



Masterarbeit

Automatisierung und Optimierung
einer Kleinbrauanlage

Florian Kernstock, BSc

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Kienberger

Leoben, Januar 2018

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Leoben, am 15. Jan. 2018

(Florian Kernstock)

Kurzfassung

Rationeller Energieeinsatz und eine effiziente Energieversorgung sind die Herausforderungen der Zukunft. Vor allem beim thermischen Energieeinsatz sind intelligente Lösungen anzustreben, um Ressourcen zu schonen und Nachhaltigkeit zu gewährleisten. Die Brauereibranche ist vom thermischen Energieeinsatz im Niedertemperaturbereich geprägt, obwohl technisch und ökonomisch naheliegend, wurde bisher thermische Energie in Großbrauanlagen kaum mit erneuerbaren Energieträgern bereitgestellt. Im Zuge einiger Pilotprojekte, angetrieben durch Primärenergie- und CO₂-Einsparungen, sind in den letzten Jahren verschiedenste Ansätze realisiert worden. Diese Arbeit befasst sich zunächst mit dem aktuellen Stand der Technik in Großbrauanlagen mit Bezug auf Energieeffizienz und den dabei gewonnenen Erkenntnissen in der Prozessführung.

Projektpartner für diese Arbeit war die Gasthofbrauerei Linko. Seit 2005 wird im Familienbetrieb für den Eigenbedarf und einige umliegende Gasthäuser Bier gebraut. Um die Brauerei effizienter zu gestalten, beziehungsweise den Arbeitsaufwand zu reduzieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Automatisierung der Brauanlage durchgeführt und die zum Stand der Technik gewonnenen Erkenntnisse mit Umsetzbarkeit im kleinen Maßstab in der Kleinbrauerei Linko evaluiert. Ausgehend von der bestehenden Brauanlage, werden in dieser Arbeit die vorgenommenen Änderungen der Anlage, beziehungsweise der Brauerei vorgestellt. Um einer effizienten Betriebsweise gerecht zu werden wurden zusätzlich zur Automatisierung der Anlage, die Abwärmepotentiale im Produktionsprozess hinsichtlich einer zeitversetzten Nutzung und alternative Energiebereitstellungen für den thermischen Energieeinsatz evaluiert.

Abstract

Efficient use of energy and energy supply are the challenges of the future. Intelligent solutions are particularly important in thermal energy applications to conserve resources and to ensure sustainability. The brewing industry is characterized by thermal energy input in the low temperature range. Although technically and economically obvious, thermal energy has hardly been provided with renewable energy sources in large brewing plants. In the course of several pilot projects, driven by primary energy and CO₂ savings, various approaches have been implemented in recent years. This thesis deals with the current state of the art in large brewing plants regarding to energy efficiency and the knowledge gained in process management and plant engineering.

Project partner for this thesis was the craft brewery Linko. Since 2005 beer has been brewed in the family business for its own supply and some surrounding guest houses. To make the brewery more efficient and to reduce the workload an automization of the brewing process was carried out in the course of this thesis. Furthermore, the obtained findings regarding to the current state of the art have been evaluated for small scale implementability in the craft brewery Linko. Starting from the existing brewing plant, the changes made to the plant, respectively to the brewery are presented in this thesis. In addition to the automization of the plant, to come up to an efficient mode of operation, the waste heat potentials in the production process regarding time delayed use and alternative energy supplies for the thermal energy use were evaluated.

Vorwort

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die mir geholfen haben, diese Masterarbeit zu verfassen.

Vielen Dank an den Lehrstuhl für Energieverbundtechnik der Montanuniversität Leoben, welcher mir ermöglichte, diese Arbeit zu verfassen. Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Kienberger, für sein Vertrauen und seine Unterstützung bei der Gestaltung dieser Arbeit.

Ausdrücklich danken möchte ich Herrn Martin Wimmer, der mir stets geduldig und hilfreich bei Fragestellungen über die Automatisierungstechnik zur Seite stand und so maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Mein Dank gilt allen Mitarbeitern und Freunden des Gasthauses Linko, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Besonders erwähnt seien Herr Peter Linko der unter anderem die finanziellen Rahmenbedingungen für die Durchführung dieser Arbeit schuf und Kommilitone Moritz Hübl, BSc., durch welchen ich zu diesem Projekt stieß und in seiner eigenen Masterarbeit die förderliche Optimierung der Brauanlage behandelte.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung	2
2.1. Vorgehensweise.....	2
3. Stand der Technik in Großbrauanlagen	4
3.1. Grundlagen Brauprozess	5
3.1.1. Schrotung des Malzes.....	6
3.1.2. Maischprozess	6
3.1.3. Läutervorgang	7
3.1.4. Kochen der Würze	8
3.1.5. Entfernen des Heißtrubes.....	8
3.1.6. Würzekühlen.....	9
3.1.7. Gärung.....	9
3.1.8. Filtrieren/Abfüllen	9
3.2. Energiekennzahlen in Großbrauanlagen.....	10
3.3. Aktuelle Würzekochsysteme, Stand der Technik	11
3.3.1. Anlagentechnik bei der Würzekochung	13
3.3.2. Verfahrensweise moderner Würzekochsysteme	21
3.4. Einsatz erneuerbarer Energien in Großbrauanlagen.....	31
3.4.1. Solarthermische Integration in den Brauprozess	31
3.4.2. Biogas aus Biertrebern / Brauereireststoffen.....	35
4. Bestehende Kleinbrauanlage	37
4.1. Sudhaus	37
4.1.1. Sudpfanne.....	38
4.1.2. Läuterbottich/Whirlpool.....	38
4.2. Gärraum:	39
4.2.1. Hauptgärbottich:.....	39
4.2.2. Lagertanks:	40

4.2.3.	Zylindrokonische Tanks (ZKT):	41
4.3.	Prozessführung.....	42
4.3.1.	Reinigung der Anlage/CIP.....	42
4.3.2.	Schrotung des Malzes.....	42
4.3.3.	Maischprozess	42
4.3.4.	Läutervorgang	44
4.3.5.	Kochen der Würze	44
4.3.6.	Entfernen des Heißtrubes:.....	45
4.3.7.	Würzekühlen:.....	45
4.3.8.	Gärung.....	46
5.	Automatisierung und Optimierung der Kleinbrauanlage	47
5.1.	Änderungen der Anlage	47
5.2.	Änderungen Gärraum	48
5.3.	Änderungen in der Prozessführung.....	49
5.3.1.	Reinigung der Anlage/CIP.....	49
5.3.2.	Maischprozess	50
5.3.3.	Läutervorgang	50
5.3.4.	Kochen der Würze	51
5.3.5.	Pumpvorgänge/Würzekühlung	52
5.4.	Verfahrensflussbild.....	53
5.4.1.	Ventile.....	53
5.4.2.	Aktoren.....	55
5.4.3.	Sensoren.....	56
5.4.4.	Aktueller Stand.....	57
5.5.	Steuerungskomponenten	59
5.5.1.	Power Panel C70	59
5.5.2.	X20-I/O-System	59
5.5.3.	ACOPOSInverter P74.....	62
5.5.4.	Ventilinselansteuerung XV.Modul.....	62
5.5.5.	Powerlink	63

5.6.	Programmierung der Steuerung	64
5.6.1.	Softwarestruktur	64
5.6.2.	Visualisierung.....	65
5.6.3.	Rezeptverwaltung	66
5.6.4.	Achsenansteuerung	67
5.6.5.	Temperatursteuerung ZKT.....	68
5.6.6.	Pumpvorgänge.....	69
6.	Energiebereitstellung der Kleinbrauanlage	71
6.1.	Energiebereitstellung Brauprozess.....	71
6.2.	Energiebereitstellung Peripherie.....	71
6.3.	Energiebedarf Brauprozess.....	72
6.3.1.	Verwendete Messtechnik	75
6.4.	Energiebedarf Peripherie.....	75
6.4.1.	Heißwasserverbrauch.....	77
6.4.2.	Energiebedarf Heißwasserbereitstellung	77
6.5.	Energiebedarf Teilprozesse	78
6.6.	Kennzahlen	80
6.6.1.	Spezifische Wärmeenergie	80
6.6.2.	Spezifischer Wasserverbrauch	81
6.6.3.	Sudhausausbeute.....	82
6.6.4.	Hopfenverbrauch.....	82
6.7.	Prozesszeitdiagramm	82
7.	Potentiale zur Wärmerückgewinnung.....	84
7.1.	Würzekühlung.....	85
7.2.	Pfannendunst Sudpfanne	87
7.3.	Kühlsystem Lagertanks	88
7.3.1.	Grundlagen Kälteerzeugung:.....	88
7.3.2.	Berechnung des Kühlbedarfes.....	91
7.3.3.	Abwärmepotential Kühlsystem.....	99
7.4.	Zusammenfassung Abwärmepotentiale	101

7.5.	Integration von Wärmerückgewinnungssystemen	102
7.5.1.	Direkte Nutzung der Abwärme aus der Würzekühlung	102
7.5.2.	Wärmerückgewinnungskonzept mit Energiespeicher	103
8.	Evaluierung alternative Wärmebereitstellung.....	109
8.1.	Energieverbrauch Gasthof & Brauerei Linko.....	109
8.1.1.	Gasverbrauch	109
8.1.2.	Stromverbrauch	110
8.2.	Die Kapitalwertmethode	111
8.3.	Energieverbund Brauerei-Heizsystem	112
8.3.1.	Wirtschaftliche Betrachtung	113
8.4.	Biomasseheizwerk Traisen	114
8.4.1.	Wirtschaftliche Betrachtung	115
8.5.	Wärmebereitstellung über Solarthermie	116
8.5.1.	Simulation.....	117
8.5.2.	Wirtschaftliche Betrachtung	119
8.6.	Strombereitstellung über eine Photovoltaik-Anlage (PV).....	120
8.6.1.	Simulation.....	121
8.6.2.	Wirtschaftliche Betrachtung	122
9.	Zusammenfassung und Ausblick	124
10.	Literaturangaben.....	125

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Schema Brauprozess [5]	6
Abbildung 3-2: Wärmebedarf-Benchmark 2012 - 225 Brauereien weltweit [9].....	11
Abbildung 3-3: Prinzipieller Aufbau eines Innenkochers [6]	14
Abbildung 3-4: Sudpfanne mit Innenkocher [6]	14
Abbildung 3-5: Würzpfanne mit Außenkocher [2]	15
Abbildung 3-6: Exergie Anteil an Gesamtenergie im TS-Diagramm [16]	16
Abbildung 3-7: Pfannendunstkondensator [2]	17
Abbildung 3-8: Prinzip Brüdenverdichtung [18].....	18
Abbildung 3-9: Außenkocherpfanne mit mechanischem Brüdenverdichter [19] ...	19
Abbildung 3-10: Prinzip Dampfstrahlverdichter [20]	20
Abbildung 3-11: Einteilung aktueller Würzekochsysteme nach Verfahrensweise [12]	21
Abbildung 3-12: Funktionsprinzip „Stromboli®“ [21]	22
Abbildung 3-13: Dynamische Niederdruckkochung [22].....	23
Abbildung 3-14: Verfahrensschema des Vakuumkochsystems Varioboil [23]	24
Abbildung 3-15: Schonkochverfahren zur Würzekochung [24]	25
Abbildung 3-16: Aufbau einer Hochtemperatur-Würzekochung [14].....	26
Abbildung 3-17: Dünnschichtverdampfung Merlin® [2]	27
Abbildung 3-18: Kochsystem mit Stripping-Kolonne [27]	28
Abbildung 3-19: Strippingsäule (Ecostripper, Meura) [2]	29
Abbildung 3-20: Prozessintegration Solar der Brauerei Göss [28]	32
Abbildung 3-21: Hydraulikschema Solarkeis Brauerei Göss [28]	33
Abbildung 3-22: Einbindung Solarthermie bei der Brauerei Hütt [29]	34
Abbildung 3-23: Hydraulik Solarkreis Brauerei Hütt [1]	34
Abbildung 3-24: Schema des anaeroben Abbauprozesses [36]	36
Abbildung 4-1: Labu Dreigerätesudhaus Basisversion	38
Abbildung 4-2: Außenansicht und Querschnitt des Hauptgärbottichs [37]	40
Abbildung 4-3: Außenansicht und Querschnitt der flachkonischen Lagertanks [37]	41
Abbildung 4-4: Aufbau zylindrokonischer Tank [38].....	41
Abbildung 4-5: Infusionsverfahren Einmaischen bei 50 °C LinkoBräu.....	43
Abbildung 4-6: Plattenwärmetausche Brauerei Linko [39]	46
Abbildung 5-1: Brauanlage „neu“ Gasthof Linko.....	48
Abbildung 5-2: Aufbau Austreibereinheit [42]	51
Abbildung 5-3: Konzept Hopfengabe [42].....	52

Abbildung 5-4: Pneumatisch angetriebenes Scheibenventil (DN25).....	54
Abbildung 5-5: Verfahrensflussbild automatisierte Kleinbrauanlage Gasthof Linko [42]	58
Abbildung 5-6: Aufbau X20 I/O-Modul [45]	60
Abbildung 5-7: Übersicht X20 I/O-System Brauerei Linko	61
Abbildung 5-8: Topographie der Steuerungskomponenten	63
Abbildung 5-9: Softwarestruktur	65
Abbildung 5-10: Visualisierung Brauanlage „neu“ Brauerei Linko	66
Abbildung 5-11: Visualisierung der Rezeptverwaltung Brauerei Linko.....	67
Abbildung 5-12: Schalthysterese Temperatursteuerung ZKT.....	68
Abbildung 5-13: Visualisierung der Temperatursteuerung	69
Abbildung 5-14: Gewichtsverlauf bei einem Pumpvorgang von der Sudpfanne in den Läuterbottich	70
Abbildung 6-1: Momentane Leistungsaufnahme in W über den Zeitraum eines Brauprozesses.....	73
Abbildung 6-2: Energieaufnahme in Wh eines Brauprozesses.....	74
Abbildung 6-3: HT Instruments PQA 823	75
Abbildung 6-4: Energiebedarf Teilprozesse.....	79
Abbildung 6-5: Prozesszeitdiagramm	83
Abbildung 7-1: Heatmap Brauprozess	84
Abbildung 7-2: Kaltdampfprozess [62]	88
Abbildung 7-3: Grundriss Brauerei + Kühlraum.....	90
Abbildung 7-4: Temperaturverlauf beim Wärmedurchgang durch eine ebene Wand aus drei Schichten unterschiedlichen Materials [65]	94
Abbildung 7-5: Jahresdauerlinie Transmissionswärme	95
Abbildung 7-6: Wärmeeintragsprofil durch die Bierherstellung	97
Abbildung 7-7: Jahresdauerlinie Wärmeeintrag.....	100
Abbildung 7-8: Technische Daten Cool Energy Cool Evo 051	101
Abbildung 7-9: Wärmerückgewinnungskonzept Energiespeicher	104
Abbildung 7-10: Zeitlicher Verlauf des Warm- und Heißwassereinsatzes im Brauprozess (Energiespeicher leer).....	107
Abbildung 7-11: Zeitlicher Verlauf des Warm- und Heißwassereinsatzes im Brauprozess	107
Abbildung 7-12: Sankey Diagramm nach aktueller Prozessführung Brauerei Linko	108
Abbildung 7-13: Sankey-Diagramm mit Wärmerückgewinnung Brauerei LINKO ..	108
Abbildung 8-1: Aufteilung Gasverbrauch.....	110
Abbildung 8-2: Konzept Energieverbund Brauerei+Gasthaus.....	113

