanlage (Quelle: [68])	70

2.34 Einsatz von Roh-, Brenn-, und Zuzahlstoffen bei der Zementherstellung (eigene Darstellung, Datenquelle: [14])	71
2.35 Energiebilanz der österreichischen Zementwerke in GWh (eigene Darstellung, Datenquelle: [8])	72
2.36 Nutzungspotentiale der verwendbaren Abwärme in GWh (eigene Darstellung, Datenquelle: [8])	74
2.37 Nutzbare Abwärme ($>100^{\circ}\text{C}$) in der Zementindustrie (eigene Darstellung, Datenquelle: [8])	74
3.1 Einteilung der Wärmespeicher (eigene Darstellung)	76
3.2 Schematischer Temperaturverlauf von sensiblen und latenten Speichern (eigene Darstellung)	77
3.3 Volumetrische Speicherkapazität sensibler Wärmespeicher (eigene Darstellung, Datenquelle: [46])	79
3.4 Thermische Schichtung im Heißwasserkessel (Quelle: [102])	81
3.5 Zwei-Tank-Konzept Flüssigsalz (Quelle: [109])	82
3.6 Betonspeicher-Layout mit Dimensionierung (Quelle: [109])	83
3.7 HTF Entladetemperatur für ein Zwei-Tank Flüssigsalz-TES (schwarz) und ein Beton-TES (rot) (Quelle: [109])	83
3.8 Schmelzenergie verschiedener PCMs (Quelle: [97])	86
3.9 Aufbau eines PCM-Speichermoduls mit: (a) Tank mit PCM befüllt; (b) Rohrbündel; (c) einzelnes Rohr mit Rippen; (d) Abnehmer (Quelle: [102])	89
3.10 Erstarrungsdauer in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit (Quelle: [15])	91
3.11 Entladeleistung verschiedener PCMs (Quelle: [49])	93
3.12 Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Graphitfolien (eigene Darstellung, Datenquelle: [101])	93

3.13	Abkühlzeit eines PCM (Nitrate) (Quelle: [110])	94
3.14	Aufladepkurven von PCM mit und ohne Rippen (Quelle: [99])	94
3.15	Leistung und Ölstrom für Betonspeicher (Quelle: [67])	95
4.1	Eigenschaften aktueller Energiespeicher (Quelle: [97])	104
4.2	Investitionskosten bekannter Speicher (Quelle: [97])	104
4.3	LCOS und Kostenanteile für Kurzzeitspeicher (Quelle: [61])	108
4.4	Heißströme im Temperatur-Enthalpiestrom-Diagramm (eigene Darstellung) .	110
4.5	Composite-Kurve für die Heißströme (eigene Darstellung)	111
4.6	Darstellung des Pinchpunktes (eigene Darstellung)	112
4.7	Auswertung im Temperatur-Enthalpiestrom-Diagramm (eigene Darstellung)	113
4.8	Kostendiagramm Wärmeüberträger-Netzwerk (Quelle: [66])	114
5.1	Fließbild zur PCM-Speicherintegration (eigene Darstellung)	118
5.2	Fließbild zur Beton-Speicherintegration (eigene Darstellung)	124
5.3	Investitionsrechnung Fall 1 (eigene Darstellung)	129
5.4	NPV Fall 1 (eigene Darstellung)	130

Tabellenverzeichnis

2.1	Phasen bei der Bildung der Glasschmelze (Quelle: [88])	8
2.2	Energiebedarf zum Schmelzen von Kalknatronglas (Quelle: [83])	12
2.3	Temperaturen und Verweilzeiten (Quelle: [53])	20
2.4	Mittlerer spezifischer Wärmebedarf nach Prozessen (Quelle: [59])	22
2.5	Art des Energieeinsatz je Produktionsschritt (Quelle: [85])	23
2.6	Kochen bei Umgebungsdruck, 7,5% Verdampfung (Quelle: [36])	26
2.7	Kochen bei Niederdruck, 4,5% Verdampfung (Quelle: [36])	27
2.8	Fleischproduktion in Österreich (Quelle: [1], [12])	31
2.9	Energieeinsatz Schlachthof (Quelle: [82])	33
2.10	Spezifischer Energiebedarf nach Produkten (Quelle: [54])	34
2.11	Energiebedarfsanteile Strom (Quelle: [54])	36
2.12	Energiebedarfsanteile Wärme (Quelle: [54])	37
2.13	Temperaturen bei der Fleischverarbeitung (Quelle: [54])	38
2.14	Parameter der Käseproduktion (Quelle: [105])	42
2.15	Parameter der Butterproduktion (Quelle: [105])	43
2.16	Parameter der Ultraschallbehandlung (Quelle: [59])	43
2.17	Energiebedarfsanteile Molkerei (Quelle: [81])	45

2.18	Spezifischer Energiebedarf nach Produkten (Quelle: [52])	46
2.19	Spezifischer Energiebedarf nach Prozessen (Quelle: [52])	47
2.20	Spezifischer Strombedarf der Milchverarbeitung (Quelle: [37])	49
2.21	Wasserverbrauch und Abwasser (Quelle: [104])	49
2.22	Kühlung verschiedener Milchprodukte (Quelle: [35])	51
2.23	Abwärmeströme in der Papierindustrie (Quelle: [60])	59
2.24	Brennstoffe Papierproduktion (Quelle: [6])	59
2.25	Einsatzstoffe Papierproduktion (Quelle: [6])	60
2.26	Dampf Papierproduktion (Quelle: [6])	61
2.27	Strom Papierproduktion (Quelle: [6])	62
2.28	Spezifischer Energiebedarf Papierproduktion (Quelle: [98])	63
3.2	Sensible Wärmespeicher (Quelle: [44])	84
3.7	Latentwärmespeicher (Quelle: [44], [46], [71])	90
3.8	Kennzahlen errichteter Latentwärmespeicher (Quelle: [99], [95])	96
4.1	Eigenschaften der Speichertechnologien (Quelle: [97])	106
4.3	Exemplarische Wärmeströme	109
4.4	Exemplarische Kälte- und Wärmeströme	111
5.4	Kosten für PCM-Speicher	120
5.7	Kosten für vier Ruths-Dampfspeicher	123
5.10	Kosten für Betonspeicher	125
5.12	13 mögliche Szenarien	128
5.14	Ergebnistabelle	131

Literaturverzeichnis

- [1] AMA. Marktinformation - Vieh und Fleisch. <https://www.ama.at/Marktinformationen/Vieh-und-Fleisch/Produktion>, 2017. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [2] AMA. Marktinformationen der AMA-Marktforschung. <https://amainfo.at/ueber-uns/marktinformationen/>, 2017. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [3] Omid Ashrafi, Serge Bédard, Bahador Bakhtiari, und Bruno Poulin. Heat recovery and heat pumping opportunities in a slaughterhouse. *Energy*, 89:1–13, 2015.
- [4] Statistik Austria. Energiebilanzen. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [5] Vetropack Austria. Nachhaltigkeit - Ökologie. <http://www.vetropack.at/de/nachhaltigkeit/oekologie/>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [6] Austropapier. Branchenbericht der österreichischen Papierindustrie. <https://www.austropapier.at/mediacenter/downloads/>, 2016. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [7] Hans Dieter Baehr und Karl Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer Berlin Heidelberg, 2016. DOI: 10.1007/978-3-662-49677-0.
- [8] Berger Helmut und Hoenig Volker. Energieeffizienz der österreichischen Zementindustrie. Ohne Jahresangabe.

- [9] Hendrik Biebeler. IW-Umweltexpertenpanel 2011 Umwelt-und Energiepolitik im Meinungsbild der Wirtschaft. *Institut der deutschen Wirtschaft Köln*, 2012.
- [10] Jürgen Blechschmidt. *Taschenbuch der Papiertechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2013.
- [11] BMDW. Energiestrategie Österreich 2020. <https://www.bmdw.gv.at/EnergieUndBergbau/EnergiestrategieUndEnergiepolitik/Seiten/Energiestrategie.aspx>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [12] BMLFUW. Geflügelhaltung in Österreich. <https://www.bmlfuw.gv.at/land/produktion-maerkte/tierische-produktion/gefluegel-eier/gefluegl.html>, 2017. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [13] Brauherr.de. maischen | besser bier brauen. <http://www.besser-bier-brauen.de/selber-bier-brauen/brauanleitungen/detailwissen/maischen/index.html>, 2010. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [14] Heinz Braun. Sekundärbrennstoffeinsatz in der Zementindustrie-vom Altreifen bis zum Tiermehl. *XVII. Gesteinshüttencolloquium, Leoben*, 2001.
- [15] Jochen Buschle, Wolf-Dieter Steinmann, und Rainer Tammé. Latent heat storage for process heat applications. In *The Tenth International Conference on Thermal Energy Storage, Atlantic City, New Jersey*, 2006.
- [16] Ricki Carroll und Phyllis Hobson. *Making Cheese, Butter & Yogurt*.. Storey Publishing, LLC, North Adams, MA, 2003.
- [17] Justin NingWei Chiu. *Heat transfer aspects of using phase change material in thermal energy storage applications*. Industrial Engineering and Management, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2011. OCLC: 938862085.
- [18] CONTROLLING-Portal.de. Interne Zinsfuß-Methode - dynamische Investitionsrechnungsverfahren (Erläuterung am Beispiel). <https://www.controllingportal.de/Fachinfo/Investitionsrechnung/Interne-Zinsfuss-Methode.html>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.

- [19] James Riley Couper. *Process Engineering Economics*. CRC Press, 1 edition edition, 2003.
- [20] Industrial Efficiency Technology Database. Glass | Industrial Efficiency Technology & Measures. <http://ietd.iipnetwork.org/content/glass>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [21] Verband der Brauereien Österreichs. Jahresbericht 06/2016 - 06/2017. <https://bierland-oesterreich.at/brauer-markt/jahresberichte/send/6-jahresberichte/395-jahresbericht-2017.html>, 2017. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [22] Welt der BWL. Amortisationsrechnung: Amortisationszeit in Jahren berechnen (Beispiel, Formel) | Investition. <http://www.welt-der-bwl.de/Amortisationsrechnung>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [23] Welt der BWL. Annuitätenmethode | Investition. <http://www.welt-der-bwl.de/Annuitätenmethode>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [24] Welt der BWL. Barwertberechnung: Barwert berechnen, Definition und Beispiel | Investition. <http://www.welt-der-bwl.de/Barwert>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [25] Welt der BWL. Interne Zinsfußmethode / Interner Zinsfuß: Beispiel, Formel und Berechnung | Investition. <http://www.welt-der-bwl.de/Interne-Zinsfuß\T1\ssmethode>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [26] Welt der BWL. Kapitalwert und Kapitalwertmethode Beispiel - Net Present Value (NPV) | Investition. <http://www.welt-der-bwl.de/Kapitalwertmethode>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [27] Spektrum der Wissenschaft. Glasfaserstoffe - Lexikon der Chemie. <http://www.spektrum.de/lexikon/chemie/glasfaserstoffe/3724>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [28] Jung Dipl.-Ing. Holger und Kappen Dr.-Ing. Johannes. Effiziente Energienutzung in der Papierindustrie, 2013.

- [29] Christian Doetsch und Anna Greve. Fraunhofer UMSICHT - Metastudie - Energiespeicher. *Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Oberhausen*, 2014.
- [30] Privatbrauerei Eichbaum. Brauvorgang. <http://www.de.eichbaum.com/Unternehmen-Portratit-Brauvorgang.html>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [31] Sappi Fine Paper Europe. Die Herstellung von Papier. Vom Holz zum gestrichenen Papier. <http://docplayer.org/1853991-Papierherstellung-sca-publication-papers-technischer-kundendienst.html>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [32] Eurostat. Milk and milk product statistics. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Milk_and_milk_product_statistics. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [33] VGB PowerTech e.V. Levelised Cost of Electricity - Issue 2015. <https://www.vgb.org/lcoe2015.html?dfid=74042>, 2015. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [34] Technik Fibel. Herstellungsverfahren: Das Floatglasverfahren. <http://www.technik-fibel.de/?p=432>, 2017. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [35] Jürgen Fluch. Sorptionskühlung in einer Molkerei - Fallstudie, 2013.
- [36] Udo Funk, Ludwig Scheller, und Rudolf Michel. Efficient Use of Energy in the Brewhouse, 2008.
- [37] Bayrisches Landesamt für Umweltschutz. Minderung öko- und klimaschädigender Abgase aus industriellen Anlagen durch rationelle Energienutzung - Milchverarbeitender Betrieb, 2000.
- [38] Albert Schweitzer Stiftung für unsere Mitwelt et al. Schlachthof transparent: Schlachtprozess. <http://www.schlachthof-transparent.org/pages/schlachtprozess.php>, 2006. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [39] Daniel Fürstenwerth und Lars Waldmann. Stromspeicher in der Energiewende - Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz, 2014.