Abbildung 8-3	Kapitalwerteverlauf Energieverbund / Abwärmepotentiale.....	114
Abbildung 8-4:	Kapitalwerteverlauf Nahwärmeanschluss BioEnergie Traisen	116
Abbildung 8-5:	Konzept Solarthermische Einbindung Gasthof Linko	117
Abbildung 8-6:	Ergebnisse der Jahressimulation (T*SOL 2017)	118
Abbildung 8-7:	Anteil der Solarenergie am Energieverbrauch	119
Abbildung 8-8:	Kapitalwertverlauf Integration Solarthermie	120
Abbildung 8-9:	Konzeptanlage Gasthof Linko	121
Abbildung 8-10:	Kapitalwerteverlauf Photovoltaikanlage	123

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Energiekennzahlen Brauereibranche	10
Tabelle 3-2: Übersicht/ Vergleich Würzekochsysteme in Bezug auf Kochparameter	30
Tabelle 4-1: Maischtemperaturen und Rastzeiten für Pilsner und Wiener Gerstl..	43
Tabelle 5-1: Anlagenbauteilbezeichnungen Verfahrensflussbild	53
Tabelle 5-2: Übersicht Ventile	55
Tabelle 5-3: Übersicht Aktoren.....	56
Tabelle 5-4: Übersicht Sensoren	56
Tabelle 5-5: Beschreibung der verwendeten X20 I/O Module in der Brauerei Linko	61
Tabelle 6-1: Zählerstände Stromverbrauch Brauerei gesamt	76
Tabelle 6-2: Aufteilung Energiebedarf in Brauprozess und Peripherie	76
Tabelle 6-3: Berechnungswerte für die Berechnung des Wärmebedarfs	77
Tabelle 6-4: Aufteilung Energiebedarf in Brauprozess, Heißwasserbereitstellung und Peripherie	78
Tabelle 6-5: Aufteilung des Energiebedarfs auf Teilprozesse.....	79
Tabelle 6-6: Zusammenfassung Energie- und Rohstoffverbrauch pro Doppelsud (Brauerei Linko)	80
Tabelle 6-7: Übersicht Wassermengen pro Doppelsud	81
Tabelle 6-8: Oberes und Unteres Temperaturniveau der Heiz/Kühlprozesse	83
Tabelle 7-1: Ein- und Ausgangstemperaturen Würzekühlung (Plattenwärmetauscher Stufe 1)	85
Tabelle 7-2: Berechnungsparameter zur Bestimmung der übertragenen Wärmemengen.....	86
Tabelle 7-3: Wärmeinhalt Würze Ein- und Ausgangstrom	86
Tabelle 7-4: Berechnungsparameter Pfannendunst	87
Tabelle 7-5: Berechnungswerte Kühlraumpaneele	92
Tabelle 7-6: Wandflächen Kühlraum	92
Tabelle 7-7: Berechnungsparameter Bierwürze.....	96
Tabelle 7-8: Berechnungsparameter Gärwärme	97
Tabelle 7-9: Berechnungsparameter Beleuchtung.....	98
Tabelle 7-10: Wärmelasten Kühlsystem Brauerei Linko	99
Tabelle 7-11: Zusammenfassung Abwärmepotentiale der Brauerei Linko	101
Tabelle 7-12: Übersicht Wassermengen Wärmerückgewinnung / prozessbedingter Wasserverbrauch	105

Tabelle 8-1: Einsparungspotentiale Energieverbund Gasthof-Brauprozess	113
Tabelle 8-2: Simulationsparameter T*SOL 2017	117
Tabelle 8-3: Simulationsparameter PV-Anlage	121
Tabelle 8-4: Simulationsergebnisse PV-Konzeptanlage	122

Abkürzungsverzeichnis

Indizes:

<u>°C</u>	<u>Grad Celsius</u>
<u>B&R</u>	<u>Bernecker und Rainer</u>
<u>ca.</u>	<u>zirka</u>
<u>CAD</u>	<u>computer-aided design</u>
<u>CIP</u>	<u>Cleaning in Place</u>
<u>CO₂</u>	<u>Kohlendioxid</u>
<u>E</u>	<u>Exergie</u>
<u>EER</u>	<u>energy efficiency ratio</u>
<u>etc.</u>	<u>et cetera</u>
<u>Fa.</u>	<u>Firma</u>
<u>hl</u>	<u>Hektoliter</u>
<u>HTW</u>	<u>Hochtemperaturwürzekochung</u>
<u>K</u>	<u>Kelvin</u>
<u>kcal</u>	<u>Kilokalorie</u>
<u>kg</u>	<u>Kilogramm</u>
<u>KJ</u>	<u>Kilojoule</u>
<u>KW</u>	<u>Kapitalwert</u>
<u>kW</u>	<u>Kilowatt</u>
<u>kWh</u>	<u>Kilowattstunde</u>
<u>kWp</u>	<u>Kilowatt Peak</u>
<u>m</u>	<u>Meter</u>
<u>m²</u>	<u>Quadratmeter</u>

Abkürzungsverzeichnis

<u>MJ</u>	<u>Megajoule</u>
<u>mm</u>	<u>Millimeter</u>
<u>MWh</u>	<u>Megawattstunde</u>
<u>PFADUKO</u>	<u>Pfannendunstkondensator</u>
<u>W</u>	<u>Watt</u>
<u>Wh</u>	<u>Wattstunden</u>
<u>U/min</u>	<u>Umdrehungen pro Minute</u>
<u>ZKT</u>	<u>Zylindronischer Tank</u>
<u>z. B.</u>	<u>zum Beispiel</u>

1. Einleitung

Regionale Produkte gewinnen in den letzten Jahren immer mehr an Beliebtheit in der Bevölkerung. Auch die Brauerei Linko verzeichnete vermehrte Nachfrage nach dem hauseigen gebrauten Bier. Aufgrund fehlender Lagerkapazitäten, mussten in den letzten Jahren viele Anfragen abgelehnt werden, da die Produktionsgrenzen der Brauerei erreicht waren. Im Zuge der Überlegungen, wie die Brauerei modernisiert und ausgebaut werden könnte, wurde die Idee einer vollautomatisierten Anlage immer konkreter. Um die bestehende Infrastruktur zu erhalten und den Umbau kosteneffizient zu bewerkstelligen, wurde ein Umbau der bestehenden Brauanlage beschlossen. Dabei wurden auch die Lagerkapazitäten erweitert, um einerseits die gesteigerte Nachfrage abdecken zu können und andererseits die Kapazität der automatisierten Brauanlage ausnützen zu können.

Klimawandel, CO₂-Ausstoß, steigender Energieverbrauch!

Diese Begriffe nehmen einen immer wichtigeren Stellenwert ein. Aktuelle klimapolitischen Zielen wie z. B. die Senkung der Treibhausgasemissionen, liegt eine Effizienzsteigerung und der Ausbau von erneuerbaren Energieträgern zu Grunde. Auch in der Brauereibranche gewinnen diese Aspekte immer mehr an Bedeutung, wie aktuelle Pilotprojekte in Österreichs Großbrauereien belegen. Um auch die Energiebereitstellung in der Brauerei Linko effizienter zu gestalten, wurde während des Umbaus darauf Wert gelegt, mögliche Änderungen in der Energiebereitstellung und der Prozessführung zu evaluieren und zu implementieren. Es wurde versucht den Anforderungen eines effizienten Produktionsprozesses gerecht zu werden und die Energieeffizienzmaßnahmen bereits in die Planung miteinzubinden. Aufgrund der aktuellen Energiepreise und fehlender Wirtschaftlichkeit konnten diese leider oft nicht realisiert werden.

2. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung dieser Masterarbeit kann grundsätzlich in zwei Bereiche unterteilt werden. Der erste Teil der Arbeit umfasst eine Literaturrecherche zum Stand der Technik, innovative Projekte und Maßnahmen in Bezug auf Energieeffizienz in Großbrauanlagen. Der zweite Teil umfasst die Neukonzeptionierung der Kleinbrauanlage in der Gasthofbrauerei Linko, sowie die Dokumentation zur Entwicklung und Programmierung der Steuerungskomponenten. Weiters umfasst die Aufgabenstellung die Evaluierung der eingesetzten Energiemengen, alternativer Prozesswärmebereitstellung und Integration von Wärmerückgewinnungssystemen. Die Evaluierung der Wärmerückgewinnung umfasst die Identifikation von Abwärmepotentialen, die Betrachtung von Wärmespeichern zur zeitversetzten Nutzung von thermischer Energie und die Betrachtung des Energieverbundes Brauerei-Gasthaus.

2.1. Vorgehensweise

Um einen Überblick über Energieeffizienz in Großbrauereien und den Stand der Technik zu erhalten, sind im Rahmen dieser Arbeit die Brauerei Egger in Niederösterreich und die Brauerei Göss in Leoben kontaktiert worden. Die freundschaftliche Beziehung zwischen der Gasthofbrauerei Linko und der Brauerei Egger ermöglichte einen tiefen Einblick in die Produktion der Privatbrauerei Egger. Dabei konnten detaillierte Informationen über Prozessabläufe und Prozesssteuerung gewonnen werden. Informationen zum Stand der Technik im Bereich der Anlagentechnik, Energiekennzahlen und Effizienz konnten ebenfalls durch Fachliteratur gewonnen werden, wobei hier das Hauptaugenmerk auf die Verfahrensweise im Bereich der energieintensiven Prozesse gelegt wurde. In Bezug auf den Einsatz erneuerbarer Energieträger im Brauprozess wurden aktuelle Pilotprojekte in Großbrauanlagen betrachtet und auf Basis der verfügbaren Information vorgestellt.

Die Automatisierung und Neukonzeptionierung der Gasthofbrauerei Linko im Rahmen dieser Arbeit wurde in Kooperation mit der Masterarbeit „Fördertechnische Optimierung einer Brauanlage“ von Moritz Hübl durchgeführt. Die Evaluierung zum Stand der Technik im Bereich Kleinbrauanlagen, Ideen zur Verfahrensentwicklung einzelner Prozessschritte und Optimierungspotentiale konnten auf der Messe „Braubeviale“ in Nürnberg und durch Besichtigungen anderer Kleinbrauanlagen in Niederösterreich und der Steiermark, sowie in der Fachliteratur gesammelt werden.

Um die alternativen Heizmethoden und Optimierungspotentiale der neu designten Brauanlage evaluieren zu können, wurde mithilfe eines Power Quality Analyzers der Strombedarf der elektrisch betriebenen Brauanlage detailliert aufgezeichnet. Der Einsatz fossiler Energieträger und Rohstoffmengen basiert auf Abrechnungen mit (Energie-) Lieferanten und Auskünften der Brauerei Linko und wurde über Kennzahlen, mit Kennzahlen österreichischer Großbrauanlagen verglichen.

Die Abwärmepotentiale wurden auf Basis der Prozessführung und Rezeptur sowie der verfügbaren Daten und Messeinrichtungen evaluiert und in weiterer Folge ein Einbindungskonzept in den Brauprozess erstellt. Auf Basis der Abwärmepotentiale und der prozessbedingten Temperaturniveaus wurde dabei auch die Dimensionierung von Energiespeichern für eine zeitversetzte Nutzung der rückgewonnenen Abwärmepotentiale betrachtet. Die Betrachtung des Energieverbundes Gasthaus-Brauerei bezieht sich auf die Einbindung der Wärmebereitstellung für die Brauerei in das Heizungssystem des Gasthauses. Für eine alternative Wärmebereitstellung des Brauprozesses wurden die Möglichkeiten einer solarthermischen Anlage, einer Photovoltaikanlage, sowie eine Wärmebereitstellung über das anliegende Fernwärmenetz in Bezug auf Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit bewertet.

3. Stand der Technik in Großbrauanlagen

Beim Bierbrauen werden große Volumina erhitzt, gekocht und wieder abgekühlt. Ein Prozess bei dem, beträchtliche Mengen an Energie eingesetzt werden, meist aus fossilen Energieträgern. Vor allem der Bedarf an thermischer Energie zur Beheizung des Prozesses ist signifikant. Energieeffizienz nimmt daher vor allem für große Brauereien einen immer wichtigeren Stellenwert ein. Ein klar definiertes Ziel dabei ist, die Reduktion des klimarelevanten CO₂-Ausstoßes. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es innovativer Energiekonzepte im Bereich der Wärmeintegration und des Einsatzes an erneuerbaren Energien. Große Anstrengungen werden dabei von österreichischen Brauereien und Brauunternehmen vorgenommen. Dieses Kapitel greift die durchgeführten Projekte im Bereich der Effizienzsteigerung auf und soll einen Überblick über verfahrenstechnische und durch Einsatz an erneuerbaren Energien erzielte Verbesserungen in Bezug auf Einsatz fossiler Energieträger und Umweltbelastungen geben.

Stand der Technik ist ein breitgefächertes Begriff. In Bezug auf die Anlagentechnik und Prozessführung sind verschiedenste Technologien, beispielsweise bei der Würzekochung, entwickelt worden. Wobei für jede Brauerei, beziehungsweise für die entsprechende Rezeptur, die optimale Lösung evaluiert werden muss. In Bezug auf Anlagentechnik und Prozessführung werden im folgenden Kapitel Prozessführungen aktueller Würzekochsysteme, die Anlagentechnik und Wärmerückgewinnungen im Bereich der Würzekochung behandelt.

Für den Einsatz erneuerbarer Energieträger im Brauprozess bietet sich aufgrund des oft hohen Grundlastbedarfs, sowie der Möglichkeit prozessinterne Speicher einzubinden, Wärmebereitstellung mittels thermischer Solaranlagen an. Bisher werden thermische Solaranlagen fast ausschließlich zur Warmwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung im Wohnbereich verwendet. Im industriellen Bereich, wie beispielsweise in der Brauindustrie, lassen sich diese deutlich wirtschaftlicher betreiben. Aktuell ist auch die Thematik der Biogasgewinnung aus Reststoffen des Brauprozesses. In diesem Kapitel werden aktuelle Pilotprojekte zur Einbindung solarthermischer Anlagen und Biogasanlagen in den Brauprozess vorgestellt. [1]

3.1. Grundlagen Brauprozess

Die Basis der Bierherstellung bilden drei aufeinanderfolgende biochemische Prozesse, die Bildung von Enzymen im keimenden Getreidekorn, den Abbau von Stärke zu Zucker durch diese Enzyme und die anschließende Vergärung des Zuckers zu Alkohol [2]. Die Brautradition besteht seit Jahrhunderten und Bier gilt als das älteste Volksgetränk, was auch durch das „altbairische“ Reinheitsgebot und später „Deutsche Reinheitsgebot“, welches im Jahre 1516 erlassen wurde, unterstrichen wird. Das Reinheitsgebot selbst gilt als das älteste Lebensmittelgesetz und besagt, dass Bier nur aus den Rohstoffen Malz, Hopfen und Wasser hergestellt werden darf. Die gezielte Hefegabe zur Vergärung war zu dieser Zeit nicht bekannt. Etwas später wurde Hefe jedoch als vierte Zutat in das Reinheitsgebot aufgenommen.[3]

Das führende deutsche Lehrbuch zur Ausbildung von Brauern und Mälzern: „Technologie Brauer und Mälzer“ von Wolfgang Kunze [2] unterteilt den Bierherstellungsprozess in „Herstellen des Malzes“, „Herstellen der Würze“ und „Herstellen des Bieres“. Der eigentliche Brauprozess bezeichnet die Gewinnung einer verzuckerten Flüssigkeit (Würze) aus Malz oder einem Malzgemisch mithilfe von Wasser und Hopfen (Maischprozess), und in weiterer Folge die Vergärung der Würze durch Hefe (Gärprozess) [4]. In **Abbildung 3-1** ist der Brauprozess schematisch dargestellt.