- [40] Bernd Glück. Gefälle-Dampfspeicher. <http://berndglueck.de/Waermespeicher>, 2012. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [41] Katharina Grave, Mandana Hazrat, Sil Boeve, Felix Blücher, Charles Bourgault, und Nikolas Bader. Stromkosten der energieintensiven Industrie. Ein internationaler Vergleich. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2015/Industriestrompreise_Abschlussbericht.pdf. Zuletzt abgerufen am 26.10.2018.
- [42] Michael Greenman, Philip Ross, und Jim Shell. Energy and environmental profile of the US glass industry. Technical report, Energetics, Inc., Columbia, MD (United States), 2002.
- [43] Australian Industry Group. Saving energy in abattoirs and meat processing facilities. http://cdn.aigroup.com.au/Environment/24_Meat_Processing_Abattoir_Energy_Reduction_Factsheet.pdf, 2010. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [44] Markus Haider. Thermische Speicherung auf Basis sensibler und latenter Wärme, 2012.
- [45] Markus Haider und Andreas Werner. Roadmap Industrie. *Klimafonds*, 2014.
- [46] Andreas Hauer, Stefan Hiebler, und Manfred Reuß. *Wärmespeicher*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 5., vollst. überarb. Aufl. edition, 2013.
- [47] Andreas Hauer, Michael Specht, und Michael Sterner. Energiespeicher - Steigerung der Energieeffizienz und Integration erneuerbarer Energien. pages 110–114, 2010.
- [48] Stephan Haufe. Umweltbundesamt: Glas- und Mineralfaserindustrie. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebereiche/mineralindustrie/glas-mineralfaserindustrie>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [49] Andreas Heinz und Wolfgang Streicher. Application of phase change materials and PCM-slurries for thermal energy storage. In *Proceedings of the ECOSTOC Conference, Session 12B Transportation of Energy, New Jersey*, 2006.

- [50] Gerold Hensler und Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, editors. *Klima schützen - Kosten senken: Leitfaden für effiziente Energienutzung in Industrie und Gewerbe*. Augsburg, 2004. OCLC: 180008256.
- [51] Simon Hirzel, Benjamin Sontag, und Dr.-Ing. Clemens Rohde. Fraunhofer ISI: Industrielle Abwärmenutzung, 2013.
- [52] AEE Intec. Information about milk products - efficiency finder. http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Information_about_milk_products. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [53] AEE Intec. Information about beer - Efficiency Finder. http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Information_about_beer, 2013. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [54] AEE Intec. Information about meat production - Efficiency Finder. http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Information_about_meat_production, 2013. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [55] Yongfang Jian, Quentin Falcoz, Pierre Neveu, Fengwu Bai, Yan Wang, und Zhifeng Wang. Design and optimization of solid thermal energy storage modules for solar thermal power plant applications. *Applied Energy*, 139:30–42, 2015.
- [56] Költringer Johann und Richarts Erhard. *Milchwirtschaft in Österreich - branchenübersicht*, 2014.
- [57] Emerson John, Micah Hale, und Panneer Selvam. Concrete as a thermal energy storage medium for thermocline solar energy storage systems. *Solar Energy*, 96:194–204, 2013.
- [58] Maïke Johnson, Thomas Grünberger, und Martin Haas. DLR - PROSPERPlus - Weiterentwicklung und anwendungsnahe Erprobung der Prosper Latentwärmespeicher-Technologie in der Baustoffproduktion, 2011.
- [59] JRC. Integrated Pollution Prevention and Control Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Food, Drink and Milk Industry. 2006.

- [60] Holger Jung und Achim Hutter. Energierückgewinnung in der Papierindustrie, 2010.
- [61] Verena Jülch. Comparison of electricity storage options using levelized cost of storage (LCOS) method. *Applied Energy*, 183:1594–1606, 2016.
- [62] Berlin Karsten. Dampf und Kondensat für Papiermaschinen. <http://www.dampfundkondensat.de/papiermaschine-trocknung-papier.html>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [63] Jiri Klemes, Robin Smith, und Jin-Kuk Kim. *Handbook of Water and Energy Management in Food Processing*. Woodhead Publishing Series in, Boca Raton, Fla., new edition, 2008.
- [64] Jiri J. Klemes. *Handbook of Process Integration*. Elsevier Science & Technology, Oxford ; Philadelphia, 2013.
- [65] Treppe Konrad, Zelm Roland, Schinke Lars, und Kuitunen Stefan. Abschlussbericht: Energetische Optimierung der Trockenpartie. 2012.
- [66] Pierre Krummenacher und Florian Brunner. Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode. 2015.
- [67] Doerte Laing, Wolf-Dieter Steinmann, Rainer Tamme, und Christoph Richter. Solid media thermal storage for parabolic trough power plants. *Solar Energy*, 80(10):1283–1289, 2006.
- [68] K.-R. Bräutigam M. Achternbosch. Herstellung von Zementklinker Verfahrensbeschreibung und Analysen zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen. 2000.
- [69] N.A. Madloul, R. Saidur, N.A. Rahim, M.R. Islam, und M.S. Hossian. An exergy analysis for cement industries: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1):921–932, 2012.
- [70] Linnhoff March. Introduction to pinch technology. *Targeting House, Gadbrook Park, Northwich, Cheshire, England*, 1998.
- [71] Heiner Marx. Wärmespeicher auf Salzbasis, 2010.

- [72] Gerd Mauschwitz. Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie-Berichtsjahr 2015. *Wien: Technische Universität Wien*, 2016.
- [73] Florian Mayr und Hannes Beushausen. How to determine meaningful, comparable costs of energy storage. <https://www.apricum-group.com/how-to-determine-meaningful-comparable-costs-of-energy-storage/>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [74] Megawatsoft. Dampf Tabellen Rechner. <https://www.steamtablesonline.com/steam97web.aspx?lang=de>. Zuletzt abgerufen am 26.10.2018.
- [75] Stefan Moidl und Johannes Wahlmüller. Global 2000 - Klima Hintergrundpapier: Österreichs Unternehmen im Emissionshandel, 2012.
- [76] Dagmar Oertel. Energiespeicher, Stand und Perspektiven. *Sachstandsbericht zum Monitoring, Nachhaltige Energieversorgung, Arbeitsbericht*, (123), 2008.
- [77] Alex Orr. Energy generation and use in the kraft pulp industry. Ohne Jahresangabe.
- [78] Rajendra K. Pachauri, Myles R. Allen, Vicente R. Barros, John Broome, Wolfgang Cramer, Renate Christ, John A. Church, Leon Clarke, Qin Dahe, und Purnamita Dasgupta. *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, 2014.
- [79] SCA Publication Papers. Papierherstellung. <https://www.sca.com/globalassets/papper/media/brochyre/papermaking-ger>, 2010. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [80] Pulp paper mill. Oxygen delignification process. <http://www.pulppapermill.com/oxygen-delignification-process>. Zuletzt abgerufen am 16.03.2018.
- [81] C Ramirez, M Patel, und K Blok. From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry. *Energy*, 31(12):1984–2004, 2006.

- [82] C Ramirez, M Patel, und K Blok. How much energy to process one pound of meat? A comparison of energy use and specific energy consumption in the meat industry of four European countries. *Energy*, 31(12):2047–2063, 2006.
- [83] Rainer Remus, M. A. Aguado Monsonet, Serge Roudier, und L. Delgado Sancho. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production*, 2013.
- [84] Paul Rundel und Benedikt Meyer. Fraunhofer UMSICHT - Speicher für die Energiewende, 2013.
- [85] Peter Sattler. Energiekennzahlen und Sparpotentiale für Brauereien, WKO. http://www.win.steiermark.at/cms/dokumente/11263981_52485923/5311a767/Energiekennzahlen%20und%20Sparpotenziale%20in%20Brauereien.pdf, 2000. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [86] Dirk Uwe Sauer und Peter Elsner. Energiespeicher - Technologiesteckbrief zur Analyse - Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050, 2015.
- [87] Herbert Saurugg. Negativstrompreistage | Vernetzung & Komplexität. <http://www.herbert.saurugg.net/strom-blackout/risiko-eines-strom-blackouts/negativstrompreistage>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [88] Ilse Schindler und Christoph Ronner. *Stand der Technik bei der Glasherstellung - Umweltbundesamt*. Number 152 in Reports / Umweltbundesamt. Umweltbundesamt, Wien, 1999. OCLC: 75988515.
- [89] Volker Schwarzmeier. IHK: Energieeffizienz in produzierenden Unternehmen - Hemmnisse, Erfolgsfaktoren, Instrumente, 2007.
- [90] Siebdruck-Partner. Verfahren zur Glasherstellung. <http://www.siebdruck-partner.de/werkstoff/glas-keramik/werkstoff-glas/glasherstellung.html>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [91] SIEMENS. Wasserdampf tafel, 1998.

- [92] statista / Das Statistik-Portal. Glasproduktion in der EU nach Glastype 2016 | Statistik. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/609935/umfrage/glasproduktion-in-der-eu-nach-glastype/>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [93] Das Statistik-Portal. Strompreis für die Industrie 2017. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/287849/umfrage/strompreise-fuer-industrielle-verbraucher-in-oesterreich/>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [94] Hans Steger, Erhard Glauning, und Johann Sieghart. *Technische Mechanik 3: Thermodynamik, Festigkeitslehre, Mechanische Schwingungen*. Verlag Hölder-Pichler-Tempsky, 5 edition, 2003.
- [95] Wolf-Dieter Steinmann. Shortstore - Short term heat or cold storage in industry. http://www.cornet-shortstore.eu/wp-content/uploads/2017/08/ReportOnThermalStorageTechnologyForIndustrialApplication_D2_1.pdf. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [96] Horst Steinmüller. Roadmap Industrie: Zellstoff und Papier, 2014.
- [97] Michael Sterner und Ingo Stadler. *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-37380-0.
- [98] Michael Suhr, Gabriele Klein, Ioanna Kourti, Miguel Rodrigo Gonzalo, Germán Giner Santonja, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho, und Institute for Prospective Technological Studies. *Best Available Techniques (BAT) reference document for the production of pulp, paper and board*. Publications Office, Luxembourg, 2015. OCLC: 930993772.
- [99] Rainer Tamme. Storage Technology for Process Heat Applications, 2007.
- [100] Rainer Tamme. Thermische Energiespeicher Potential, Anwendungen und Technik. 2011.

- [101] Rainer Tamme, Thomas Bauer, Jochen Buschle, Doerte Laing, Hans Müller-Steinhagen, und Wolf-Dieter Steinmann. Latent heat storage above 120°C for applications in the industrial process heat sector and solar power generation. *International Journal of Energy Research*, 32(3):264–271, 2008.
- [102] Rainer Tamme, Thomas Bauer, und Erich Hahne. Heat Storage Media. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2009. DOI: 10.1002/14356007.a12_b30.pub2.
- [103] Felix Teufel. *Speicherbedarf und dessen Auswirkungen auf die Energiewirtschaft bei Umsetzung der politischen Ziele zur Energiewende*. KIT Scientific Publishing, 2015.
- [104] Umweltbundesamt Für Mensch und Umwelt. Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken in der Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie. *dt. Übersetzung durch das Umweltbundesamt*, 2005. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [105] University of Guelph - Food Science Department. Cheese Making Technology eBook | Food Science. <https://www.uoguelph.ca/foodscience/book-page/cheese-making-technology-ebook>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [106] Verallia. Glasproduktion. <http://de.verallia.com/faszination-glas/glasproduktion>, 2010. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [107] VÖZ. Zementerzeugung. <http://www.zement.at/zement/zement/zementerzeugung>. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [108] WKO. Aktuelles zur Energieeffizienz für Unternehmen. https://www.wko.at/service/umwelt-energie/Effizienter_Energieeinsatz_im_Unternehmen.html. Zuletzt abgerufen am 04.07.2018.
- [109] Fritz Zaversky, Javier Pérez de Zabalza Asiain, und Marcelino Sánchez. Transient response simulation of a passive sensible heat storage system and the comparison to a conventional active indirect two-tank unit. *Energy*, 139:782–797, 2017.
- [110] Huili Zhang, Jan Baeyens, Gustavo Cáceres, Jan Degève, und Yongqin Lv. Thermal

energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science*, 53:1–40, 2014.

Anhang A

Anhänge für Kapitel 1 und 2

Auf den folgenden Seiten befinden sich weitere Abbildungen und Tabellen für die Kapitel 1 und 2, die im Hauptteil, aus Übersichtsgründen, nicht angeführt wurden.

Die Abbildung 12 zeigt die Abhängigkeit des verdampften Wasser zum eingesetzten Dampf nach [65] (Seite 21).

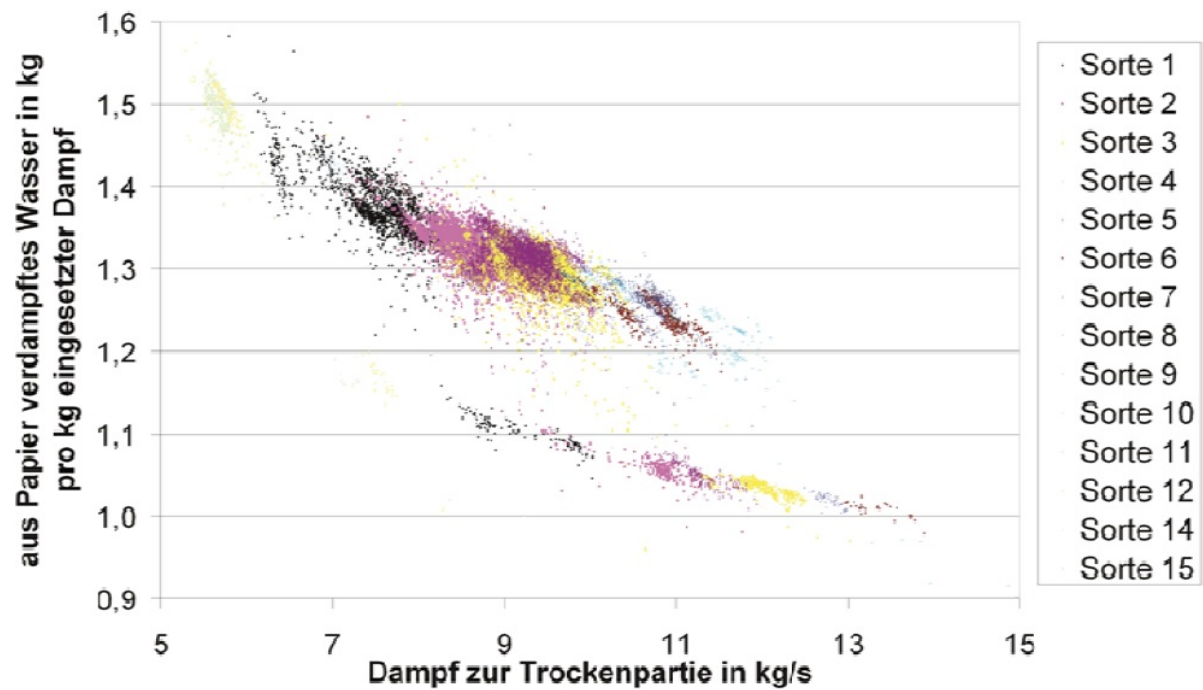


Abbildung 12: Effizienz des in den Trockenzylindern eingesetzten Dampfes abhängig von der Dampfmenge, sortenspezifische Darstellung

Auswertung der Energiebilanz. Eigene Berechnung.

in Terajoule (10^{12} Joule)			
Sektoraler Energetischer Endverbrauch			
		Mittel aus 2011-2016	
		Gesamtenergieverbrauch	Sektoraler Anteil des Gesamt EV im produzierenden Bereich
Produzierender Bereich	Papier und Druck	68 756	21,54
	Chemie und Petrochemie	42 160	13,21
	Steine und Erden, Glas	37 189	11,65
	Eisen- und Stahlerzeugung	35 948	11,26
	Holzverarbeitung	27 533	8,62
	Maschinenbau	26 565	8,32
	Nahrungs- und Genußmittel, Tabak	26 292	8,22
	Bau	20 839	6,53
	Sonst. Produzierender Bereich	9 887	3,10
	Nicht Eisen Metalle	8 585	2,69
	Bergbau	6 429	2,02
	Fahrzeugbau	5 410	1,70
	Textil und Leder	3 456	1,08
Verkehr		368 784	33,88
Produzierender Bereich		319 049	29,31
Private Haushalte		256 486	23,55
Öffentliche und Private Dienstleistungen		121 309	11,15
Landwirtschaft		22 939	2,11
Energetischer Endverbrauch / Anteil Strom		1 088 568	
QUELLE STATISTIK AUSTRIA			

Anhang B

Anhänge für Kapitel 5, Teil 1

Auf den folgenden Seiten befinden sich weitere Abbildungen und Tabellen für Kapitel 5, die im Hauptteil aus Übersichtsgründen nicht angeführt wurden. Es wird die vollständige Rechnung aus MathCAD dargestellt.

INDIZES

1h	1 Stunde
30min	30 Minuten
adt	air dry ton
C	bezogen auf den Betonspeicher (concrete)
D	Dampf aus der Abwärmequelle
dot	Einheit pro Zeit; hier: thermische Leistung, Massenfluss
IA	interne Abwärme
EE	Strom extern, aus Erneuerbaren Energien
elee_in	Strompreis für Ladung
f	final
i	initial
O	Oxygen Delignification
PCM	bezogen auf den PCM-Speicher (phase change material)
R	Ruths
SP	Schmelzpunkt
TF	Thermofluid
V	volumetrisch
WT	Wärmetauscher
zu	zugeführt
1	Wirtschaftlichkeitsrechnung 1
2	usw
.	
10	Wirtschaftlichkeitsrechnung 10

MathCAD-spezifische EINHEITEN

€	Geldeinheit (Euro)
<i>hr</i>	Stunde
<i>L</i>	Volumen für 1 dm ³ (Liter)

Inhaltsverzeichnis:

Angabenteil	2-6
technische Speicherauslegung	7-11
Einsparung PCM-Speicher	12-13
Einsparung Ruths-Speicher	13
Einsparung C-Speicher	14-15
LCOS	16-17

Auslegung eines PCM-Speicher und eines Beton-TES für eine Sauerstoffentlignifizierung in der Papierherstellung

ANGABENTEIL

Vorstellung von 2 möglichen Energie-Quellen:

1: Dampf, ungenutzt bei großem Strombedarf:

$$T_{Dzu} := 436.15 \text{ K} \quad (t_{zu}=163^{\circ}\text{C}) \quad p_D := 4 \text{ bar}$$

$$m_{\dot{D}zu} := 295.97 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad m_{D1h} := m_{\dot{D}zu} \cdot \text{hr} = (2.96 \cdot 10^5) \text{ kg}$$

$$c_{p_D} := 2.2 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

http://www.peacesoftware.de/einigewerte/wasser_dampf_e.html

$$T_{fD} := 423.15 \text{ K} \quad t_{ab}=150^{\circ}\text{C}$$

2: günstiger Strom bei Überproduktion aus EE:

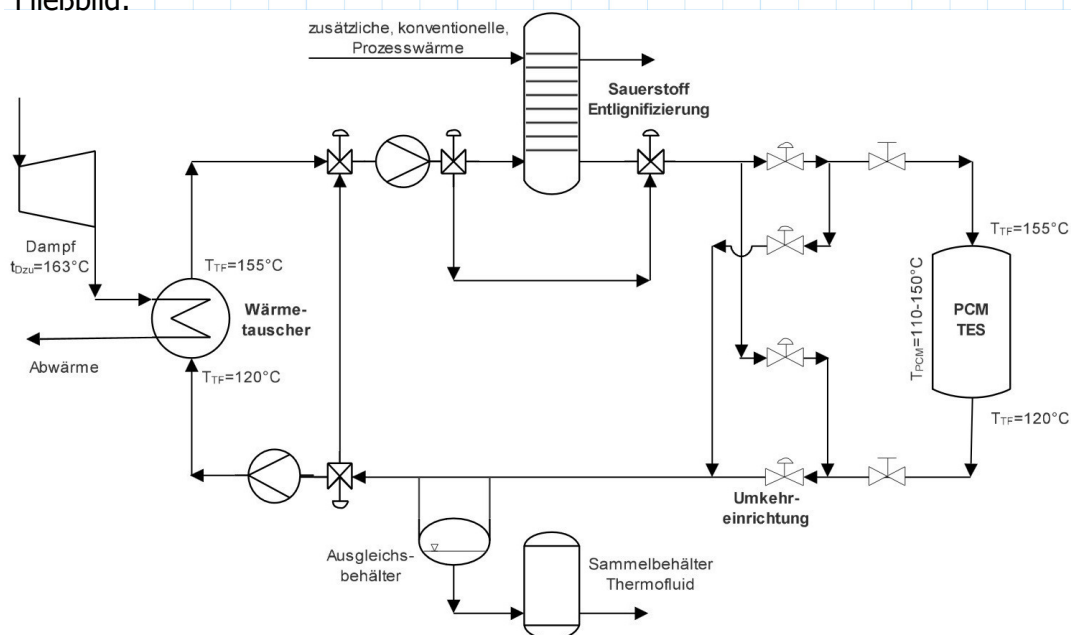
Unbegrenzt für 147 Stunden im Jahr 2017 zu 0€/MWh oder Negativstrompreise

nach SAURUGG, [87]

Vorstellung von 3 möglichen TES:

1: PCM-Sandwich, NaNO₂-NaNO₃-KNO₃ mit Graphit

Fließbild:



$t_{SP_PCM} := 145^\circ \text{ C}$	Schmelztemperatur	
$\rho_{PCM} := 1900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte	
$c_{p_V_PCM} := 1 \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$	volumenbezogene, spezifische Wärmekapazität	
$c_{p_PCM} := \left(\frac{c_{p_V_PCM}}{\rho_{PCM}} \right) = (5.263 \cdot 10^{-4}) \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	massenbezogene, spezifische Wärmekapazität	
$h_{PCM} := 0.04861 \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{kg}}$	Schmelzenthalpie	
$a_m := 1$	Anteil geschmolzen; die PCM-Masse soll vollständig aufschmelzen	
$d_{entladen_PCM} := 30 \text{ min}$	nach ZHANG, [110] etwa 1750s	
$d_{laden_PCM} := 3 \text{ hr}$	etwa 3h	ergibt eine Zyklusdauer von 3,5h
$\eta_{PCM} := 0.8$		
$t_{i_PCM} := 110^\circ \text{ C}$	Speichermindesttemperatur	je nach Standzeit, Abkühlung: Selbstentladung im Monat 40-70% nach SAUER [86]
$t_{f_PCM} := 150^\circ \text{ C}$	Speicherhöchsttemperatur	
$T_{SP_PCM} := 418.15 \text{ K}$	$T_{i_PCM} := 383.15 \text{ K}$	$T_{f_PCM} := 423.15 \text{ K}$
$P_{PCM} := 2000 \frac{\text{€}}{\text{tonne}}$	PCM-Kosten pro Tonne	
$\Delta T_{TF_PCM} := 40 \text{ K}$		