Die Aufgliederung des Brauprozesses ergibt nach [4] folgende Arbeitsstufen:

- Schrotung des Malzes (und anderer Zusatzstoffe)
- Herstellung einer Extraktlösung (Würze)
- Trennung der Würze von den Maischrückständen (Läutervorgang)
- Kochen der abgeläuterten Würze mit Hopfen
- Entfernen des Heißtrubes
- Abkühlung der gekochten Würze
- Hauptgärung in offenen oder geschlossenen Gefäßen im sog. Gärkeller
- Nachgärung und Reifung des Bieres in geschlossenen Gefäßen im Lagerkeller
- Filtration und Abfüllung des konsumreifen Bieres

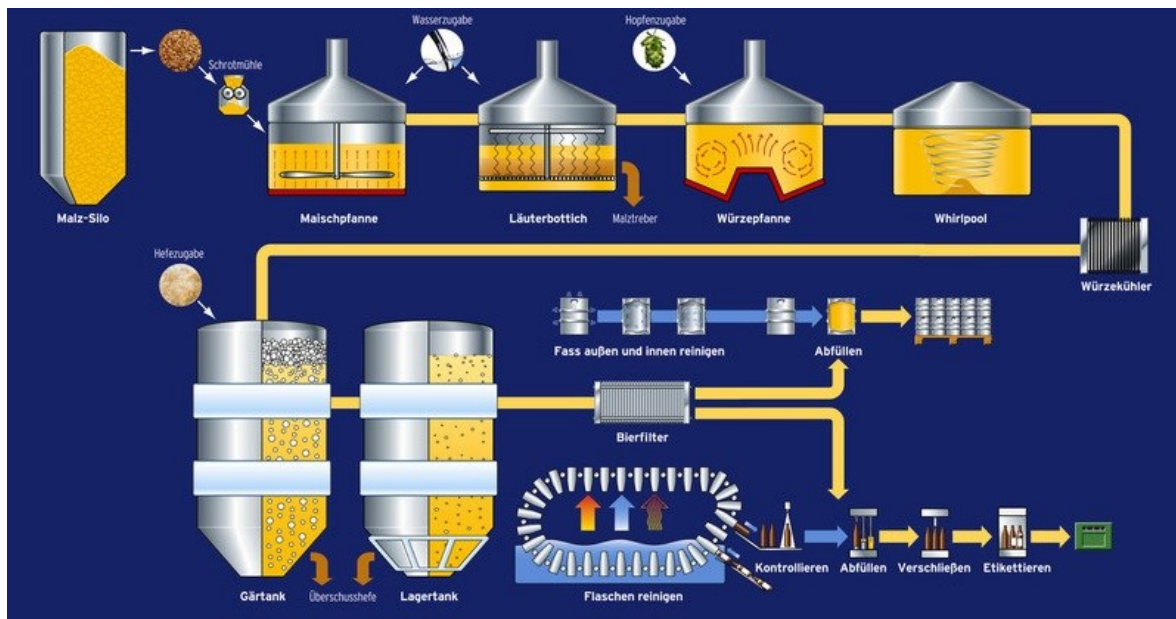


Abbildung 3-1: Schema Brauprozess [5]

3.1.1. Schrotung des Malzes

Die Schrotung des Malzes bezeichnet den mechanischen Zerkleinerungsvorgang des Malzes. Für den weiteren Brauprozess ist die Schrotqualität von grundlegender Bedeutung. Die Schrotqualität bestimmt die spätere Zusammensetzung der Würze, die Sudhausausbeute (siehe Abschnitt 6.6.3) und das Trebervolumen [2, 4, 6]. Letzteres bezeichnet dabei die festen Malzrückstände, die beim späteren Abläutern (siehe Abschnitt 3.1.3) von der Würze abgetrennt werden [3]. Höhere Sudhausausbeuten werden durch höher Feinheitsgrade bei der Schrotung bestimmt, die Feinheit der Schrotung bestimmt außerdem die Geschwindigkeit bei den chemisch-biologischen Umsetzungen beim späteren Maischprozess. Bei modernen Maischfiltern (zur späteren Abtrennung der Malzrückstände) ist Feinstschrotung Stand der Technik. Bei Verwendung der weit verbreiteten Läuterbottiche, darf Feinstschrot hingegen nicht angestrebt werden, da die Spelzen (Haut des Malzkornes) beim Abläutern im Läuterbottich als Filtermaterial gebraucht werden [6].

3.1.2. Maischprozess

Der Maischprozess ist der wichtigste Vorgang zur Herstellung der Würze. Beim Maischen wird das vorab geschrotete Malz mit dem Brauwasser im sogenannten Maischebottich vermischt (vermaischt). Der Zweck des Maischens besteht darin, die im Malz enthaltene Stärke in möglichst viel vergärbaren Zucker und unvergärbare aber dauernd lösliche Dextrine umzuwandeln. Die Hauptmenge an Extrakt entsteht durch die Tätigkeit der Malzenzyme mithilfe der die gelösten Inhaltsstoffe des Malzes

als Extraktstoffe gewonnen werden. Die Aktivität der Malzenzyme ist hauptsächlich temperaturabhängig, wobei die Aktivität jedes spezifischen Enzymes einen Optimalwert bei einer Optimaltemperatur erreicht. In der Prozessführung des Maischprozesses wird daher Maische unter Einhaltung bestimmter Rastzeiten, bei den jeweiligen Optimaltemperaturen, auf bis zu 78 °C erhitzt. Nach Art der Temperaturerhöhung unterscheidet man in zwei Gruppen von Maischeverfahren:

- Infusionsverfahren
- Dekoktionsverfahren

Beim Infusionsverfahren erhitzt man das gesamte Maischvolumen unter Einhaltung der Rastzeiten bis zur sogenannten Abmaischetemperatur. Beim Dekoktionsverfahren hingegen wird die Temperaturerhöhung erreicht, indem ein Teil der Maische abgetrennt und gekocht wird. Durch Zurückpumpen dieses Anteils wird die Temperatur der Gesamtmaische erhöht. [2, 6]

3.1.3. Läuervorgang

Nach Beendigung des Maischprozesses liegt die Maische in einem wässrigen Gemisch aus gelösten und ungelösten Stoffen vor. Die wässrige Lösung der Extraktstoffe wird als Würze, die ungelösten Stoffe als Trebern bezeichnet. Für die weitere Bierherstellung wird nur die Würze verwendet, dazu wird eine vollständige Abtrennung der Trebern angestrebt. Dieser Trennvorgang wird als Abläutern oder Läuervorgang bezeichnet. Die Würzegewinnung im Läuervorgang wird in zwei Stufen unterteilt:

- Ablauf der Vorderwürze (Filtrationsprozess, Hauptguss)
- Auswaschen der Trebern nach dem Filtrationsprozess (Nachgüsse)

Das Auswaschen der Trebern wird durchgeführt, da in den abgefilterten Trebern Extraktstoffe zurückbleiben. Das Auswaschen wird mit heißem Wasser durchgeführt und als Anschwänzwasser bezeichnet, wobei sich die Wassermenge an der gewünschten Konzentration der Würze orientiert. Der Läuervorgang erfolgt in modernen Sudhäusern entweder im sogenannte Läuerrbottich, im Maischfilter oder im Strainmaster. Der Läuerrbottich bezeichnet das „traditionelle“ und damit weit verbreitete Läuerrgerät, im Läuerrbottich ist ein perforierter Senkboden angebracht an dem sich die ungelösten Bestandteile der Maische absetzen. Dabei kommt es zur Ausbildung eines natürlichen Filterkuchens durch die Spelzen des Malzkornes. Die Lösung fließt in der klassischen Prozessführung durch die Öffnungen im Boden, durch das Läuerrsystem, in die Sudpfanne zur anschließenden Würzekochung. [2, 6]

3.1.4. Kochen der Würze

Die abgeläuterte Würze wird anschließend in der Würzpfanne gekocht. Dabei werden durch Zugabe von Hopfen die Hopfenbitter- und Aromastoffe in die Würze überführt. Beim Kochen der Würze finden verschiedenste Vorgänge von Bedeutung für die Bierherstellung statt:

- Wasserverdampfung, um eine gewünschte Würzekonzentration einzustellen
- Zerstörung der Malzenzyme
- Stabilisierung, Sterilisation der Würze
- Lösung der Hopfenwertbestandteile
- Ausdampfen von unerwünschten Aromastoffen
- pH-Wert-Absenkung der Würze
- Thermische Belastung der Würze

Obwohl das Kochen der Würze einen einfachen physikalischen Prozess darstellt, wurden in der Entwicklung von Kochsystemen mit anderen Heizmittel, anderen physikalischen Parameter Auswirkungen auf die spätere Bierqualität beobachtet, die von der konventionellen Würzeanalyse nicht erfasst werden konnten. [2, 6]

3.1.5. Entfernen des Heißtrubes

Beim Kochen der Würze bildet sich der sogenannte Heißtrub, der Heißtrub wird durch Hitzekoagulation von Stickstoffsubstanzen gebildet. Der Heißtrub muss entfernt werden da dieser für die Bierherstellung nicht relevant ist und negative Auswirkungen auf die Klärung der Würze und in weiterer Folge für die Filtration des Bieres hat. Die Heißtrub Partikel sind etwas schwerer als die Würze und lassen sich so über Sedimentation oder Filtration leicht abtrennen. Die Entfernung des Heißtrubs erfolgt üblicherweise in einem Kühlschiff, in einem Setzbottich oder einem Whirlpool. Das Kühlschiff ist das „traditionelle“ Gerät zur Trubentfernung, ein flaches offenes Gefäß in welches die Würze ausgeschlagen wird. Der Heißtrub wird dabei durch Sedimentation abgeschieden. Umso großflächiger das Kühlschiff ist, desto schneller erfolgt die Abscheidung. In modernen Sudhäusern werden, aufgrund von Kontaminationen die in die Würze gelangen können und dem Arbeitsaufwand, Kühlschiffe nicht mehr eingesetzt. Ein Setzbottich arbeitet ebenfalls nach dem Prinzip der Sedimentation, wobei hier die Grundfläche geringer gehalten und die Würze durch ein Schwenkrohr von den oberen Schichten abgezogen wird. Beim Setzbottich mindert eine Dunsthaube die Kontaminationsgefahr. In modernen Sudhäusern wird vorwiegend der Whirlpool zur Heißtrubabtrennung eingesetzt. Der Whirlpool ist ein zylindrisches Gefäß in dem die Würze tangential eingepumpt wird.

Durch die entstehende Drehströmung werden die schwereren Trubpartikel in Form eines Kegels in der Mitte des Gefäßes abgeschieden. [2, 6]

3.1.6. Würzekühlen

Nach der Heißtrubabscheidung, muss die Würze zur Vergärung auf die sogenannte Anstelltemperatur für die Vergärung abgekühlt werden. Die Abkühlung ist erforderlich, weil Hefe nur bei niedrigen Temperaturen vergären kann. Die heiße Würze wird rasch über Plattenwärmetauscher auf Anstelltemperatur gekühlt, ein längeres Verweilen bei Zwischentemperaturen erhöht die Gefahr der Vermehrung schädigender Mikroorganismen. Die Anstelltemperatur beträgt für untergärige Hefe ca. sechs °C, für obergärige Hefe ca. 20 °C. [2, 6]

3.1.7. Gärung

Die Gärung bezeichnet die Umwandlung der Würze in Bier, dazu müssen die Enzyme der Hefe den in der Würze enthaltenen Zucker zu Ethanol und Kohlendioxid vergären. Bei der Vergärung des Jungbieres unterscheidet man im Wesentlichen in zwei verschiedene Verfahren, dem „klassischen“ Verfahren im Gär- und Lagerkeller und der Gärung in Zylindronischen Tanks (ZKT). Beim klassischen Verfahren wird die Gärung in offenen Gärbottichen und die anschließende Lagerung in eigenen Lagertanks durchgeführt. Der Übergang von Gärung in Lagerung wird Schlauchen genannt, wobei der Zeitpunkt mit der Messung des Vergärungsgrades bestimmt wird. Bei der Gärung in ZKT (Stand der Technik) wird Gärung und Lagerung in einem Behältnis durchgeführt und daher auch als „Eintankverfahren“ bezeichnet. [2]

3.1.8. Filtrieren/Abfüllen

Je nach Biersorte werden nach der Lagerung die Hefereste (trübend) entfernt. Bei hefetrüben Weizenbieren werden diese nur grob gefiltert und bei Zwicklbieren verbleiben diese im Fertigprodukt. Beim Filtrieren werden die noch enthaltenen Hefezellen und andere Trübungsstoffe abgetrennt. Beim Filtrieren unterscheidet man in folgende Abscheidemechanismen:

- Sieb- oder Oberflächenfiltration
- Tiefenfiltration
- Adsorption

Bei der Sieb- oder Oberflächenfiltration können die abzuscheidenden Partikel die Poren des Filtermittels nicht durchdringen und werden dadurch in einer immer dicker werdenden Schicht abgeschieden. Bei der Tiefenfiltration werden hochporöse Materialien eingesetzt. Die Abscheidung erfolgt dabei durch einen mechanischen

Siebeffekt (Partikel werden aufgrund der Größe zurückgehalten, Verstopfung der Poren). Bei der Adsorption erfolgt die Abscheidung aufgrund unterschiedlicher elektrischer Ladungen wodurch feine Teilchen festgehalten werden. In der Praxis werden Kombination aus Sieb und Adsorptionswirkung eingesetzt. Nach der Filtrierung wird das fertige Bier in die jeweiligen Gebinde abgefüllt. [2]

3.2. Energiekennzahlen in Großbrauanlagen

Um verschiedene Brauereien in Bezug auf Energieeinsatz und Rohstoffverbrauch untereinander vergleichen zu können und den Betrieben selbst einen Anhaltspunkt über die eigenen spez. Energieeinsätze zu geben, stellen Energiekennzahlen ein geeignetes Hilfsmittel dar. Im folgenden Abschnitt werden die gängigsten Kennzahlen und Benchmarks vorgestellt.

Energiekennzahlen und Sparpotentiale für die Brauereibranche werden unter anderem in [7 bis 9] vorgestellt. Die wichtigsten Energiekennzahlen der Branche sind in Tabelle 3-1 dargestellt. Als Bezugsgröße dient üblicherweise der Produktionsausstoß in hl.