2: Ruths-Dampfspeicher

$\eta_R := 0.9$		
$d_{entladen_R} := 0.5 \text{ hr}$		
$d_{laden_R} := 3 \text{ hr}$	etwa 3h	ergibt eine Zyklusdauer von 3,5 h
$T_{R_Start} := 143.6^\circ \text{ C}$	Speicherstarttemperatur, 4bar	
$T_{R_Ende} := 120.2^\circ \text{ C}$	Speicherendtemperatur, 2bar	Sättigungszustand
$p_{R_Start} := 4 \text{ bar}$	$p_{R_Ende} := 2 \text{ bar}$	

$$P_{R_Wasser} := 4 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \quad \text{Wasser-Kosten pro Tonne}$$

$$P_{R_Stahl} := 6000 \frac{\text{m}^3}{\text{tonne}} \quad \text{Stahl-Kosten pro Tonne}$$

$$\beta := 0.9 \quad \text{Füllgrad, gewählt}$$

$$v'_{Start} := 0.001082 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad 143,6^\circ, 4\text{bar} \quad \text{spezifisches Volumen Wasser}$$

$$h'_{Start} := 0.168 \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{kg}} \quad 143,6^\circ, 4\text{bar}, 605 \text{ kJ/kg} \quad \text{spezifische Enthalpie Wasser}$$

$$h'_{Ende} := 0.14 \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{kg}} \quad 120,2^\circ, 2\text{bar}, 505 \text{ kJ/kg} \quad \text{spezifische Enthalpie Wasser}$$

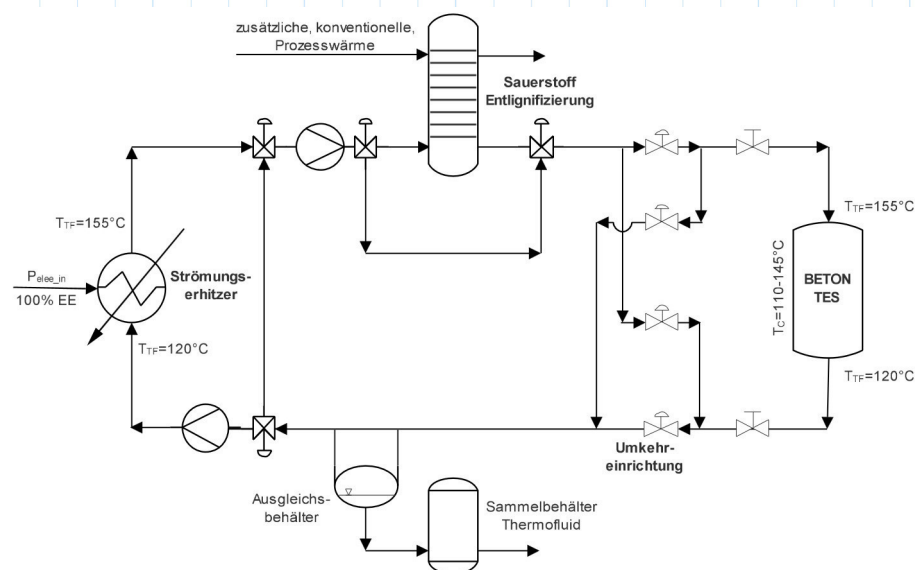
$$h''_{Start} := 0.761 \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{kg}} \quad 143,6^\circ, 4\text{bar}, 2738 \text{ kJ/kg} \quad \text{spezifische Enthalpie Dampf}$$

$$h''_{Ende} := 0.752 \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{kg}} \quad 120,2^\circ, 2\text{bar}, 2706 \text{ kJ/kg} \quad \text{spezifische Enthalpie Dampf}$$

$$\Delta h := 0.601 \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{kg}} \quad 2163 \text{ kJ/kg} \quad \text{mittlere Kondensationsenthalpie}$$

3: Spezialbetonspeicher

Fließbild:



$$\rho_C := 2750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_{p_V_C} := 0.78 \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$$

$$c_{p_C} := \left(\frac{c_{p_V_C}}{\rho_C} \right) = (2.836 \cdot 10^{-4}) \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\eta_C := 0.9$$

$$d_{\text{entladen}_C} := 1 \text{ hr} \quad \text{nach LAING, [67] etwa 1h}$$

$$d_{\text{laden}_C} := 3 \text{ hr} \quad \text{etwa 3h} \quad \text{ergibt eine Zyklusdauer von 4h}$$

$$t_{i_C} := 110^\circ \text{ C} \quad \text{Speichermindesttemperatur} \quad \text{je nach Standzeit, Abkühlung: Selbstentladung im Monat 40-70\% nach SAUER, [86]}$$

$$t_{f_C} := 145^\circ \text{ C} \quad \text{Speicherhöchsttemperatur}$$

$$T_{i_C} := 383.15 \text{ K} \quad T_{f_C} := 418.15 \text{ K}$$

$$P_C := 300 \frac{\text{€}}{\text{tonne}} \quad \text{Beton-Kosten pro Tonne}$$

$$\Delta T_{TF_C} := 40 \text{ K}$$

Vorstellung eines Abnehmers:

1: Oxygen Delignification

$$d_O := 1 \text{ hr} \quad d=50-60\text{min} \quad \text{Prozessdauer}$$

$$t_O := 100^\circ \text{ C} \quad t=80-120^\circ \text{ C} \quad \text{Betriebstemperatur}$$

$$q_O := 0.45 \cdot 10^9 \frac{\text{J}}{\text{tonne}} = 125 \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{tonne}} \quad q=0,4-0,5 \text{ GJ/adt}$$

$$m_{\text{dot}_O} := 1250 \frac{\text{tonne}}{\text{day}} = 52.083 \frac{\text{tonne}}{\text{hr}} \quad \text{Massenstrom}$$

gewählt: Der Prozess soll für 30min vom Speicher betrieben werden können (etwa 30min, um realistische Speichergrößen zu erzielen)

Eigenschaften des Thermofluid zur Wärmeübertragung:

$$c_{p_TF_PCM} := 2.5 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = (6.944 \cdot 10^{-4}) \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

[http://www.huber-online.com/
download/brochures/
Huber_Thermo fluids_DE-EN.pdf](http://www.huber-online.com/download/brochures/Huber_Thermo fluids_DE-EN.pdf)

$$c_{p_TF_C} := c_{p_TF_PCM} = (6.944 \cdot 10^{-4}) \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

TF gewählt: DW-Therm

Andere:

$$\eta_{ges} := 0.7$$

Gesamtwirkungstrad der Installation exkl Speicher
(Wärmetauscher, Wärmeverluste, ...)

BERECHNUNGSTEIL

Eingangsberechnungen

Verfügbare Energie aus der Energiequelle 1. Dampf:

$$Q_D := m_{D1h} \cdot c_{p_D} \cdot (T_{Dzu} - T_{fD}) = (2.351 \cdot 10^3) \text{ kW} \cdot \text{hr}$$
 zugeführte Energie pro Stunde

Verfügbare Energie aus der Energiequelle 2. EE:

Unbegrenzt, für 147h im Jahr 2017, zu 0€/MWh oder nach SAURUGG, [87]
Negativstrompreisen

Erforderliche Wärmeenergie, um den Energiebedarf der Entlignifizierung für 30min zu decken

$$m_{O30min} := \frac{m_{dot_O}}{2} \cdot d_O = 26.042 \text{ tonne}$$

Produktion (Masse) in 30min, aus dem Massenstrom von 1h

$$Q_{O_30min} := q_O \cdot m_{O30min} = (3.255 \cdot 10^3) \text{ kW} \cdot \text{hr}$$

erforderliche Energie für 30min
Delignifizierung - **Kapazität für Speicherauslegung**

Technische Auslegung der Speicher (1: PCM, 2: Beton, 3 Dampf)

1: Auslegung des PCM-Speicher:

$$Q_{PCM} := \frac{Q_{O_30min}}{\eta_{PCM} \cdot \eta_{ges}} = (5.813 \cdot 10^3) \text{ kW} \cdot \text{hr}$$

Wärmeenergiebedarf für
30min Entlignifizierung inkl
Wirkungsgrad =
Speicherkapazität

Machbarkeitskontrolle (wird aus der Abwärmequelle genug Energie für die 3h-Ladung zur Verfügung gestellt?):

$$\frac{Q_D \cdot d_{laden_PCM}}{Q_{PCM} \cdot \text{hr}} = 1.214 \quad >1 \text{ OK}$$

verfügbare Energie >
Energiebedarf

Leistung des Wärmetauschers/Durchlauferhitzers:

$$Q_{PCM_Lade_1h} := \frac{Q_{PCM}}{3} = (1.938 \cdot 10^3) \text{ kW} \cdot \text{hr}$$

Energie pro Stunde bei einer
Ladezeit von 3h (Leistung);
Faktor: Speicherkapazität auf
3h aufgeteilt = 3

$$Q_{\dot{WT_PCM}} := \frac{Q_{PCM_Lade_1h}}{1 \text{ hr}} = (1.938 \cdot 10^3) \text{ kW}$$

erforderliche **Leistung für den Wärmetauscher**

Erforderliche PCM-Masse:

$$m_{PCM} := \frac{Q_{PCM}}{c_{p_PCM} \cdot (T_{SP_PCM} - T_{i_PCM}) + a_m \cdot h_{PCM} + c_{p_PCM} \cdot (T_{f_PCM} - T_{SP_PCM})} = (8.344 \cdot 10^4) \text{ kg}$$

Kosten der PCM-Masse

$$PCM_{Kosten} := P_{PCM} \cdot m_{PCM} = (1.669 \cdot 10^5) \text{ €} \quad \text{weiter in Excel}$$

Machbarkeitskontrolle: Ist die Speichergröße realistisch?

$$V_{PCM} := \frac{m_{PCM}}{\rho_{PCM}} = (4.392 \cdot 10^4) \text{ L} \quad V_{PCM} = 43.917 \text{ m}^3$$

$$Seitenlänge_{PCM} := \sqrt[3]{V_{PCM}} = 3.528 \text{ m} \quad \text{theoretische Quaderseitenlänge ohne Wärmeüberträger}$$

ergänzend: Massenstrom des Thermoﬂuids für Kreislauf durch WT und Speicher (Grundlage zur Auslegung der Förderpumpe, Leitungen...):

$$m_{\dot{TF_PCM}} := \frac{Q_{PCM_Lade_1h}}{c_{p_TF_PCM} \cdot \Delta T_{TF_PCM} \cdot hr} = (6.975 \cdot 10^4) \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad m_{\dot{TF_PCM}} = 19.376 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

2: Auslegung des Dampfspeicher:

$$Q_R := \frac{Q_{O_30min}}{\eta_R \cdot \eta_{ges}} = (5.167 \cdot 10^3) \text{ kW} \cdot \text{hr}$$

Wärmeenergiebedarf für
30min Entlignifizierung inkl
Wirkungsgrad =
Speicherkapazität

Machbarkeitskontrolle (wird aus der Abwärmequelle genug Energie für die 3h-Ladung zur Verfügung gestellt?):

$$\frac{Q_D \cdot d_{laden_R}}{Q_R \cdot hr} = 1.365 \quad >1 \text{ OK}$$

verfügbare Energie >
Energiebedarf

max. Behältervolumen:

$$V_{B_max} := 70 \text{ m}^3$$

Dampfbedarf für Entlignifizierung:

$$m_{Dampf_D} := \frac{Q_R}{\Delta h} = (8.597 \cdot 10^3) \text{ kg} \quad \text{Dampfbedarf für einen Zyklus}$$

erforderliches Dampfspeicher-Behältervolumen für einen Zyklus:

$$V_{B_gesamt} := \frac{m_{Dampf_D} \cdot v'_{Start} \cdot (0.5 \cdot (h''_{Start} + h''_{Ende}) - h'_{Ende})}{\beta \cdot (h'_{Start} - h'_{Ende})} = 227.574 \text{ m}^3$$

Anzahl der Speicher und Speichervolumen:

$$R := 4 \quad \text{gewählt: da } V_{Bmax} = 70 \text{ m}^3$$
$$V_B := \frac{V_{B_gesamt}}{R} = 56.894 \text{ m}^3$$

erforderliche Stahlmasse - Konstruktion:

$$\sigma_{zul} := 182 \text{ MPa} \quad \begin{array}{l} \text{http://www.thyssenkrupp.at/files/rohre/} \\ \text{Werkstoffdatenblaetter/P235GH.pdf} \\ \text{Mindeststreckgrenze Rp0,2 von TK P235GH bei 200°C} \\ \text{warmfester Druckbehälterstahl} \end{array}$$

$$\rho_S := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Dichte}$$

$$r_i := 1.5 \text{ m} \quad \text{Innenradius}$$

$$S := 1.5 \quad \text{Sicherheit}$$

$$l_i := \frac{V_B}{r_i^2 \cdot \pi \cdot \beta} = 8.943 \text{ m} \quad \text{Innenlänge}$$

$$s := p_{R_Start} \cdot \frac{2 \cdot r_i}{2 \cdot \sigma_{zul}} \cdot S = 4.945 \text{ mm} \quad \text{Wandstärke}$$

$$V_S := (2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot l_i + r_i^2 \cdot \pi) \cdot s = 0.452 \text{ m}^3 \quad \text{Stahlvolumen pro Speicher}$$

$$m_{Stahl} := V_S \cdot \rho_S = (3.546 \cdot 10^3) \text{ kg} \quad \text{Stahlmasse pro Speicher}$$

Kosten des Dampfspeicher:

Wasser pro Speicher:

$$R_{Kosten_Wasser} := P_{R_Wasser} \cdot V_B = 227.574 \quad \square$$

Stahl pro Speicher:

$$R_{Kosten_Wasser} := P_{R_Stahl} \cdot m_{Stahl} = (2.128 \cdot 10^4) \quad \square$$

Kosten aller Dampfspeicher:

$$R_{Materialkosten} := (R_{Kosten_Wasser} + R_{Kosten_Wasser}) = (4.256 \cdot 10^4) \quad \square$$

$$R_{Kosten} := R \cdot R_{Materialkosten} = (1.702 \cdot 10^5) \quad \square$$

weiter in Excel

3: Auslegung des Spezialbetonspeicher:

$$Q_C := \frac{Q_{O_30min}}{\eta_C \cdot \eta_{ges}} = (5.167 \cdot 10^3) \quad kW \cdot hr$$

Wärmeenergiebedarf für
30min Entlignifizierung inkl
Wirkungsgrad =
Speicherkapazität

Machbarkeitskontrolle (wird aus der Abwärmequelle
genug Energie für die 3h-Ladung zur Verfügung gestellt?):

$$\frac{Q_D \cdot d_{laden_C}}{Q_C \cdot hr} = 1.365 \quad >1 \quad OK$$

zugeführte Energie >
Energiebedarf

Leistung des Wärmetauschers/Durchlauferhitzers:

$$Q_{C_Lade_1h} := \frac{Q_C}{3} = (1.722 \cdot 10^3) \quad kW \cdot hr$$

Energie pro Stunde bei einer
Ladezeit von 3h (Leistung);
Faktor: Speicherkapazität auf
3h aufgeteilt = 3

$$Q_{dot_WT_C} := \frac{Q_{C_Lade_1h}}{hr} = (1.722 \cdot 10^3) \quad kW$$

erforderliche **Leistung für
den Durchlauferhitzer**

Erforderliche Spezialbetonmasse:

$$m_C := \frac{Q_C}{c_{p_C} \cdot (T_{f_C} - T_{i_C})} = (5.205 \cdot 10^5) \text{ kg}$$

Kosten der Beton-Masse:

$$C_{Kosten} := P_C \cdot m_C = (1.561 \cdot 10^5) \text{ €} \quad \text{weiter in Excel}$$

Machbarkeitskontrolle: Ist die Speichergröße realistisch?

$$V_C := \frac{m_C}{\rho_C} = (1.893 \cdot 10^5) \text{ L} \quad V_C = 189.267 \text{ m}^3$$

$$\text{Seitenlänge}_C := \sqrt[3]{V_C} = 5.741 \text{ m} \quad \text{theoretische Quaderseitenlänge ohne Wärmeüberträger}$$

ergänzend: Massenstrom des Thermofluids für Kreislauf durch Durchlauferhitzer und Speicher (Grundlage zur Auslegung der Förderpumpe, Leitungen...):

$$m_{\dot{TF_C}} := \frac{Q_{C_Lade_1h}}{c_{p_TF_C} \cdot \Delta T_{TF_C} \cdot hr} = (6.2 \cdot 10^4) \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad m_{\dot{TF_C}} = 17.223 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Jährliche, eingesparte Stromkosten (für 1: PCM, 2:Dampf, 3: Beton)

1: Stromkosteneinsparung für PCM-Speicher (A: interne Abwärme, B: Strom aus EE):

A: Energiequelle: 100% Wärmeenergie aus interner Abwärme:

$$P_{Strom_mittel} := 62 \frac{\text{MW} \cdot \text{hr}}{\text{MW} \cdot \text{hr}}$$

$$P_{Zyklus_IA_PCM} := Q_{O_30min} \cdot P_{Strom_mittel} = 201.823 \text{ €} \quad \text{Stromkosteneinsparung für einen 3,5h Zyklus}$$

2 Auslastungsfälle werden betrachtet: 1 oder 3 Betriebszyklen pro Tag:

$$z_{IA_PCM_5} := 1$$

6 Zyklen wären bei 24h
Produktion am Tag möglich

$$z_{IA_PCM_1} := 3$$

$$b_{IA_PCM} := 330$$

330 Betriebstage pro Jahr

$$P_{Jahr_5} := P_{Zyklus_IA_PCM} \cdot z_{IA_PCM_5} \cdot b_{IA_PCM} = (6.66 \cdot 10^4) \text{ €} \quad \text{Einsparung der Stromausgaben pro Jahr bei 330 Betriebstagen, 1 Zyklus pro Tag}$$

weiter in Excel

$$P_{Jahr_1} := P_{Zyklus_IA_PCM} \cdot z_{IA_PCM_1} \cdot b_{IA_PCM} = (1.998 \cdot 10^5) \text{ €} \quad \text{Einsparung der Stromausgaben pro Jahr bei 330 Betriebstagen, 3 Zyklen pro Tag}$$

weiter in Excel

Machbarkeitskontrolle: die Zykluslebensdauer muss auch in der kalendarischen Lebensdauer eingehalten werden

$$\frac{10000}{b_{IA_PCM}} = 30.303 \quad >25, \text{ OK}$$

Prüfung; zyklische
Lebensdauer: 10.000x
Kalendarisch: 25 Jahre

hier wird die kalendarische Lebensdauer erreicht

B: Energiequelle: 100% Strom aus EE bei Spitzenproduktion:

<http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/negative-strompreise-zunehmend-haeufiger-a-1092088.html>

$$P_{Strom_IA} := 0 \frac{\text{MW} \cdot \text{hr}}{\text{MW} \cdot \text{hr}}$$

0€ oder sogar Negativpreise bis -150€,
fließt nicht direkt in Rechnung ein

$$P_{Zyklus_EE_PCM} := P_{Zyklus_IA_PCM} = 201.823 \text{ €} \quad \text{Stromkosteneinsparung für einen 3,5h Zyklus (wie bei IA)}$$

Nur ein Fall wird betrachtet: 1 Betriebszyklus am Tag, denn hier sind 3 Zyklen aufgrund der kurzen Verfügbarkeit der EE-Spitzen nicht relevant:

$$z_{EE_PCM_7} := 1$$

6 Zyklen wären bei 24h Produktion am Tag möglich, sofern EE-Überschuss vorhanden ist

$$b_{EE_PCM} := 147$$

147 Betriebstage pro Jahr
(siehe Angabe)

$$P_{Jahr_7} := P_{Zyklus_EE_PCM} \cdot z_{EE_PCM_7} \cdot b_{EE_PCM} = (2.967 \cdot 10^4) \text{ } \square \text{ } \textbf{Einsparung} \text{ der Stromausgaben pro Jahr bei 147 Betriebstagen mit Stromüberschuss im Netz}$$

weiter in Excel

Machbarkeitskontrolle: die Zykluslebensdauer muss auch in der kalendarischen Lebensdauer eingehalten werden

$$\frac{10000}{b_{EE_PCM}} = 68.027 \quad >25, \text{ OK}$$

Prüfung; zyklische
Lebensdauer: 10.000x
Kalendarisch: 25 Jahre

hier wird die kalendarische vor der zyklischen Lebensdauer erreicht

2: Stromkosteneinsparung für Dampf-Speicher

(die Stromkosteneinsparung entspricht jener von PCM, da der Prozess gleich geführt wird)

3: Stromkosteneinsparung für Spezialbetonspeicher (A: interne Abwärme, B: Strom aus EE):

(bei gleicher Auslastung wie bei PCM/Dampf ist die selbe Einsparung zu erwarten (trotz unterschiedlicher Zyklendauer))

A: Energiequelle: 100% Wärmeenergie aus interner Abwärme:

$$P_{\text{Strom_mittel}} = 62 \frac{\text{MWh}}{\text{MW} \cdot \text{hr}}$$

$$P_{\text{Zyklus_IA_C}} := Q_{O_30\text{min}} \cdot P_{\text{Strom_mittel}} = 201.823 \text{ MWh}$$

Stromkosteneinsparung für einen 4h Zyklus pro Tag

2 Auslastungsfälle werden betrachtet: 1 oder 3 Betriebszyklen am Tag:

$$z_{\text{IA_C_6}} := 1$$

6 Zyklen wären bei 24h Produktion am Tag möglich

$$z_{\text{IA_C_2}} := 3$$

$$b_{\text{IA_C}} := b_{\text{IA_PCM}}$$

330 Betriebstage pro Jahr

$$P_{\text{Jahr_6}} := P_{\text{Zyklus_IA_C}} \cdot z_{\text{IA_C_6}} \cdot b_{\text{IA_C}} = (6.66 \cdot 10^4) \text{ MWh}$$

Einsparung der Stromausgaben pro Jahr bei 330 Betriebstagen, 1 Zyklus pro Tag
weiter in Excel

$$P_{\text{Jahr_2}} := P_{\text{Zyklus_IA_C}} \cdot z_{\text{IA_C_2}} \cdot b_{\text{IA_C}} = (1.998 \cdot 10^5) \text{ MWh}$$

Einsparung der Stromausgaben pro Jahr bei 330 Betriebstagen, 3 Zyklen pro Tag
weiter in Excel

Machbarkeitskontrolle: die Zykluslebensdauer muss auch in der kalendarischen Lebensdauer eingehalten werden

$$\frac{30000}{b_{\text{IA_C}}} = 90.909 > 40 \text{ OK}$$

Prüfung zyklische Lebensdauer 30.000x
Kalendarisch: 40 Jahre

hier wird die kalendarische vor der zyklischen Lebensdauer erreicht

B: Energiequelle: 100% Strom aus EE bei Spitzenproduktion:

<http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/negativstrompreise-zunehmend-haeufiger-1092088.html>

$$P_{\text{Strom_EE}} := 0 \frac{\text{MWh}}{\text{MW} \cdot \text{hr}}$$

0€ oder sogar Negativpreise bis -150€, fließt nicht direkt in Rechnung ein

$$P_{\text{Zyklus_EE_C}} := P_{\text{Zyklus_IA_C}} = 201.823 \text{ MWh}$$

Stromeinsparung für einen 4h Zyklus (wie bei IA)