Tabelle 3-1: Energiekennzahlen Brauereibranche

Kennzahl	Energiegröße	Bezugsgröße	Einheit
Spezifischer Strombedarf	Strombedarf	Produzierte Menge Bier	kWh / hl
Spezifische Wärmeenergie	Bedarf thermischer Energie	Produzierte Menge Bier	MJ / hl
Spezifischer Wasserverbrauch	Wasserbedarf	Produzierte Menge Bier	hl / hl
Spezifischer CO ₂ -Ausstoß	CO ₂ -Emission	Produzierte Menge Bier	kg CO ₂ / hl

Kennzahlen werden hauptsächlich für Benchmarking zwischen den einzelnen Brauereien verwendet. Aufgrund des für die Brauereibranche signifikanten thermischen Energiebedarfs ist vor allem der Vergleich der spez. Wärmeenergie interessant (vgl. *Abbildung 3-2*).

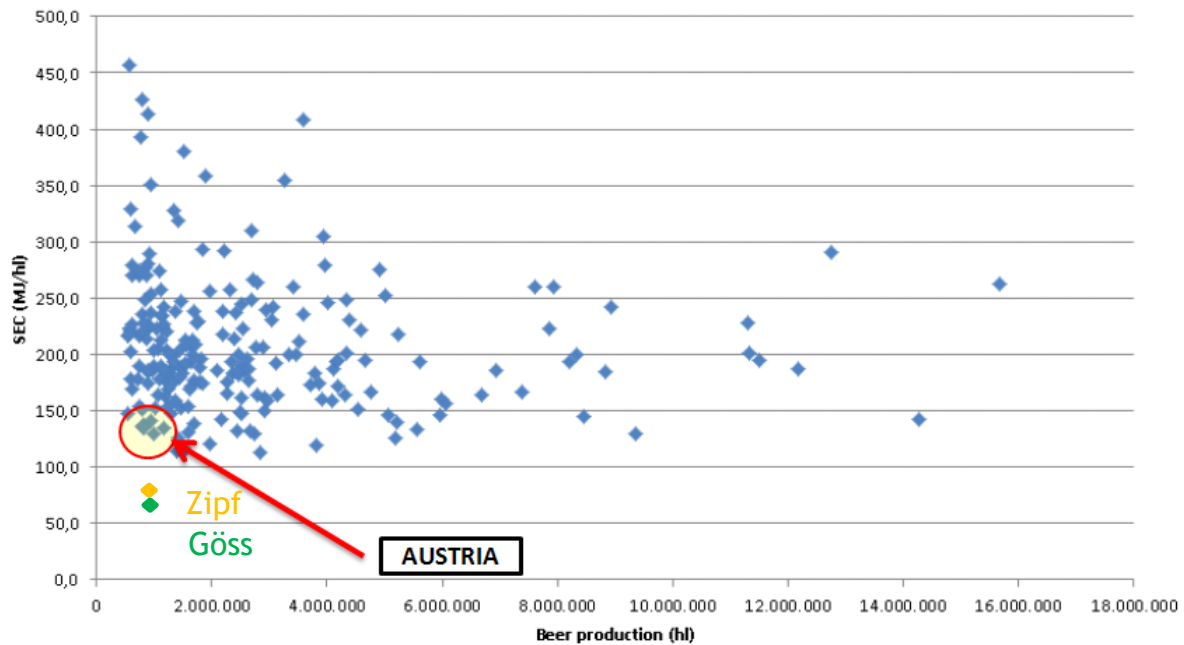


Abbildung 3-2: Wärmebedarf-Benchmark 2012 - 225 Brauereien weltweit [9]

Aus **Abbildung 3-2** ist gut ersichtlich, dass österreichische Brauereien weltweit zu den Besten im Bereich Energieeffizienz zählen. Die Bestwerte der Brauunion Österreich in Bezug auf den Wärmebedarf erzielten beispielsweise die Brauereien Göss mit 69,5 MJ/hl und die Brauerei Zipf mit 81,2 MJ/HL (2015) [10]. Diese Werte liegen deutlich unter den in **Abbildung 3-2** dargestellten Benchmarks, wobei die Entwicklung des Wärmebedarfes der Brauunion durch verschiedenste Projekte im Bereich Energieeffizienz in den letzten Jahren abgenommen hat.

3.3. Aktuelle Würzekochsysteme, Stand der Technik

Im folgenden Abschnitt wird der Stand der Technik, im Prozessschritt des Würzekochens in Bezug auf die Anlagentechnik und neuen modernen Ansätzen in der Verfahrensweise, dargestellt. Das Würzekochen ist energietechnisch einer der wichtigsten Prozesse beim Bier brauen, da hierfür etwa 40-50 % des gesamten Wärmebedarfs für die Brauerei benötigt werden [1, 2].

Die Aufgaben der Würzekochung sind weitreichend im Bierbrauprozess. Unter anderem dient die Würzekochung zur Verdampfung des überflüssigen Wassers, Zerstörung der Malzenzyme, Sterilisierung der Würze bis hin zur Bildung und Ausscheidung von Eiweiß- und Gerbstoffverbindungen. Für genauere Information sei hier auf die entsprechende Literatur verwiesen. [6]

Aufgrund der Energieintensität des Würzekochens wurden im Laufe der Zeit verschiedenste Technologien entwickelt, um Energie zu sparen oder aus den entweichenden Dampfschwaden rückzugewinnen. Der Kochprozess ist aufgrund der eingesetzten Energiemenge und des hohen Abwärmepotentials der entweichenden Brüden (Verdampfungsenthalpie) der zentrale Prozess für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung in Brauereien. Energieeinsparungen werden bei modernen Kochsystemen hauptsächlich durch Energierückgewinnungssysteme (siehe Abschnitt 3.3.1.2) und in der Prozessführung durch eine gesenkte Verdampfungsrate¹, beziehungsweise einer Verkürzung der Kochzeit erzielt.

Die Absenkung der Verdampfungsrate verfolgt dabei den Ansatz eines erhöhten Ausschlagsvolumen bei reduziertem Energieeinsatz. Zum Beispiel, ausgehend von einem konventionellen Kochsystem (atmosphärische Siedetemperatur) mit 12 % Verdampfungsrate, werden ca. 7 kWh/hl² für die Aufbringung der Verdampfungsenthalpie benötigt. Reduziert man die Gesamtverdampfung im Kochprozess auf 4% werden nur mehr ca. 2,4 kWh/hl benötigt. Die Reduzierung der Verdampfungsrate richtet sich danach, ob das mögliche Abwärmepotential außerhalb des Sudhauses genutzt werden kann. Eine zu weite Absenkung der Verdampfungsrate kann beispielsweise dazu führen, dass Energiespeicher im Energieverbund, aufgrund zu geringer Abwärme aus dem Kochprozess, nachgeheizt werden müssen. Effiziente Energieverbunde in Brauereien sind daher ausgelegt, dass möglichst wenig Überschuss an Warm- und Heißwasser durch die Wärmerückgewinnung anfällt, welcher nicht in Brau- oder Peripherieprozessen wie der Gebindereinigung verwertet werden kann. In Bezug auf die Verkürzung der Kochzeit im Brauprozess gilt, je höher die Temperatur, desto schneller die chemischen Reaktionen (Lösungs- und Umwandlungsvorgänge) und desto kürzer die notwendigen Kochzeiten. Die Systeme zur Erhöhung der Temperatur werden als Hochtemperaturwürzekochung (siehe Abschnitt 3.3.2.6) und Niederdruckkochung (siehe Abschnitt 3.3.2.3) bezeichnet. Limitierende Faktoren der Temperaturerhöhung sind dabei geschmackliche Aspekte und erhöhte Reinigungsintervalle. Die Hochtemperaturwürzekochung wird aktuell bis zu Kochtemperaturen von 135 °C durchgeführt. [11]

Um daher den strengen Auflagen in der Lebensmittelindustrie und auch den von den Brauereien selbst gestellten Anforderungen im Bereich Aroma und Geschmack gerecht zu werden und gleichzeitig die gewünschten Energieeinsparungen zu erzielen, bedarf es ausgeklügelter Prozessführungen und Technologien.

¹ Verdampfungsrate in % der gesamten Würzmenge am Beginn des Kochprozesses [2]

² Bei atmosphärischen Bedingungen (Verdampfungsenthalpie 2257 kJ/kg)

3.3.1. Anlagentechnik bei der Würzekochung

Das Würzekochen wird in sogenannten Würzepfannen vorgenommen. Die eingesetzten Werkstoffe bei Sudpfannen sind Stahl, Kupfer oder nichtrostender Stahl. Wobei nach Stand der Technik in modernen Sudhäusern größtenteils nur noch Edelstahl eingesetzt wird.[4]

Als Energieträger zur Beheizung der Sudpfanne/Würzepfanne ist in Großbrauanlagen die heute übliche Form vorrangig Dampf [2]. Die Erzeugung des Dampfes bewerkstelligen beispielsweise Erdgas-Dampferzeuger oder Biomasse-Dampferzeuger (wie in der im Zuge dieser Arbeit besuchten Privatbrauerei Fritz Egger), wobei hier der Trend zu Biomassensystemen zeigt.

3.3.1.1. Heizsysteme

Große Energieeinsparungen und Reduzierungen in der Verdampfungsrate konnten in den 1970er Jahren mit der Entwicklung des Innenkochers, des Außenkochers und der Hochtemperatur-Würzekochung (siehe Abschnitt 3.3.2.6) erreicht werden [12, 13]. Diese Systeme sowie Verfahrensvarianten sind bis heute im Einsatz oder Bestandteil moderner Würzekochsysteme.

Innenkocher:

Beim Innenkocher (siehe **Abbildung 3-3**) handelt es sich meist um einen senkrecht stehenden Rohrbündelwärmetauscher. Die Bezeichnung Innenkocher bezieht sich auf den Installationsort des Wärmetauschers in der Sudpfanne (siehe **Abbildung 3-4**). Die Umwälzung des Pfanneninhalts erfolgt nach dem Naturumlaufprinzip. Die Würze wird in den Rohrbündeln aufgeheizt, wodurch zwischen Kocherein- und Kocherauslauf ein Temperatur- und Dichteunterschied auftritt. An den Wärmetauscherrohren tritt eine Verdampfung der Würze auf (Blasenbildung). Aus dem Dichteunterschied und der Verdampfung resultiert ein Auftrieb, der den Naturumlauf der Würze in der Sudpfanne gewährleistet. Um den Naturumlauf zu steuern befindet sich oberhalb des eigentlichen Kochers ein Staukonus, der einen Gegendruck ausübt (ermöglicht leicht erhöhte Kochtemperaturen z. B. 101,5-102 °C) und die Würze über ein Rohr zum Verteilerschirm leitet. Ein Problem beim Innenkocher ist, dass während der Aufheizphase auftretende Pulsieren, welches durch Überhitzung der Würze in den Kocherrohren hervorgerufen wird (thermische Schädigung der Würze). [6, 14]

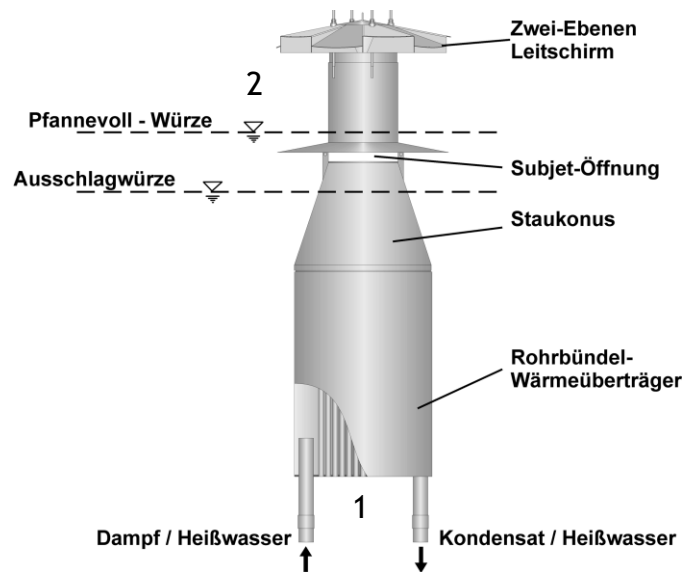


Abbildung 3-3: Prinzipieller Aufbau eines Innenkochers [6]

(1) Kochereinlauf (2) Kocherauslauf

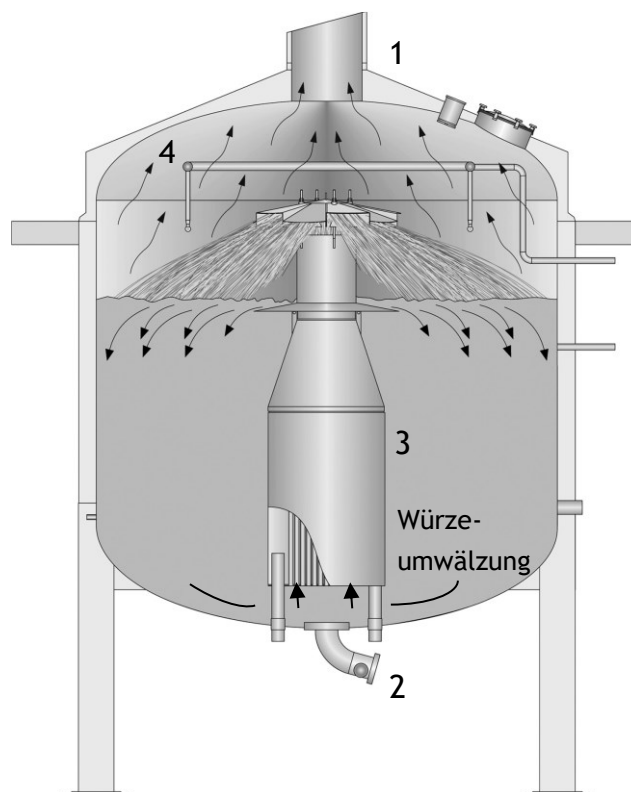


Abbildung 3-4: Sudpfanne mit Innenkocher [6]

(1) Dunstschlott (2) Würzein- und -auslauf der Sudpfanne (3) Innenkocher mit Verteilerschirm (4) Dunsthäube

Außenkocher:

Außenkocher werden wie Innenkocher meist als Rohrbündelwärmetauscher ausgeführt. Beim Außenkocher wird die Würze ständig aus dem Unterteil der Sudpfanne abgezogen und mittels einer Pumpe durch den Außenkocher gepumpt. Der Pfanneninhalt wird so typisch sechs bis acht-mal pro Stunde durch den Kreislauf gepumpt (siehe **Abbildung 3-5**). Die Würzetemperatur ist durch ein Drosselventil einstellbar. Die Würze prallt in der Pfanne auf einen Verteilerschirm, durch den ein kegelförmiges Sprühbild erzeugt wird. Durch den Außenkocher ergeben sich technologische Vorteile, wie gute Durchmischung, große Variabilität bei der Heizflächengröße, sowie definierte Heißhaltezeiten im Kocher durch Anpassen des Würzevolumenstroms über die Pumpleistung. [2, 11, 14]