1 Fall wird betrachtet: 1 Betriebszyklus am Tag, denn hier sind 3 Zyklen aufgrund der kurzen Verfügbarkeit der EE-Spitzen nicht relevant:

$$z_{EE_C_8} := 1$$

6 Zyklen wären bei 24h Produktion am Tag möglich, sofern EE-Überschuss vorhanden ist

$$b_{EE_C} := b_{EE_PCM}$$

$$P_{Jahr_8} := P_{Zyklus_EE_C} \cdot z_{EE_C_8} \cdot b_{EE_C} = (2.967 \cdot 10^4) \quad \square$$

weiter in Excel

Einsparung der Stromausgaben pro Jahr bei 147 Betriebstagen mit Stromüberschuss im Netz, 3 Fälle nicht relevant

Plausibilitätsprüfung mit LCOS, 2 verschiedene Fälle

Nach Formel 4.10

Fall 1: PCM-TES, Auslastung 3/d, 330 Tage, $r=12\%$, interne Abwärme

$$CAPEX_1 := 443733 \quad \square \quad \text{aus Excel}$$

$$O\&M_1 := 19407 \quad \square \quad \text{aus Excel}$$

$$r_1 := 0.12$$

$$V_{residual_1} := 10000 \quad \square$$

$$P_{elec_in_1} := 0$$

$$\eta_1 := 0.8$$

$$DOD_1 := 0.9$$

$$cycles_1 := 990$$

$$C_{rated_1} := Q_{PCM} = 5.813 \text{ MW} \cdot \text{hr}$$

$$DEG_1 := 0$$

$$N_1 := 20$$

$$LCOS_1 := \frac{CAPEX_1 + O\&M_1 \cdot \sum_{n=1}^{N_1} \frac{1}{(1+r_1)^n} + \frac{V_{residual_1}}{(1+r_1)^{N_1+1}} + \frac{P_{elec_in_1}}{\eta_1 \cdot DOD_1}}{cycles_1 \cdot DOD_1 \cdot C_{rated_1} \cdot \sum_{n=1}^{N_1} \frac{1 - DEG_1 \cdot n}{(1+r_1)^n}} = 15.241 \frac{\square}{\text{MW} \cdot \text{hr}}$$

deutlich günstiger als der Stromeinkaufspreis und somit ist ein positiver NPV zu erwarten

Fall 7: C-TES, Auslastung 1/d, 147 Tage, r=12%, EE

$CAPEX_7 := 443733$ □ aus Excel

$O\&M_7 := 19407$ □ aus Excel

$r_7 := 0.12$

$V_{residual_7} := 10000$ □

$P_{elec_in_7} := 0$

$\eta_7 := 0.9$

$DOD_7 := 0.9$

$cycles_7 := 147$

$C_{rated_7} := Q_C = 5.167$ **MW·hr**

$DEG_7 := 0$

$N_7 := 40$

$$LCOS_7 := \frac{CAPEX_7 + O\&M_7 \cdot \sum_{n=1}^{N_7} \frac{1}{(1+r_7)^n} + \frac{V_{residual_7}}{(1+r_7)^{N_7+1}} + \frac{P_{elec_in_7}}{\eta_7 \cdot DOD_7}}{cycles_7 \cdot DOD_7 \cdot C_{rated_7} \cdot \sum_{n=1}^{N_7} \frac{1 - DEG_7 \cdot n}{(1+r_7)^n}} = 107.147 \frac{\text{□}}{\text{MW} \cdot \text{hr}}$$

teurer als der Stromeinkaufspreis und somit kann sich die Investition nicht lohnen

Anhang C

Anhänge für Kapitel 5, Teil 2

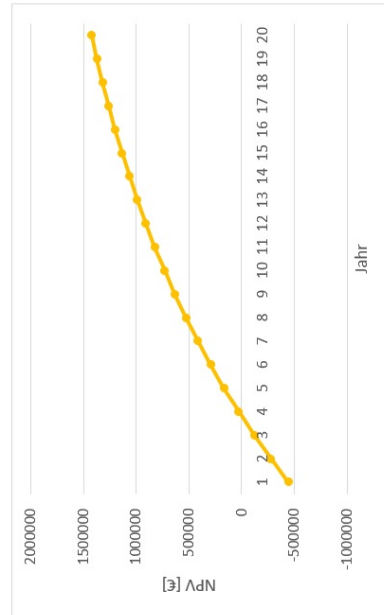
Auf den folgenden Seiten befinden sich weitere Abbildungen und Tabellen für Kapitel 5, die im Hauptteil aus Übersichtsgründen nicht angeführt wurden. Die gewonnen Tabellen und Grafiken der Wirtschaftlichkeitsrechnung aus MS Excel werden im folgenden dargestellt.

Investitionsrechnung Fall 1. Eigene Auswertung.

Jahr	Ausgaben	Einsparung	CF	PV	NPV
1	443733	0	-443732,56	-443733	-443732,558
2	19407	199800	180393,02	168592	-275140,948
3	19407	199800	180393,02	157562	-117578,695
4	19407	199800	180393,02	147254	29675,7471
5	19407	199800	180393,02	137621	167296,721
6	19407	199800	180393,02	128618	295914,453
7	19407	199800	180393,02	120203	416117,942
8	19407	199800	180393,02	112340	528457,65
9	19407	199800	180393,02	104990	633448,032
10	19407	199800	180393,02	98121,9	731569,884
11	19407	199800	180393,02	91702,7	823272,55
12	19407	199800	180393,02	85703,4	908975,976
13	19407	199800	180393,02	80096,7	989072,636
14	19407	199800	180393,02	74856,7	1063929,33
15	19407	199800	180393,02	69959,5	1133888,85
16	19407	199800	180393,02	65382,7	1199271,58
17	19407	199800	180393,02	61105,4	1260376,94
18	19407	199800	180393,02	57107,8	1317484,75
19	19407	199800	180393,02	53371,8	1370856,54
20	19407	199800	180393,02	49880,2	1420736,71

Aus Speicherkostenberechnung
Eingabefeld (Wert aus MathCAD)

Fall 1 Speicher: PCM
Wärme: interne Abwärme
Zinßfuß: 0,07
Zyklen/yr: 3x330
lifetime: 20 y



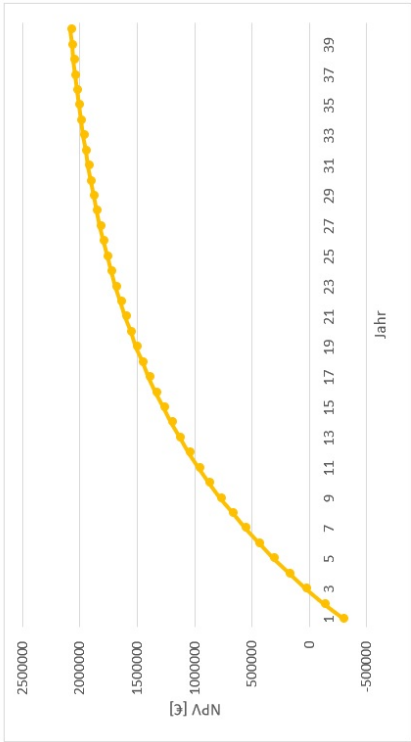
Investitionsrechnung Fall 2. Eigene Auswertung.

Jahr	Ausgaben	Einsparung	CF	PV	NPV
1	294548		0	-294548,14	-294548,141
2	20601	199800	179199,44	167476	-127072,027
3	20601	199800	179199,44	156520	29447,70617
4	20601	199800	179199,44	146280	175727,8305
5	20601	199800	179199,44	136710	312438,2271
6	20601	199800	179199,44	127767	440204,9529
7	20601	199800	179199,44	119408	559613,1078
8	20601	199800	179199,44	111596	671209,5143
9	20601	199800	179199,44	104296	775505,2213
10	20601	199800	179199,44	97472,6	872977,8447
31	20601	199800	179199,44	23540,9	1929145,119
32	20601	199800	179199,44	22000,9	1951145,974
33	20601	199800	179199,44	20561,5	1971707,52
34	20601	199800	179199,44	19216,4	1990923,918
35	20601	199800	179199,44	17959,3	2008883,169
36	20601	199800	179199,44	16784,3	2025667,515
37	20601	199800	179199,44	15686,3	2041353,82
38	20601	199800	179199,44	14660,1	2056013,918
39	20601	199800	179199,44	13701	2069714,945
40	20601	199800	179199,44	12804,7	2082519,642

Zeilen 11 bis 30 ausgeblendet

Aus Speicherkostenberechnung
Eingabefeld (Wert aus MathCAD)

Fall 2 Speicher: Beton
Wärme: interne Abwärme
Zinßfuß: 0,07
Zyklen/yr: 3x330
lifetime: 40 y

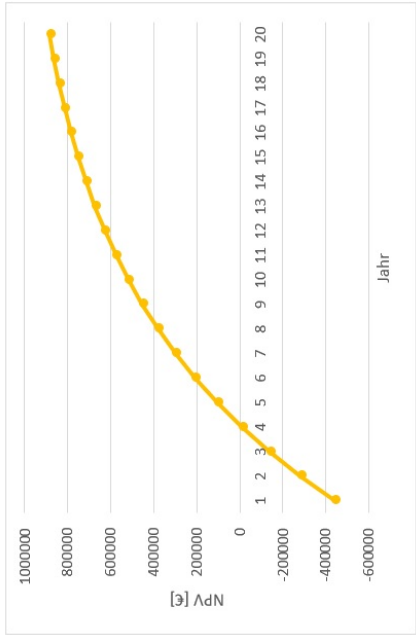


Investitionsrechnung Fall 3. Eigene Auswertung.

Jahr	Ausgaben	Einsparung	CF	PV	NPV
1	443733		0	-443732,56	-443732,558
2	19407	199800	180393,02	161065	-282667,359
3	19407	199800	180393,02	143808	-138859,145
4	19407	199800	180393,02	128400	-10458,9543
5	19407	199800	180393,02	114643	104184,0732
6	19407	199800	180393,02	102360	206543,9192
7	19407	199800	180393,02	91392,7	297936,6388
8	19407	199800	180393,02	81600,6	379537,2813
9	19407	199800	180393,02	72857,7	452394,9978
10	19407	199800	180393,02	65051,5	517446,5305
11	19407	199800	180393,02	58081,7	575528,256
12	19407	199800	180393,02	51858,7	627386,9396
13	19407	199800	180393,02	46302,4	673689,3356
14	19407	199800	180393,02	41341,4	715030,7606
15	19407	199800	180393,02	36912	751942,7472
16	19407	199800	180393,02	32957,1	784899,8781
17	19407	199800	180393,02	29426	814325,8878
18	19407	199800	180393,02	26273,2	840599,1108
19	19407	199800	180393,02	23458,2	864057,3456
20	19407	199800	180393,02	20944,9	885002,1981

Aus Speicherkostenberechnung
Eingabefeld (Wert aus MathCAD)

Fall 3 Speicher: PCM
Wärme: interne Abwärme
Zinsfuß: 0,12
Zyklen/yr: 3x330
lifetime: 20 y

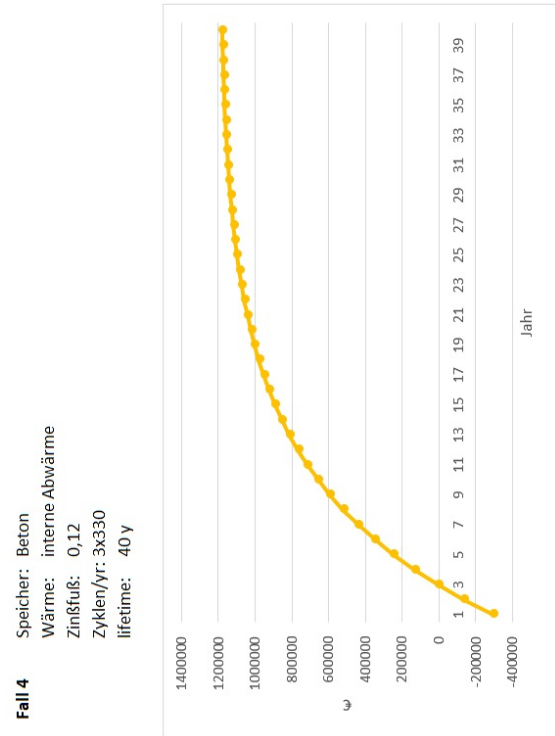


Investitionsrechnung Fall 4. Eigene Auswertung.

Jahr	Ausgaben	Einsparung	CF	PV	NPV
1	294548	0	-294548,14	-294548	-294548,141
2	20601	199800	179199,44	158584	-135964,564
3	20601	199800	179199,44	142857	6892,134388
4	20601	199800	179199,44	127551	134442,7579
5	20601	199800	179199,44	113884	248327,2432
6	20601	199800	179199,44	101683	350009,8193
7	20601	199800	179199,44	90788	440797,8337
8	20601	199800	179199,44	81060,7	521858,5609
9	20601	199800	179199,44	72375,6	594234,2101
10	20601	199800	179199,44	64621,1	658855,3255
31	20601	199800	179199,44	5981,31	1147520,409
32	20601	199800	179199,44	5340,45	1152860,86
33	20601	199800	179199,44	4768,26	1157629,12
34	20601	199800	179199,44	4257,38	1161886,495
35	20601	199800	179199,44	3801,23	1165687,723
36	20601	199800	179199,44	3393,95	1169081,676
37	20601	199800	179199,44	3030,32	1172111,992
38	20601	199800	179199,44	2705,64	1174817,631
39	20601	199800	179199,44	2415,75	1177233,38
40	20601	199800	179199,44	2156,92	1179390,298

Zeilen 11 bis 30 ausgeblendet

Aus Speicherkostenberechnung
Eingabefeld (Wert aus MathCAD)



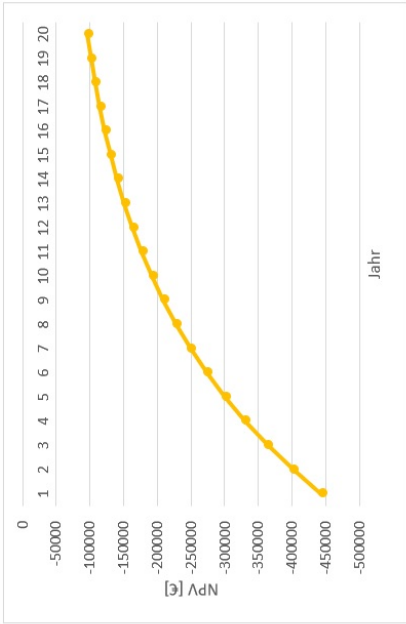
Investitionsrechnung Fall 5. Eigene Auswertung.

Jahr	Ausgaben	Einsparung	CF	PV	NPV
1	443733	0	-443732,56	-443733	-443732,558
2	19407	66600	47193,023	42136,6	-401595,93
3	19407	66600	47193,023	37622	-363973,941
4	19407	66600	47193,023	33591,1	-330382,879
5	19407	66600	47193,023	29992	-300390,86
6	19407	66600	47193,023	26778,6	-273612,271
7	19407	66600	47193,023	23909,5	-249702,817
8	19407	66600	47193,023	21347,7	-228355,09
9	19407	66600	47193,023	19060,5	-209294,619
10	19407	66600	47193,023	17018,3	-192276,342
11	19407	66600	47193,023	15194,9	-177081,451
12	19407	66600	47193,023	13566,9	-163514,585
13	19407	66600	47193,023	12113,3	-151401,311
14	19407	66600	47193,023	10815,4	-140585,888
15	19407	66600	47193,023	9656,63	-130929,261
16	19407	66600	47193,023	8621,99	-122307,272
17	19407	66600	47193,023	7698,2	-114609,068
18	19407	66600	47193,023	6873,4	-107735,671
19	19407	66600	47193,023	6136,96	-101598,709
20	19407	66600	47193,023	5479,43	-96119,2795

Aus Speicherkostenberechnung

Eingabefeld (Wert aus MathCAD)

Fall 5 Speicher: PCM
Wärme: interne Abwärme
Zinßfuß: 0,12
Zyklus/yr: 1x330
lifetime: 20 y

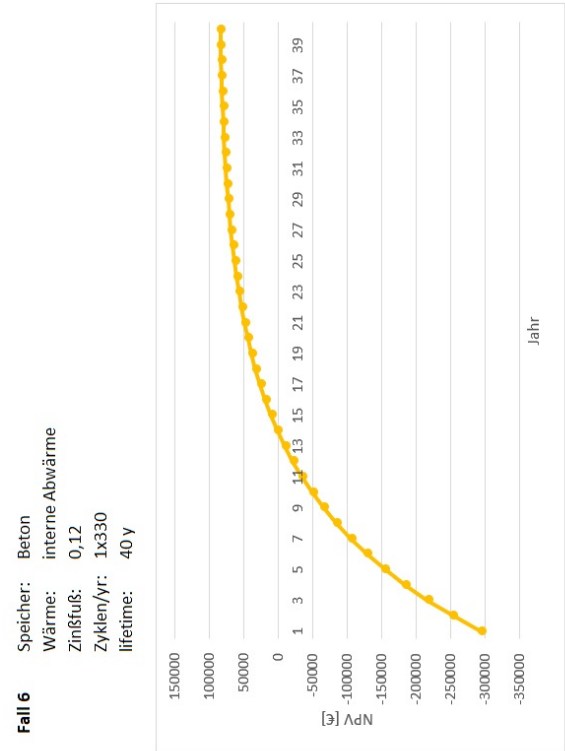


Investitionsrechnung Fall 6. Eigene Auswertung.

Jahr	Ausgaben	Einsparung	CF	PV	NPV
1	294548		0	-294548,14	-294548,141
2	20601	66600		45999,442	40707,5
3	20601	66600		45999,442	-253840,67
4	20601	66600		45999,442	-217170,196
5	20601	66600		45999,442	-184428,702
6	20601	66600		45999,442	-155195,225
7	20601	66600		45999,442	-129093,906
8	20601	66600		45999,442	-105789,157
9	20601	66600		45999,442	-84981,3449
10	20601	66600		45999,442	-66402,9416
31	20601	66600		45999,442	-49815,0815
32	20601	66600		45999,442	-49815,0815
33	20601	66600		45999,442	-49815,0815
34	20601	66600		45999,442	-49815,0815
35	20601	66600		45999,442	-49815,0815
36	20601	66600		45999,442	-49815,0815
37	20601	66600		45999,442	-49815,0815
38	20601	66600		45999,442	-49815,0815
39	20601	66600		45999,442	-49815,0815
40	20601	66600		45999,442	-49815,0815

Zeilen 11 bis 30 ausgeblendet

Aus Speicherkostenberechnung
Eingabefeld (Wert aus MathCAD)

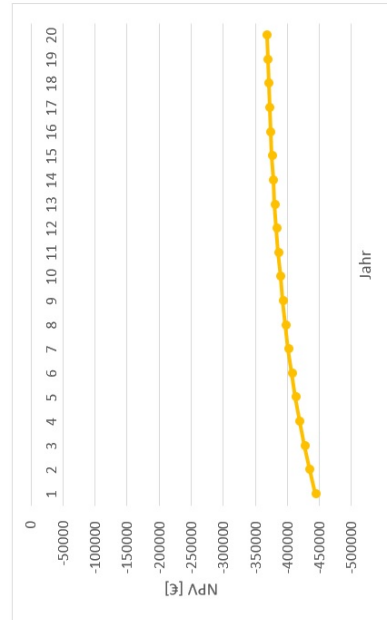


Investitionsrechnung Fall 7. Eigene Auswertung.

Jahr	Ausgaben	Einsparung	CF	PV	NPV
1	443733	0	-443732,56	-443733	-443732,558
2	19407	29670	10263,0233	9163,41	-434569,145
3	19407	29670	10263,0233	8181,62	-426387,525
4	19407	29670	10263,0233	7305,02	-419082,508
5	19407	29670	10263,0233	6522,34	-412560,171
6	19407	29670	10263,0233	5823,52	-406736,656
7	19407	29670	10263,0233	5199,57	-401537,089
8	19407	29670	10263,0233	4642,47	-396894,619
9	19407	29670	10263,0233	4145,06	-392749,556
10	19407	29670	10263,0233	3700,95	-389048,607
11	19407	29670	10263,0233	3304,42	-385744,188
12	19407	29670	10263,0233	2950,37	-382793,814
13	19407	29670	10263,0233	2634,26	-380159,551
14	19407	29670	10263,0233	2352,02	-377807,531
15	19407	29670	10263,0233	2100,02	-375707,513
16	19407	29670	10263,0233	1875,02	-373832,497
17	19407	29670	10263,0233	1674,12	-372158,376
18	19407	29670	10263,0233	1494,75	-370663,625
19	19407	29670	10263,0233	1334,6	-369329,025
20	19407	29670	10263,0233	1191,61	-368137,419

Aus Speicherkostenberechnung
Eingabefeld (Wert aus MathCAD)

Fall 7 Speicher: PCM
Wärme: Erhitzen aus Stromüberschuss vom Netz
Zinßfuß: 0,12
Zyklus/yr: 1x147
lifetime: 20 y



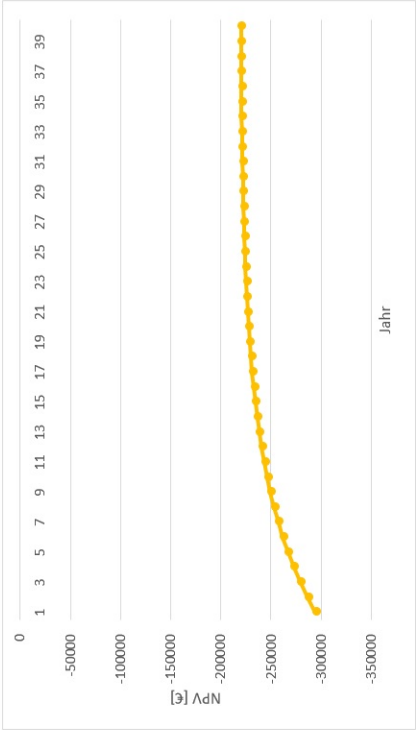
Investitionsrechnung Fall 8. Eigene Auswertung.

Jahr	Ausgaben	Einsparung	CF	PV	NPV
1	294548		0	-294548,14	-294548,141
2	20601	29670		9069,4424	8026,06
3	20601	29670		9069,4424	7230,1
4	20601	29670		9069,4424	6455,45
5	20601	29670		9069,4424	5763,79
6	20601	29670		9069,4424	5146,25
7	20601	29670		9069,4424	4594,86
8	20601	29670		9069,4424	4102,56
9	20601	29670		9069,4424	3663
10	20601	29670		9069,4424	3270,53
31	20601	29670		9069,4424	302,719
32	20601	29670		9069,4424	270,285
33	20601	29670		9069,4424	241,326
34	20601	29670		9069,4424	215,47
35	20601	29670		9069,4424	192,383
36	20601	29670		9069,4424	171,771
37	20601	29670		9069,4424	153,367
38	20601	29670		9069,4424	136,935
39	20601	29670		9069,4424	122,263
40	20601	29670		9069,4424	109,164