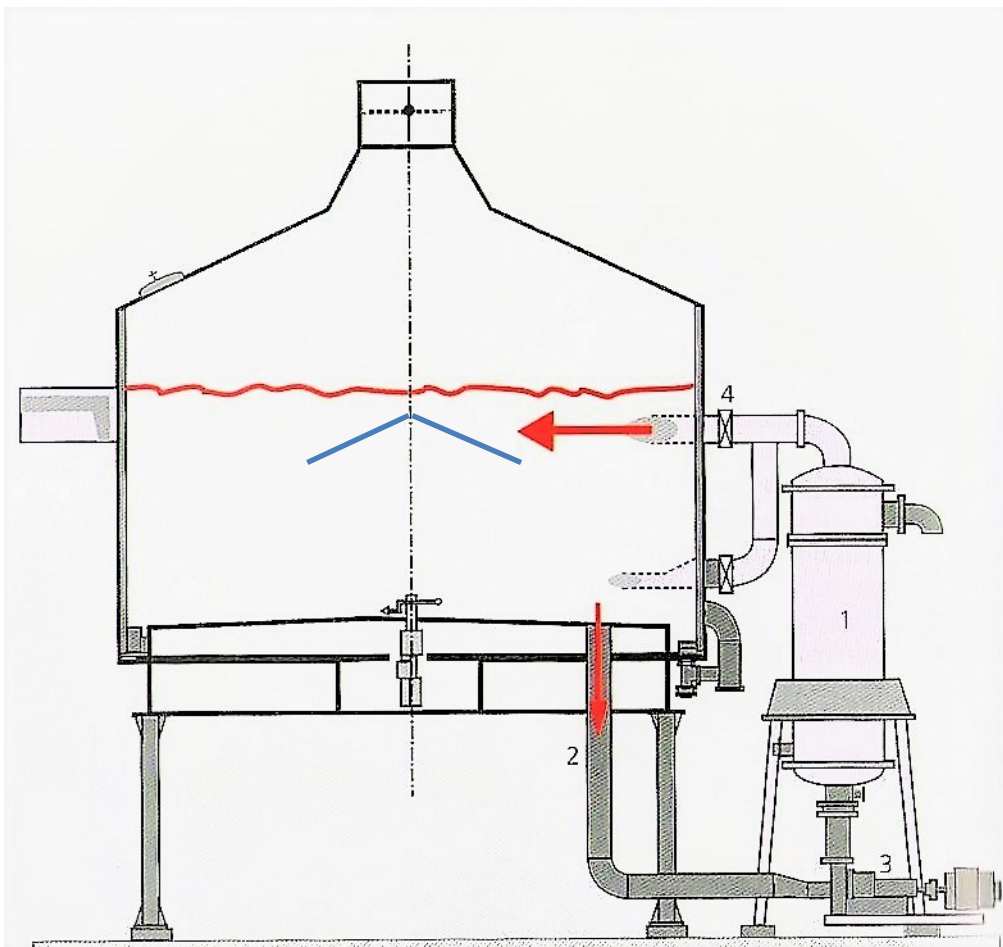


Abbildung 3-5: Würzpfanne mit Außenkocher [2]

- (1) Außenkocher (2) Ansaugleitung (3) Druckerhöhungspumpe
(4) Drosselventill

3.3.1.2. Energie & Wärmerückgewinnungssysteme

Neben der Heizsysteme stellen Energierückgewinnungssysteme im Bereich der Würzekochung einen weiteren wichtigen Ansatzpunkt dar. Das Hauptproblem von Energierückgewinnung im Brauprozess ist, dass der Prozess durchgängig im Niedertemperaturbereich stattfindet. Um in Großbrauereien maximale Wärmerückgewinnungen zu erreichen, ist eine sogenannte Pinch Analyse, wie sie unter anderem im Rahmen von [15] für die Brauereien Göss, Puntigam und Schladming durchgeführt wurde, unabdingbar. Eine Pinch Analyse bezeichnet die Identifizierung von Wärmequellen und Wärmesenken und eine Analyse nach exergetischen Gesichtspunkten (vgl. Exergie). Wärmerückgewinnungssysteme sind daher darauf ausgerichtet, Wärme bei so hohen Temperaturniveaus wie möglich rückzugewinnen. Im Vergleich zu anderen Prozessschritten im Brauprozess ist das Temperaturniveau bei der Abwärme des Würzekochens hoch und bietet damit das größte Potential für Wärmerückgewinnung.

Exergie

Die Exergie (E_Q) bezeichnet die minimale Arbeit, die bei einer reversiblen Überführung eines Systems von einem gegebenen Anfangszustand in den gewollten Zustand benötigt wird. Die Exergie ist somit jener Anteil der Energie, der Arbeit verrichten kann, wenn dieses System in das thermodynamische Gleichgewicht mit seiner Umgebung gebracht wird, beziehungsweise jener Anteil der sich in jede andere Energieform umwandeln lässt. Der total entwertete Anteil einer Energieform, der sich nicht mehr umwandeln lässt wird als Anergie (B_Q) bezeichnet. Für einen Stoffstrom beispielsweise bezeichnet die spezifische Exergie (bezogen auf Massenstrom des Stoffes) die Arbeitsfähigkeit dieses Fluids und kann als Potential zwischen zwei thermodynamischen Zuständen angesehen werden (siehe **Abbildung 3-6**). [16]

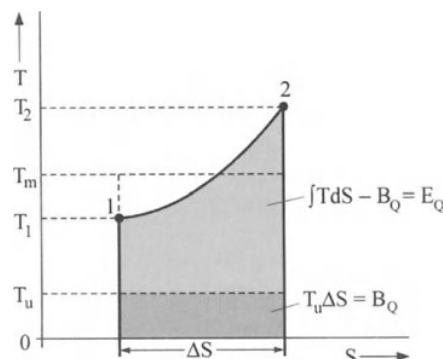


Abbildung 3-6: Exergie Anteil an Gesamtenergie im TS-Diagramm [16]

T_U = Umgebungstemperatur; B_Q = Anergie; T_M = Mittlere Temperatur

Pfannendunstkondensator (PFADUKO)

Um Geruchsemissionen zu vermeiden und Energie einzusparen, werden Brüden aus der Würzekochung normalerweise in sogenannten Pfannendunstkondensatoren kondensiert. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist ein Pfannendunstkondensator ein liegender Rohrbündelapparat [17]. Er besteht aus, liegend angeordneten Wärmetauschern mit Rohrbündeln aus Kupfer oder Edelstahl, die von enthärtetem Wasser durchströmt werden. Im Gegenstrom zur Brüdenkondensation wird Heißwasser erzeugt, dass normalerweise in Energiespeichern für Reinigungsanwendungen oder zur Würze Erhitzung des nächsten Sudes im Brauprozess verwendet wird (siehe *Abbildung 3-7*).

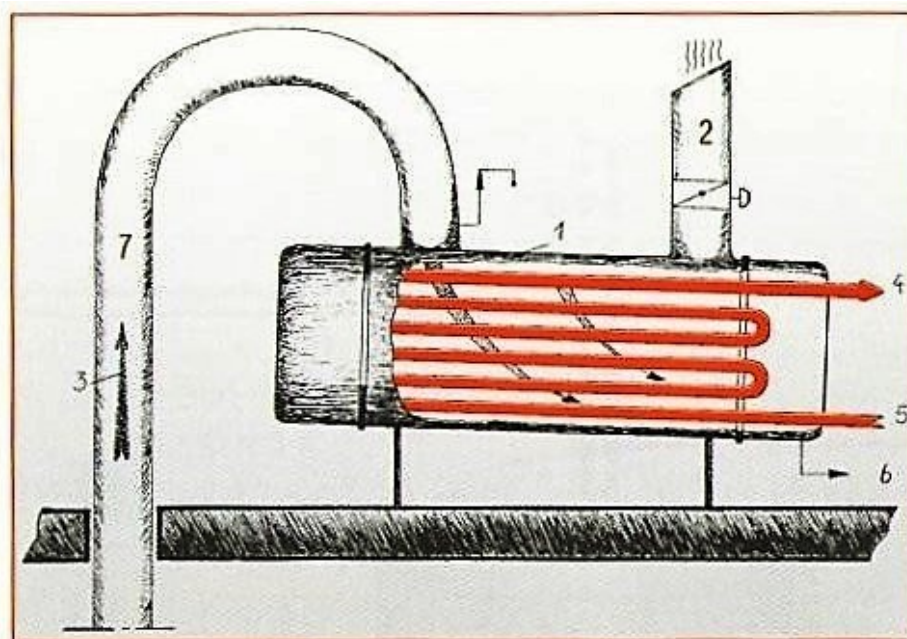


Abbildung 3-7: Pfannendunstkondensator [2]

- (1) Rohrbündel-Wärmeübertrager (2) Dunstschlot (3) Wasserdampf (4) Heißwasseraustritt (5) Warmwassereintritt (6) Kondensatablass (7) Brüdenrohr von der Pfanne

Brüdenverdichtung:

Die Brüdenverdichtung ist ein weiterer Ansatz Energie aus den beim Kochen entstehenden Brüden rückzugewinnen. Bei der Brüdenverdichtung werden die Brüden, durch einen Verdichter komprimiert und damit auf ein höheres Energieniveau gehoben. Damit lassen sich die Brüden eines Verdampfers zum Heizen im selben Apparat verwenden, wenn die Kondensationstemperatur der verdichteten Brüden über der Siedetemperatur der aufzuheizenden Lösung liegt. In **Abbildung 3-8** ist das Prinzip einer Brüdenverdichtungsanlage (links), sowie das Temperatur-Entropie-Diagramm (rechts) dargestellt. Für die Verdichtung der Brüden werden zwei verschiedenen Systeme eingesetzt, die mechanische und die thermische Brüdenverdichtung. [18]

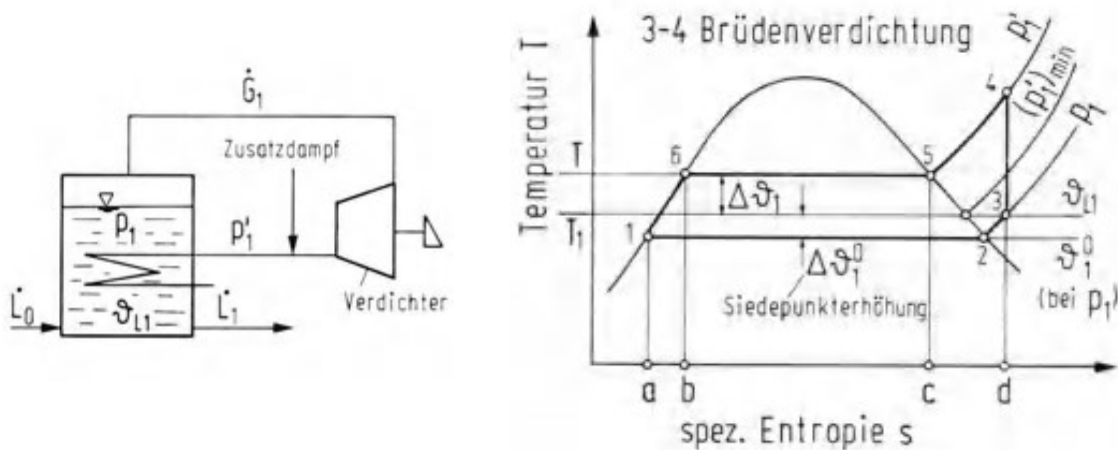


Abbildung 3-8: Prinzip Brüdenverdichtung [18]

- Verdampfung 1→2
- Brüdenverdichtung 3→4
- Brüdenkondensation 5→6

Die im Verdichter zugeführte reversible mechanische Arbeit pro kg Dampf wird durch die Enthalpiedifferenz $h_4 - h_3$ beschrieben. Die Energieeffizienz der Brüdenverdichtung hängt von der Leistungszahl ϵ ab (siehe Formel (3.1)). Die Leistungszahl soll möglichst groß sein, erreicht wird eine möglichst hohe Leistungszahl mit kleinen Druckverhältnissen im Verdichter. Kleine Druckverhältnisse wiederum wirken sich in geringen Temperaturgefällen (T/T_1), wodurch Heizflächen entsprechend groß ausgeführt werden müssen. Das optimale Druckverhältnis lässt sich auf Basis der Investitionskosten und Energiekosten für das jeweilige Druckverhältnis bestimmen. [18]

$$\varepsilon = \frac{\text{Nutzbare Verdampfungs- u. Überhitzungswärme}}{\text{Verdichtungsenergie}} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\text{Flächen "bc56" und "cd45"}}{\text{Fläche "123456"}}$$

Die Energieeinsparung von Systemen mit Brüdenverdichtung gegenüber konventioneller Würzekochung beträgt ca. 70 %, die restlichen 30 % werden in Form von Warmwasser rückgewonnen (siehe **Abbildung 3-9**) [8].

Mechanische Brüdenverdichtung:

Bei der mechanischen Brüdenverdichtung werden die Würzeschwaden mithilfe einer Turbine, Schraubenverdichter oder Roots-Gebläse komprimiert. Durch die Erreichung eines Überdrucks, tritt ebenfalls eine Überhitzung des Dampfes ein (Hebung des Temperaturniveaus). Zur Veranschaulichung der mechanischen Brüdenverdichtung ist in **Abbildung 3-9** ein System mit Außenkocher (siehe Abschnitt 3.3.1.1) und mechanischer Brüdenverdichtung dargestellt. Dabei wird die Würze mit Frischdampf aufgeheizt bis das System luftfrei ist. In weiterer Folge wird auf das Verdichtersystem umgeschaltet und die Würze mit der rückgewonnenen Energie aus den Brüden geheizt. Die Energie die dem System zugeführt wird besteht in diesem Prozess aus der Antriebsenergie des Verdichters. Wenn die Energie im Brüden dampfstrom nicht ausreichend ist, muss dieser durch entsprechenden Zusatzdampf erhöht werden. [19]

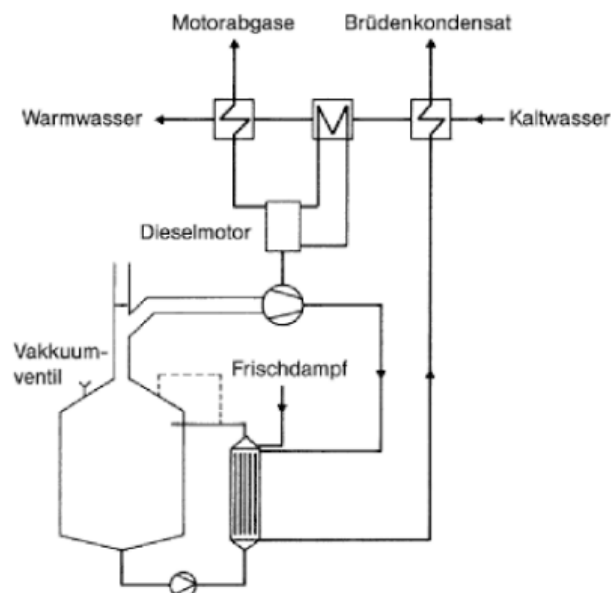


Abbildung 3-9: Außenkocherpfanne mit mechanischem Brüdenverdichter [19]

Thermische Brüdenverdichtung:

Bei der thermische Brüdenverdichtung wird zur Verdichtung im Gegensatz zur mechanischen Brüdenverdichtung ein Dampfstrahlverdichter verwendet. In einem Dampfstrahlverdichter werden mithilfe von Treibdampf die Brüden aus der Würzpfanne angesogen und verdichtet. Der Dampfstrahlverdichter besteht im Wesentlichen aus dem Kopf (Treibdüse und Mischdüse) und dem Diffusor (siehe **Abbildung 3-10**). In der Treibdüse wird der Druck des zugeführten Treibdampfes, welcher größer ist als der Druck der Brüden, in Geschwindigkeit umgesetzt. Der erzeugte Strahl reißt einen Teil der aus dem Verdampfer austretenden Brüden mit und vermischt sich mit ihm in der Mischdüse. Im Diffusor wird die Geschwindigkeit des Treibdampf-Brüden-Gemisches durch Verzögerung wieder in Druck umgesetzt. Das Ausgangsgemisch kann in weiterer Folge als Heizdampf verwendet werden. [20]

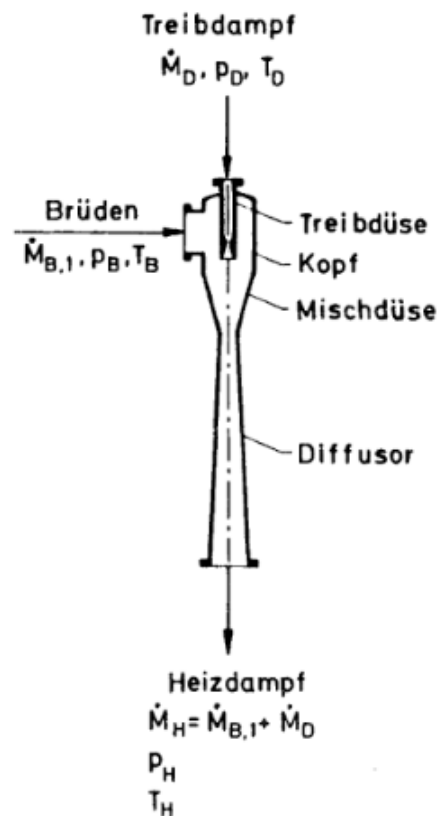


Abbildung 3-10: Prinzip Dampfstrahlverdichter [20]

Die thermische Brüdenverdichtung zeichnet sich vor allem durch geringere Investitionskosten und Betriebskosten, im Vergleich zur mechanische Brüdenverdichtung aus [19].

3.3.2. Verfahrensweise moderner Würzekochsysteme

Im folgenden Abschnitt wird auf die Verfahrensweise aktueller Kochsysteme, die im industriellen Maßstab eingesetzt sind, eingegangen. Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Anlagentechnik, wie der Innenkocher und Außenkocher sowie die Wärmerückgewinnungssysteme bilden dabei die Basis moderner Würzekochsysteme. In **Abbildung 3-11** ist eine Übersicht der aktuell eingesetzten Würzekochsysteme nach ihrer Verfahrensweise dargestellt.

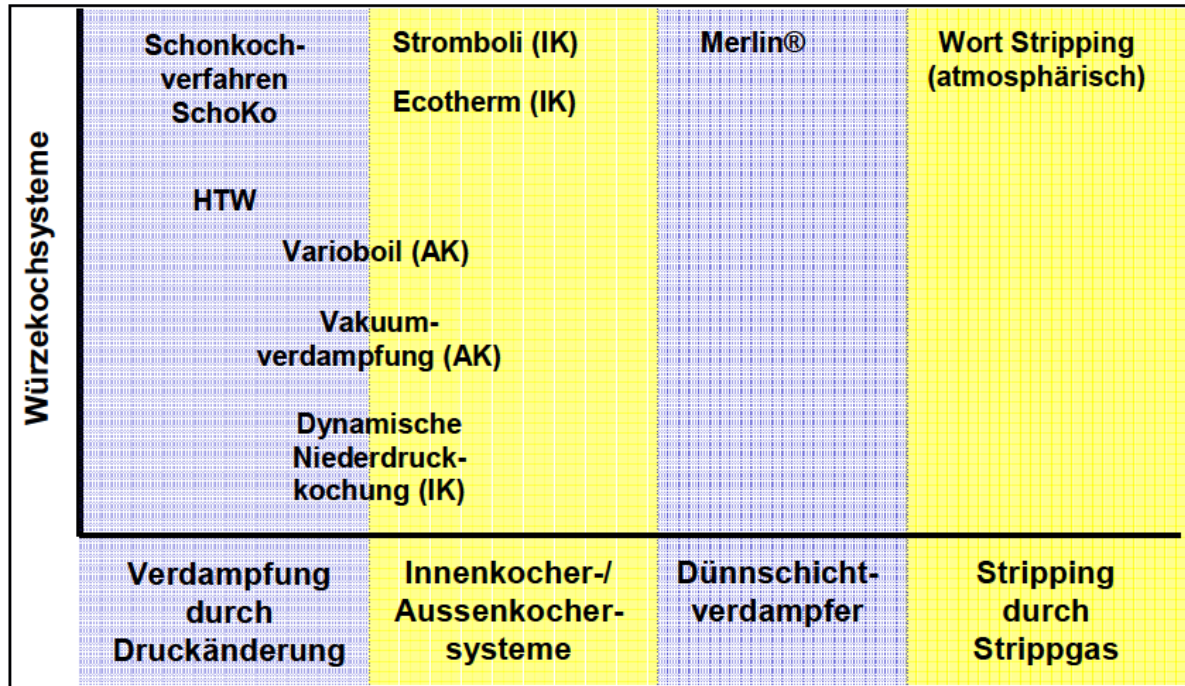


Abbildung 3-11: Einteilung aktueller Würzekochsysteme nach Verfahrensweise [12]

(IK) = Innenkocher

(AK) = Außenkocher

Aus **Abbildung 3-11** ist ersichtlich, dass die meisten Kochsysteme die Verdampfung durch Druckänderung ausnutzen. Bei Druckabsenkungen wird das physikalische Grundprinzip der Expansionsverdampfung ausgenutzt:

Wird eine unter Druck stehende Flüssigkeit auf einen niedrigeren Druck expandiert, wird die Siedetemperatur herabgesetzt und die dabei freigesetzte Energie bewirkt Dampfblasenbildung im gesamten Flüssigkeitsvolumen.

Bei Kochen über den atmosphärischen Druck stellt sich eine höhere Siedetemperatur ein, wodurch chemische Reaktionen schneller ablaufen und die Kochzeit reduziert werden kann (z. B. Hochtemperaturwürzekochung).

3.3.2.1. Zwangsangeströmter Innenkocher Ecotherm

Beim System Ecotherm wird ein Innenkocher über eine leistungsvariable Pumpe angeströmt. Dadurch kann die Heizmitteltemperatur, im Vergleich zum Innenkocher nach dem Naturumlaufprinzip, deutlich verringert und flexibler gestaltet werden. Durch die Pumpe ist ein weiterer Vorteil gegeben, wodurch das Pulsieren und Temperaturschichtungen in der Aufheizphase der Würze unterbunden wird. Die Gesamtverdampfung der Würzekochung kann, im Vergleich zu Kochsystemen ohne Zwangsanströmung z. B. von acht % auf sechs % verringert werden. [12, 14]

3.3.2.2. Stromboli

Das System „Stromboli®“ ist eine Weiterentwicklung des Systems „Ecotherm“, wobei die zwei Umwälzkreisläufe Naturumlauf und Pumpenumlauf kombiniert werden. Dieses System kann, laut Literatur, sowohl in bestehende Innenkocher als auch Außenkocher integriert werden. Das Hauptelement des Systems ist eine Venturi-Düse über dem Rohrbündel Wärmetauscher. Durch die, über das zentrale Steigrohr (siehe **Abbildung 3-12**), von unten zugeführte Würze entsteht, an der Außenseite der Düse ein Unterdruck, durch das der Umlauf im Rohrbündel unterstützt wird. Dadurch erlaubt das System eine reduzierte Verdampfungsrate von 3-4 %. [21]

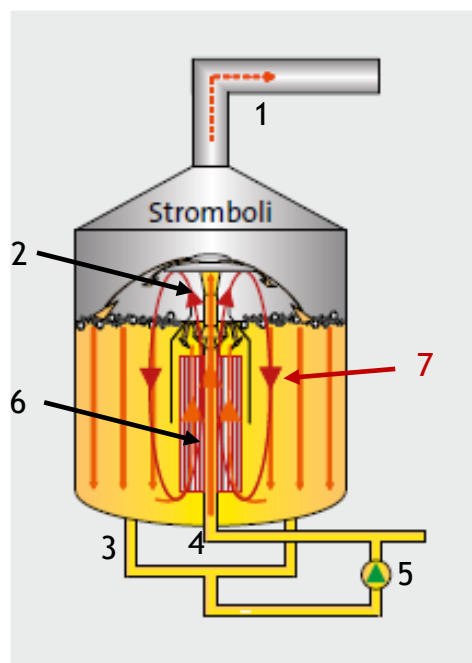


Abbildung 3-12: Funktionsprinzip „Stromboli®“ [21]

- (1) Dunstschlot
- (2) Venturi-Düse
- (3) Auslauf Pumpenumlauf
- (4) Einlauf Pumpenumlauf
- (5) Pumpe für Zwangsumlauf
- (6) zentrales Steigrohr
- (7) Naturumlauf

3.3.2.3. Dynamische Niederdruckkochung

Die klassische Niederdruckkochung, bei der die Würze mit einem konstant gehaltenen Verdampfungsdruck über dem atmosphärischen Druck gekocht wird, ist weltweit seit 1979 in Brauereien im Einsatz. Die daraus entwickelte dynamische Niederdruckkochung verwendet während des Kochprozesses periodische Druckaufbau- und Druckabbauphasen (siehe **Abbildung 3-13**). Hierbei wird das physikalische Grundprinzip der Expansionsverdampfung ausgenutzt. Dabei werden mit dem Strippgas (Dampfblasen) die flüchtigen organischen Verbindungen aus der Würze ausgetrieben. Die Gesamtverdampfung kann in diesem Prozess auf 4,5 % des Ausschlagvolumens bezogen und die Kochzeit auf 40-50 min reduziert werden. [22]

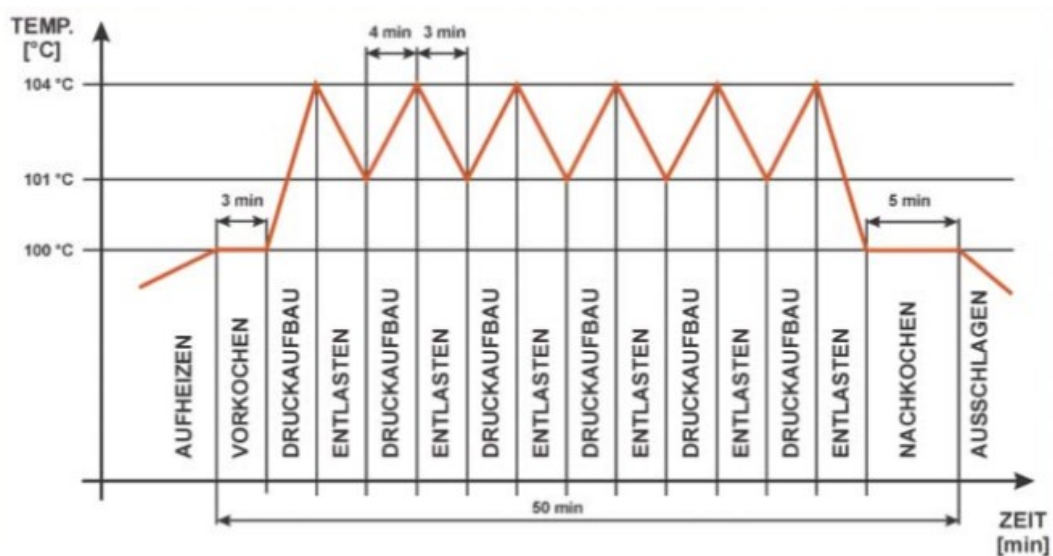


Abbildung 3-13: Dynamische Niederdruckkochung [22]

3.3.2.4. Vakuumkochsystem Varioboil

Die Hauptkomponenten dieses Kochsystems sind neben einem Außenkocher, ein Entspannungsverdampfer und ein Pfannendunstkondensator. Wobei die Würzepfanne/Sudpfanne im Rahmen der Prozessführung als Puffer dient (siehe **Abbildung 3-14**). Beim Varioboil-Verfahren kann der eigentliche Kochprozess in zwei Abschnitte unterteilt werden. Zu Beginn der Würzekochung wird konventionell (atmosphärisch) über den Außenkocher gekocht. Dabei wird Würze aus dem Whirlpool abgezogen, im Außenkocher mittels Dampf erwärmt und anschließend durch den Entspannungsverdampfer geleitet, wo die Wasserverdampfung und die Verdampfung von flüchtigen Aromastoffen erfolgt. Die entstehenden Brüden werden in einem Pfannendunstkondensator (siehe Abschnitt 3.3.1.2) kondensiert. In der zweiten Phase wird im Entspannungsverdampfer ein Vakuum erzeugt, wodurch sich Verdampfung unter der atmosphärischen Siedetemperatur einstellt. Dem

Außenkocher muss während der Expansionsverdampfung kein weiterer Heizdampf zugeführt werden. Im Vergleich zu konventionellen Kochsystemen wird die Verdampfungsrate reduziert (4-5 %) und damit ein geringerer Primärenergieeinsatz erzielt. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch die Wärmerückgewinnung aus den Brüden im Pfannendunstkondensator. Das System Varioboil kann in jede bestehende Sudpfanne nachgerüstet werden. [23]

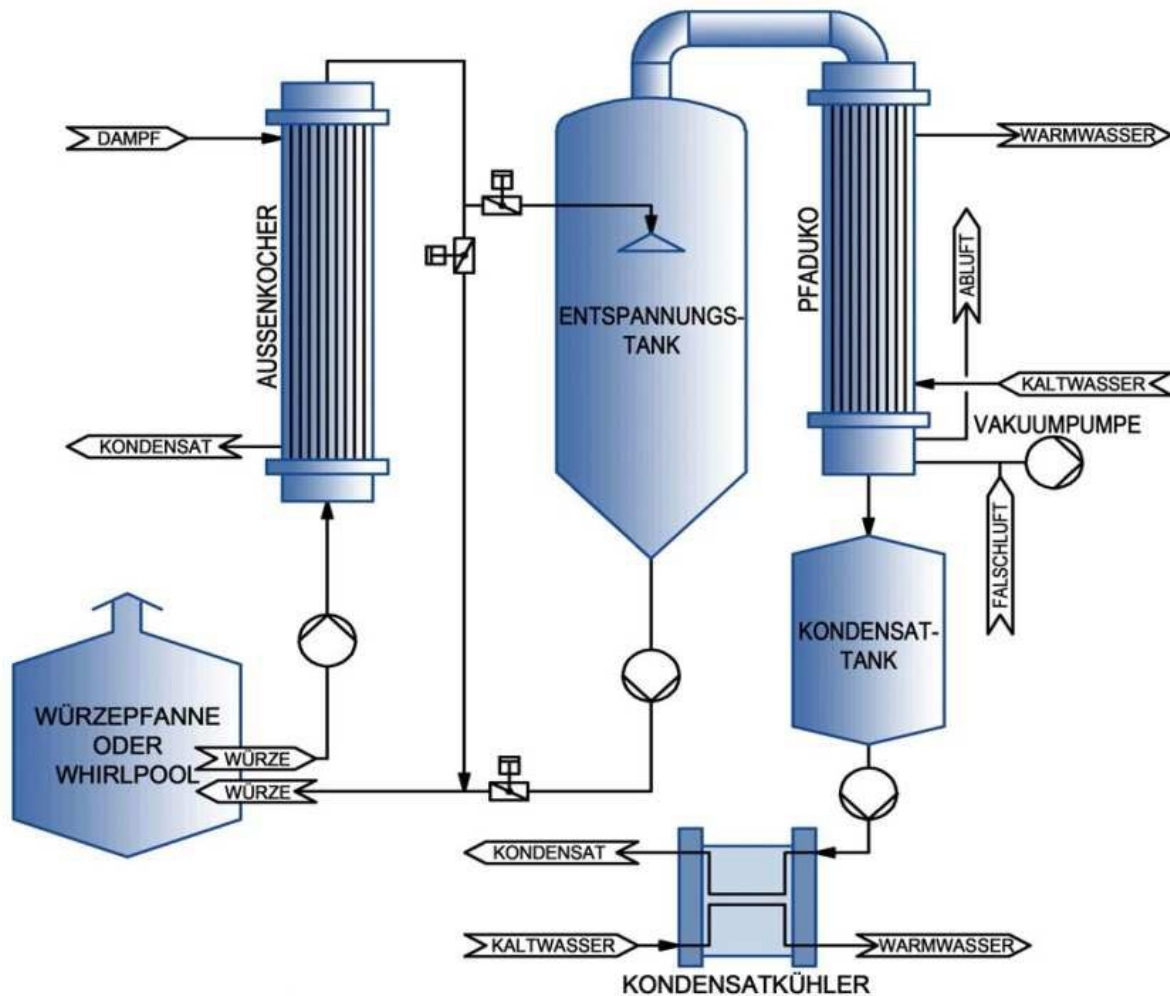


Abbildung 3-14: Verfahrensschema des Vakuumkochsystems Varioboil [23]

3.3.2.5. Schonkochverfahren Schoko

Beim Schonkochverfahren wird das eigentliche Würzekochen in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase wird die Würze bei 97-99 °C heißgehalten und nicht mehr aktiv gekocht, dadurch werden niedrige Verdampfungsraten erzielt. In der zweiten Phase, die erst nach der Heißtrubabscheidung im Whirlpool durchgeföhrt wird, wird in einem Entspannungsverdampfer bei 80 °C (Expansionsverdampfung) nachverdampft, um die flüchtigen Aromastoffe abzuscheiden. In diesem Verfahren

(siehe **Abbildung 3-15**) wird die Würze im Zuge der Würzekühlung in einen „vovakuierten“ patentierten Verdampfer tangential eingeleitet, wodurch sich eine Rotationsbewegung im Verdampfer ausbildet. Diese Rotationsbewegung resultiert in einem dünnen Würzefilm an der Behälterwand, infolgedessen eine große Oberfläche zur Aromastoff- und Wasserausdampfung geschaffen wird. Die Vorteile gegenüber konventioneller Würzekochung ergeben sich in einer reduzierten Verdampfungsrate (4-7%), den damit einhergehenden Einsparungen beim Primärenergieeinsatz (70% gegenüber konventioneller Kochung) und einer vollständigen Rückgewinnung der Verdampfungswärme durch die Brüdenkondensation. Die Flexibilität dieses Systems in Bezug auf die Prozessführung ist hoch. Durch den Aufbau kann beispielsweise eine konventionelle Würzekochung ohne Expansionsverdampfung in der Pfanne durchgeführt werden. [2, 14, 24]

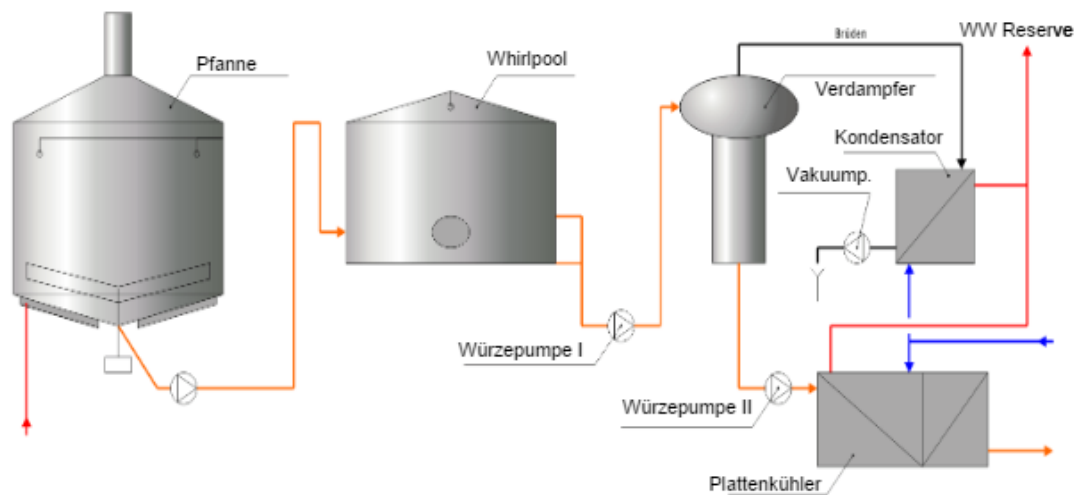


Abbildung 3-15: Schonkochverfahren zur Würzekochung [24]

3.3.2.6. Hochtemperaturwürzekochung (HTW)

Die Hochtemperaturwürzekochung heizt die Würze üblicherweise über drei Würzeerhitzer auf bis zu 135 °C (siehe **Abbildung 3-16**). Dieses Temperaturniveau wird für 2,5-3,0 min gehalten. Eine weitere Erhöhung dieser Temperatur und damit Verkürzungen der Kochzeit, wurde in Industrieanlagen, aufgrund unerwünschter chemischer Reaktionen wieder zurückgenommen. Anschließend findet eine Würzetemperaturreduktion über zwei druckstabile Entspannungsverdampfer (Expansionsverdampfung) statt. Durch die Entspannung kommt es zum Ausdampfen von Wasser und Aromastoffen. Die Energie dieser Schwaden wird zurückgewonnen und zur stufenweisen Würzeerhitzung rückgeführt/eingesetzt. Bei diesem Prozess wird ein Großteil der Energie zurückgewonnen, wodurch dieses Kochsystem zu den

energiesparendsten zählt. Die Verdampfungsrate bei solchen Konzeptionen liegt bei 6-8 %. [4, 12, 14]

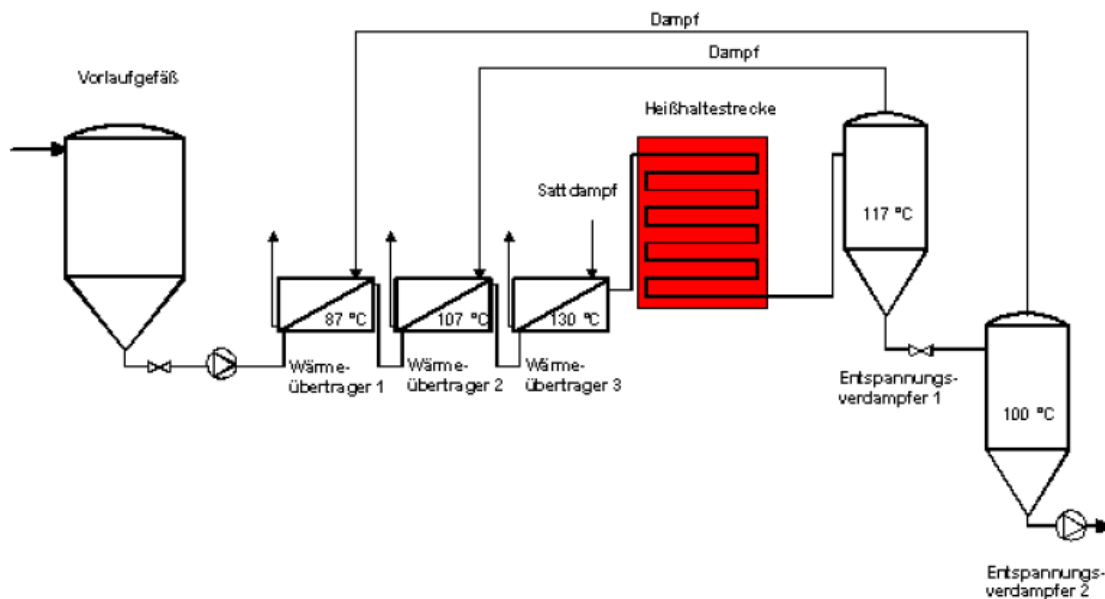


Abbildung 3-16: Aufbau einer Hochtemperatur-Würzekochung [14]

3.3.2.7. Verdampfung mittels Dünnschichtverdampfer Merlin®

Das System Merlin besteht aus einer konstruktiven Vereinigung eines Außenkochers und eines Ausdampfgefäßes, welches meist über einem Whirlpool angeordnet ist (siehe **Abbildung 3-17**). Der Whirlpool dient in dieser Anordnung als Sammelgefäß, als auch im eigentlichen Sinn zur Heißtrubabtrennung (siehe Abschnitt 3.1.5). Beim Merlin Verfahren tritt dieser als Kochgefäß an die Stelle der Sudpfanne. Im Merlin, befindet sich ein konischer Heizboden, über welchen die Würze im Kochprozess mithilfe einer Umwälzpumpe geleitet wird. Auf der konischen Heizfläche bildet sich eine dünne turbulente Schicht durch die ein guter Wärmeübergang gegeben ist. Durch das Prinzip der Dünnschichtverdampfung ist ein verbesserter Wärmeübergangskoeffizient zwischen der beheizten Fläche und des aufzuheizenden Mediums gegeben [18]. Während der Aufheizphase wird so der gesamte Sud fünf bis sechs mal pro Stunde umgewälzt und im Whirlpool oben aufgeschichtet, um eine gleichmäßige Erhitzung des Sudes zu erreichen (siehe **Abbildung 3-17**). Während der Kochphase wird die Würze nur noch tangential in den Whirlpool geleitet, um die für die anschließende Heißtrubabscheidung notwendige Drehstömung im Whirlpool zu erhalten. Nach der Heißtrubabscheidung erfolgt die Würzekühlung. Dabei wird die Würze ein weiteres Mal über den Merlin geleitet (Stripping), um die nachgebildeten flüchtigen Aromastoffe abzuscheiden und anschließend über den Würzekühler auf Anstelltemperatur gekühlt. Die Brüden werden beim Kochsystem Merlin über einen

Pfannendunstkondensator (siehe Abschnitt 3.3.1.2) niedergeschlagen. Die Energieersparnis zu konventionellen Kochsystem wird mit bis zu 70 % angegeben, bei Gesamt-Verdampfungsraten von 3,0-5,5 %. [2, 12, 14, 25, 26]

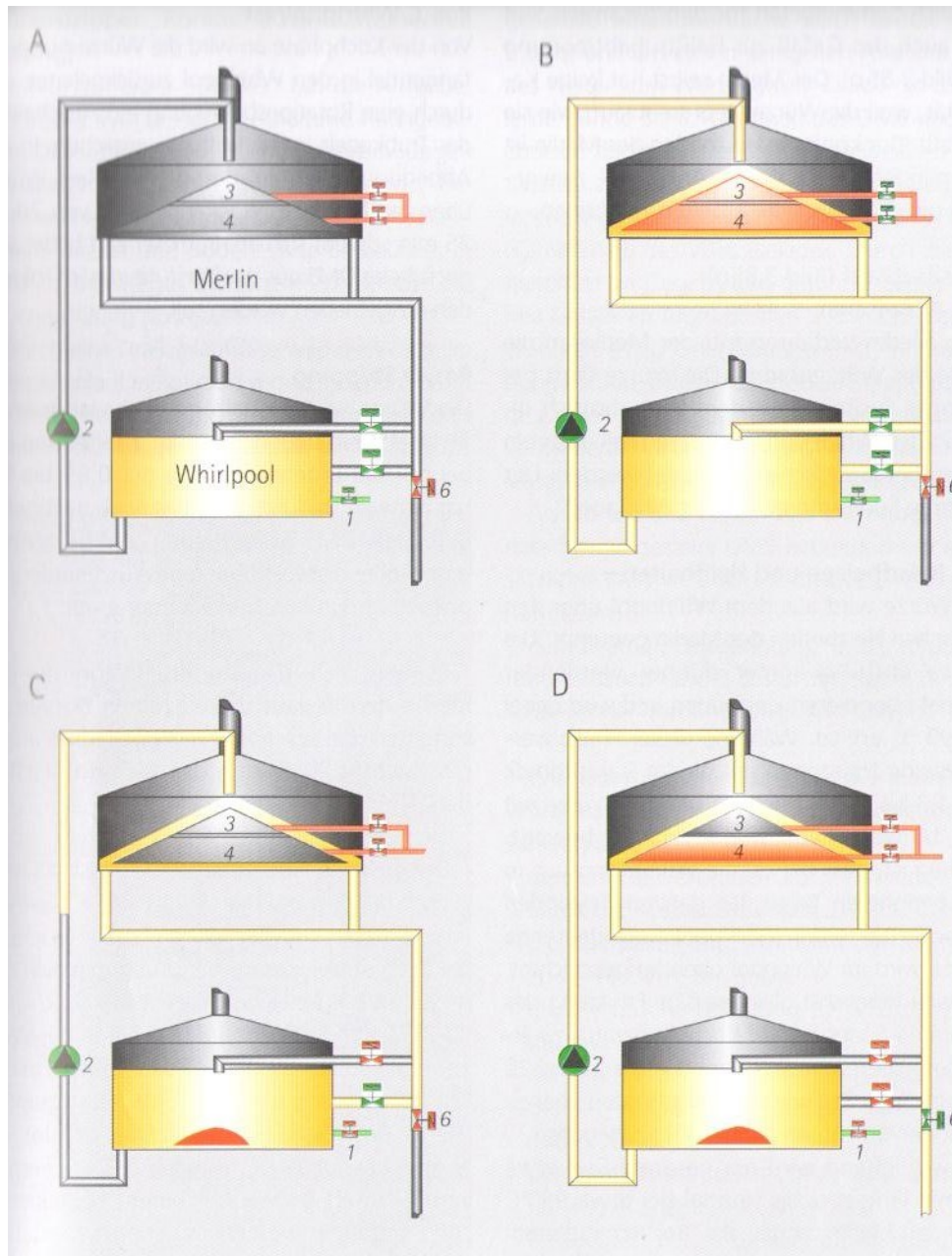


Abbildung 3-17: Dünnschichtverdampfung Merlin® [2]

- (A) Befüllen (B) Aufheizen und Heißhalten (C) Whirlpoolrast (D) Würzestripping
(1) Würzezuleitung (2) Würzepumpe (3) Heizzone I (4) Heizzone II
(6) zur Würzekühlung