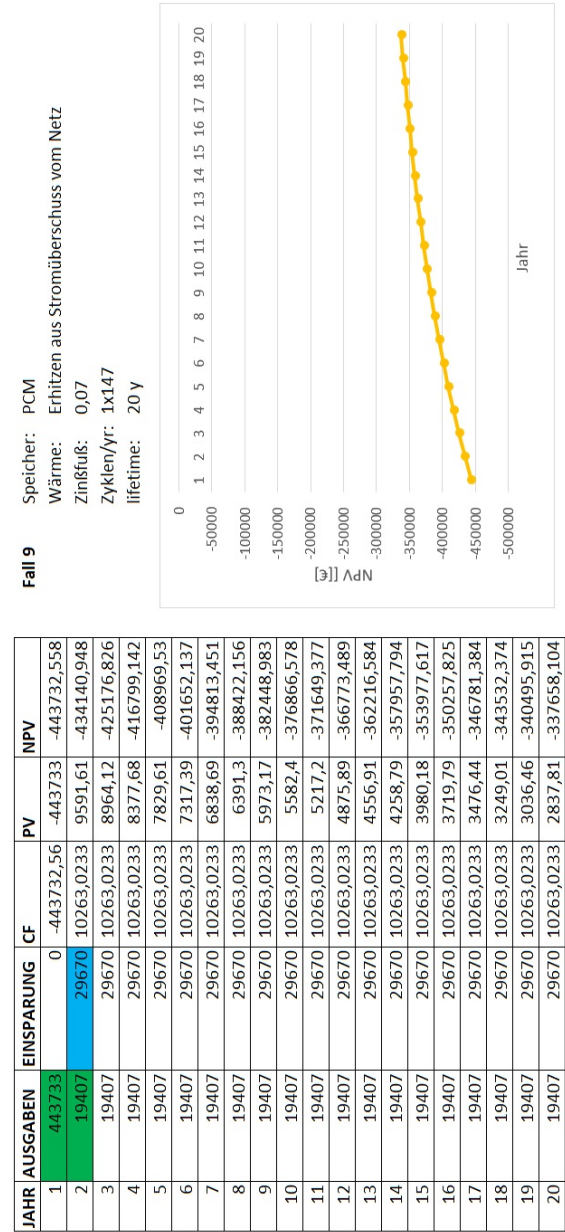
Zeilen 11 bis 30 ausgeblendet

Aus Speicherkostenberechnung
Eingabefeld (Wert aus MathCAD)

Fall 8 Speicher: Beton
Wärme: Erhitzen aus Stromüberschuss vom Netz
Zinsfuß: 0,12
Zyklen/yr: 1x147
lifetime: 40 y

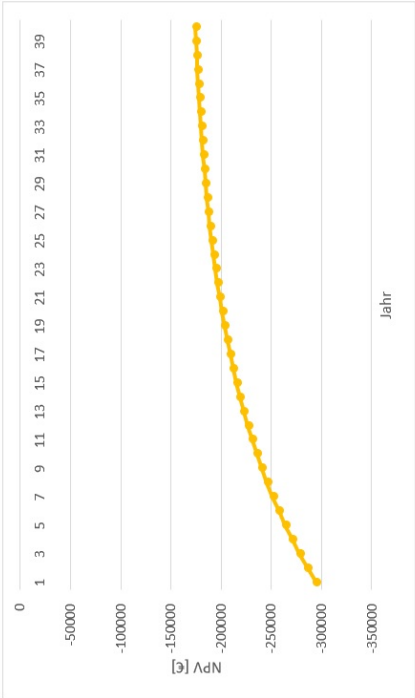


Investitionsrechnung Fall 9. Eigene Auswertung.



Investitionsrechnung Fall 10. Eigene Auswertung.

Fall 10 Speicher: Beton
Wärme: Erhitzen aus Stromüberschuss vom Netz
Zinsfuß: 0,07
Zyklen/yr: 1x147
lifetime: 40 y



Jahr	Ausgaben	Einsparung	CF	PV	NPV
1	294548		0	-294548,141	-294548,141
2	20601	29670		9069,44238	-286072,027
3	20601		29670	9069,44238	-278150,425
4	20601		29670	9069,44238	-270747,058
5	20601		29670	9069,44238	-263828,024
6	20601		29670	9069,44238	-257361,637
7	20601		29670	9069,44238	-251318,284
8	20601		29670	9069,44238	-245670,292
9	20601		29670	9069,44238	-240391,794
10	20601		29670	9069,44238	-235458,618
31	20601		29670	9069,44238	-182005,057
32	20601		29670	9069,44238	-180891,575
33	20601		29670	9069,44238	-179850,937
34	20601		29670	9069,44238	-178878,378
35	20601		29670	9069,44238	-177969,444
36	20601		29670	9069,44238	-177119,973
37	20601		29670	9069,44238	-176326,076
38	20601		29670	9069,44238	-175584,115
39	20601		29670	9069,44238	-174890,694
40	20601		29670	9069,44238	-174242,637

Zeilen 11 bis 30 ausgeblendet

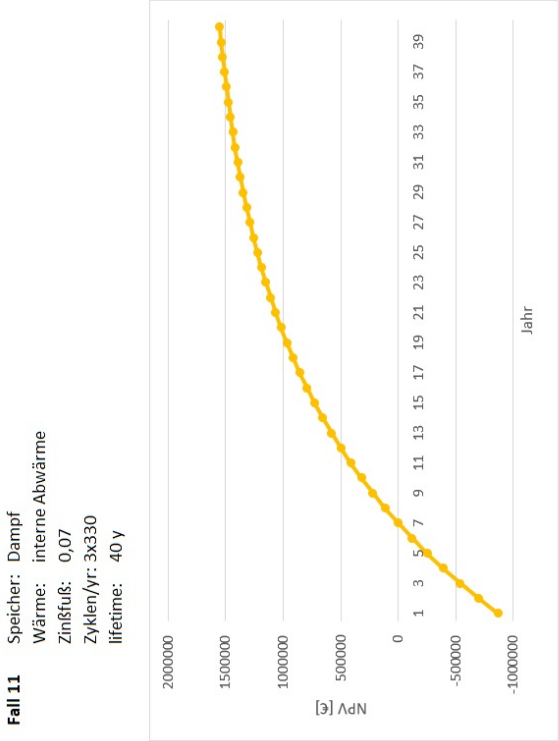
Aus Speicherkostenberechnung
Eingabefeld (Wert aus MathCAD)

Investitionsrechnung Fall 11. Eigene Auswertung.

JAH	AUSGABEN	EINSPARUNG	CF	PV	NPV
1	868766	0	-868766,33	-868766	-868766,327
2	17375	199800	182424,67	170490	-698275,978
3	17375	199800	182424,67	159337	-538939,203
4	17375	199800	182424,67	148913	-390026,33
5	17375	199800	182424,67	139171	-250855,42
6	17375	199800	182424,67	130066	-120789,149
7	17375	199800	182424,67	121557	768,1139666
8	17375	199800	182424,67	113605	114373,0323
9	17375	199800	182424,67	106173	220545,8531
10	17375	199800	182424,67	99226,9	319772,7885
31	17375	199800	182424,67	23964,6	1394948,959
32	17375	199800	182424,67	22396,8	1417345,785
33	17375	199800	182424,67	20931,6	1438277,397
34	17375	199800	182424,67	19562,3	1457839,652
35	17375	199800	182424,67	18282,5	1476122,133
36	17375	199800	182424,67	17086,4	1493208,564
37	17375	199800	182424,67	15968,6	1509177,192
38	17375	199800	182424,67	14924	1524101,142
39	17375	199800	182424,67	13947,6	1538048,76
40	17375	199800	182424,67	13035,2	1551083,916

Zeilen 11 bis 30 ausgeblendet

Aus Speicherkostenberechnung
Eingabefeld (Wert aus MathCAD)

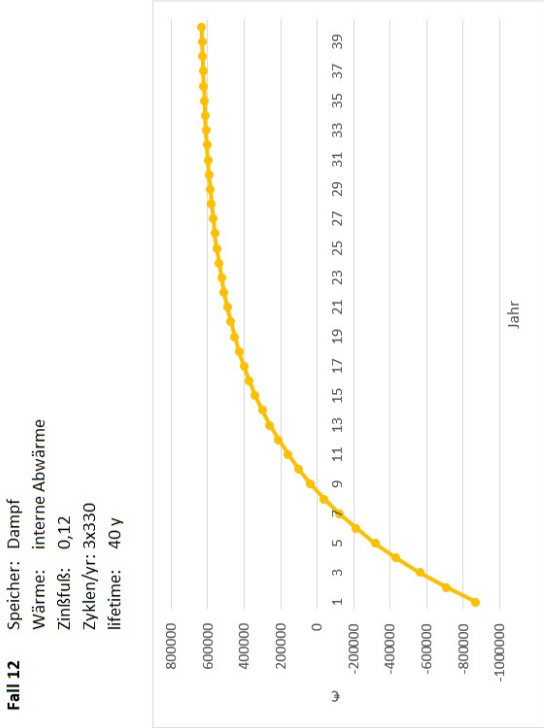


Investitionsrechnung Fall 12. Eigene Auswertung.

Jahr	Ausgaben	Einsparung	CF	PV	NPV
1	868766		0	-868766,33	-868766,327
2	17375	199800	182424,67	161438	-707328,563
3	17375	199800	182424,67	145428	-561900,73
4	17375	199800	182424,67	129846	-432054,451
5	17375	199800	182424,67	115934	-316120,273
6	17375	199800	182424,67	103513	-212607,614
7	17375	199800	182424,67	92422	-120185,597
8	17375	199800	182424,67	82519,7	-37665,9393
9	17375	199800	182424,67	73678,3	36012,32672
10	17375	199800	182424,67	65784,2	101796,4928
31	17375	199800	182424,67	6088,96	599256,5694
32	17375	199800	182424,67	5436,57	604693,138
33	17375	199800	182424,67	4854,08	609547,2171
34	17375	199800	182424,67	4334	613881,2163
35	17375	199800	182424,67	3869,64	617750,8585
36	17375	199800	182424,67	3455,04	621205,8962
37	17375	199800	182424,67	3084,86	624290,7512
38	17375	199800	182424,67	2754,33	627045,0861
39	17375	199800	182424,67	2459,23	629504,3136
40	17375	199800	182424,67	2195,74	631700,0525

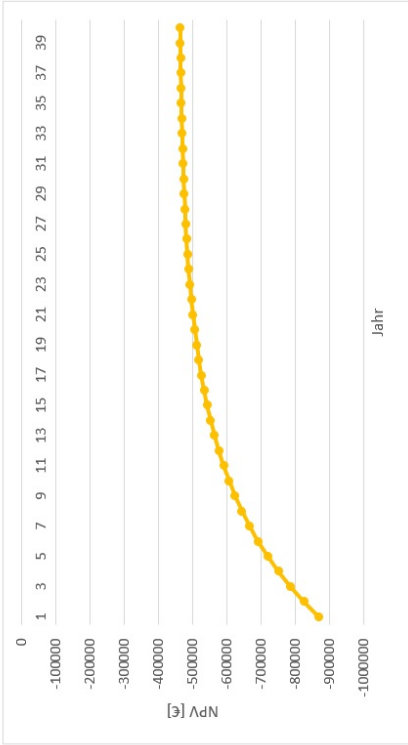
Zeilen 11 bis 30 ausgeblendet

Aus Speicherkostenberechnung
Eingabefeld (Wert aus MathCAD)



Investitionsrechnung Fall 13. Eigene Auswertung.

Fall 13 Speicher: Dampf
Wärme: interne Abwärme
Zinßfuß: 0,12
Zyklen/yr: 1x330
lifetime: 40 y



Jahr	Ausgaben	Einsparung	CF	PV	NPV
1	868766		0	-868766,33	-868766,327
2	17375	66600	49224,673	43561,7	-825204,669
3	17375	66600	49224,673	39241,6	-785963,061
4	17375	66600	49224,673	35037,2	-750925,91
5	17375	66600	49224,673	31283,2	-719642,741
6	17375	66600	49224,673	27931,4	-691711,339
7	17375	66600	49224,673	24938,8	-666772,587
8	17375	66600	49224,673	22266,7	-644505,845
9	17375	66600	49224,673	19881	-624624,825
10	17375	66600	49224,673	17750,9	-606873,914
31	17375	66600	49224,673	1643,02	-472641,47
32	17375	66600	49224,673	1466,98	-471174,49
33	17375	66600	49224,673	1309,8	-469864,687
34	17375	66600	49224,673	1169,47	-468695,219
35	17375	66600	49224,673	1044,17	-467651,052
36	17375	66600	49224,673	932,292	-466718,76
37	17375	66600	49224,673	832,404	-465886,356
38	17375	66600	49224,673	743,218	-465143,138
39	17375	66600	49224,673	663,587	-464479,551
40	17375	66600	49224,673	592,489	-463887,063

Zeilen 11 bis 30 ausgeblendet

Aus Speicherkostenberechnung
Eingabefeld (Wert aus MathCAD)