3.3.2.8. Wort Stripping

Das sogenannte Wort Stripping ermöglicht eine Nachverdampfung nach der Heißtrubabscheidung (siehe **Abbildung 3-18**), beispielsweise mithilfe einer Stripping-Kolonne, dazu wird die Würze in der Kolonne (siehe **Abbildung 3-19**) von oben nach unten im Gegenstrom zu lebensmittelechtem Dampf oder Luft geleitet (siehe **Abbildung 3-18**). Durch Verteilerplatten entstehen dünne Würzeströme, die eine große Oberfläche bieten und so ein Ausdampfen von Aromastoffen begünstigen. Durch die Nachverdampfung kann die Kochzeit reduziert werden, da die Ausdampfung der unerwünschten Aromastoffe in der Stripping-Kolonne erfolgt und diese nicht in der Sudpfanne ausgetrieben werden müssen. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist die Bereitstellung lebensmittelechter Luft, beziehungsweise lebensmittelechten Dampfes für das Stripping. Die Aufbereitung des Strippingmediums ist sehr aufwändig, wodurch dieses Verfahren nicht sehr verbreitet ist. Die Verdampfungsrate im Stripping-Prozess liegt bei 2%, die entstehenden Brüden werden im Verbund von einem Pfannendunstkondensator niedergeschlagen. [2, 12, 14, 27]

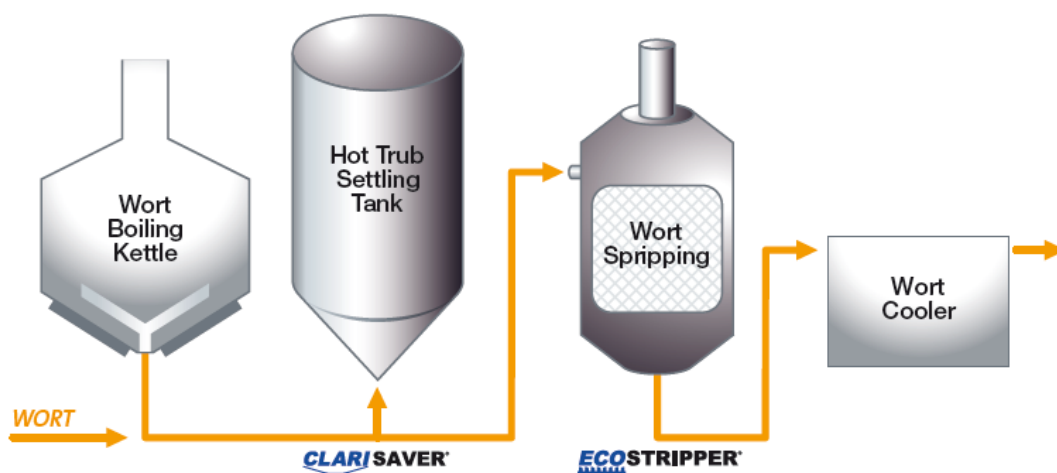


Abbildung 3-18: Kochsystem mit Stripping-Kolonne [27]

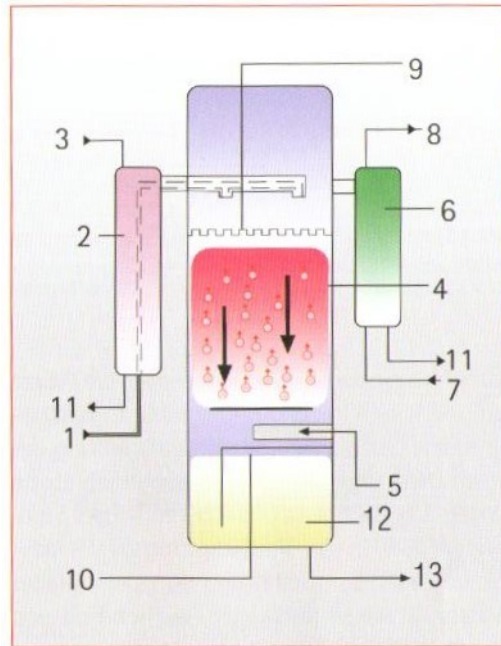


Abbildung 3-19: Strippingsäule (Ecostripper, Meura) [2]

- (1) Würze vom Whirlpool
- (2) Vorwärmer
- (3) Dampfeinritt
- (4) Füllkörperschicht der Strippingsäule
- (5) Dampfeinspritzdüse
- (6) Kondensator
- (7) Kühlwassereinlauf
- (8) Kühlwasseraustritt
- (9) Würzeverteiler
- (10) Stützgeflecht
- (11) Strippingkondensat
- (12) Würzepuffer
- (13) Würzeauslauf zum Plattenwärmeübertrager

3.3.2.9. Vergleich der Würzekochsysteme

In der Verfahrenstechnik der Würzekochung existieren, wie in den vorangehenden Abschnitten gezeigt, viele verschiedene Ansätze in Bezug auf die Steigerung der Energieeffizienz. Aus den verschiedenen Ansätzen eine optimale Lösung für die jeweilige Brauerei zu finden muss auf Basis der Ausschlagsmengen, wirtschaftlicher Gesichtspunkte, beziehungsweise bereits vorhandener Anlagentechnik in der Brauerei evaluiert werden. In Tabelle 3-2 ist zusammenfassend ein Vergleich der einzelnen Systeme in Bezug auf Kochparameter und Verdampfungsrate dargestellt.

Tabelle 3-2: Übersicht/ Vergleich Würzekochsysteme in Bezug auf Kochparameter

Bezeichnung	Kochdauer	Kochtemperatur	Verdampfungsrate
Innenkocher	60-80 min	102 °C-103 °C	8 %
Außenkocher			
Ecotherm	70 min	atmosphärisch	6 %
Stromboli	60 min	atmosphärisch	3-4 %
Dynamische	40-50 min	100 °C - 103 °C	4,5 %
Niederdruckkochung			
Varioboil	40 min + Vakkum	atmosphärisch	4-5 %
Schonkochverfahren	40-60 min + heißhalten	97 °C-99 °C	4-7 %
Hochtemperatur- würzekochung	Bei T _{max} , 2-3 min	128 °C-135 °C	6-8 %
Merlin	35-40 min + Stripping	atmosphärisch	3,0-5,5 %
Wort Stripping	Ca. 40 min + Stripping	atmosphärisch	2-3 %

³ Verdampfungsrate der Nachverdampfung (ohne eigentlichen Kochprozess)

3.4. Einsatz erneuerbarer Energien in Großbrauanlagen

Die Ambitionen der Großbrauereien in Bezug auf Energieeffizienz und CO₂-freie Produktion, haben in den letzten Jahren viele Projekte mit Bezug auf Einsatz erneuerbarer Energien im Brauprozess möglich gemacht. Der Trend, weg von fossilen Energieträgern hin zu erneuerbaren Energieträgern wie Biomasse oder Solarenergie, ist unbestreitbar.

Unter dem Namen „Green Brewery“ beispielsweise, ist die Zielsetzung der österreichischen Brauunion und des Mutterkonzerns Heineken International den Energieeinsatz und den CO₂-Ausstoß bis 2020 drastisch zu senken, beziehungsweise Null CO₂-Emissionen in der Brauindustrie. [15]

Im Rahmen des Projektes wurden bereits einige Energieeffizienzmaßnahmen realisiert:

- Einsatz von Solarthermie im Maischeprozess (Brauerei Göss)
- Optimierter Biogaseinsatz aus der Abwasserreinigungsanlage (Brauerei Göss)
- Bau einer Biertrebervergärungsanlage (Brauerei Göss)
- Optimierte Knallgasabsaugung der Flaschenwaschmaschine (Brauerei Puntigam)
- Wärmerückgewinnung aus der Abwärme von Kältemaschinen (Brauerei Puntigam)

3.4.1. Solarthermische Integration in den Brauprozess

Prozesse mit thermischem Energiebedarf in Brauereien und auch Mälzereien eignen sich aufgrund der erforderlichen Prozesstemperaturen sehr gut für eine Solarthermische Integration. Meistens handelt es sich um Prozesse, in denen ein Medium aufgeheizt werden muss und anschließend auf Temperatur gehalten, wie beispielsweise der Maischvorgang, Reinigungsprozesse oder die Pasteurisation.

3.4.1.1. Maisch-Prozess Brauerei Göss

Unter dem Namen „SOLARBREW“ [28] führt die österreichische Firma AEE Intec gemeinsam mit der „Heineken International Gruppe“ Pilotprojekte zur solarthermischen Integration in Brauereien und Mälzereien durch. Die Projekte umfassen die solarthermische Integration einer Mälzerei in Portugal, eine für den Maisch-Prozess in der Brauerei Göss und eine für den Pasteurisations-Prozess in einer Brauerei in Spanien. Durch die solarthermische Integration in den Maisch-Prozess, erfolgt eine Umstellung vom Wärmeträgermedium Dampf, welcher normalerweise zur Beheizung der Maischepfanne verwendet wird, zum Wärmeträgermedium Heißwasser. Die Maischbottiche wurden auf das neue Heizsystem mit Heißwasser

adaptiert. Ein großes Problem bei solarthermischer Wärmebereitstellung stellt die Volatilität dar. Um die Schwankungen der verfügbaren thermischen Energie auszugleichen, wurde ein unter Druck stehender Energiespeicher installiert (siehe **Abbildung 3-21**). Prozesstemperaturen in Brauereien liegen häufig im Bereich von 80 °C. Eine Solaranlage muss daher Vorlauftemperaturen von etwa 90 °C bereitstellen können. Solaranlagen sind jedoch effizienter bei niedrigeren Temperaturniveaus. Um daher die thermische Energie für den Maischprozess bereitstellen zu können und gleichzeitig eine effiziente Nutzung von Solarenergie zu erzielen, wird die Vorlauftemperatur in der Pilotanlage Göss zusätzlich über das Fernwärmenetz eines anliegenden Biomasse Kraft-Wärme-Kopplungswerkes angehoben (siehe **Abbildung 3-20**). Der Ertrag der Solaranlage liegt bei ca. 530 MWh pro Jahr. [1, 28]

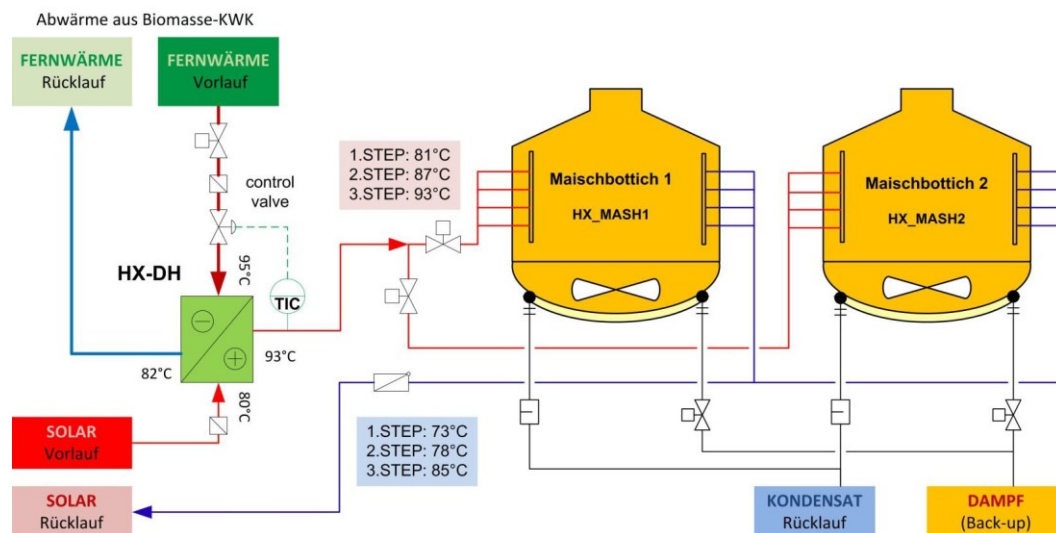


Abbildung 3-20: Prozessintegration Solar der Brauerei Göss [28]

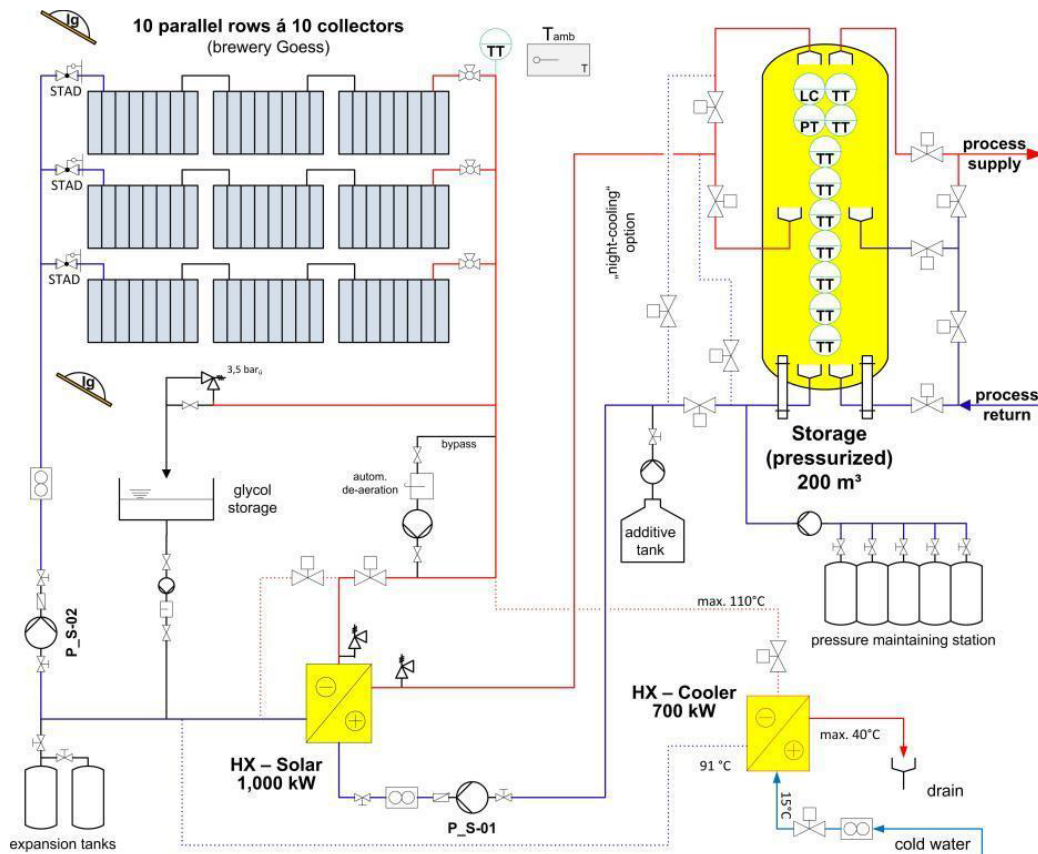


Abbildung 3-21: Hydraulikschema Solarkeis Brauerei Göss [28]

3.4.1.2. Solare Prozesswärmebereitstellung bei der Hütt-Brauerei

In Verbindung mit einer Modernisierung des Sudhauses wurde in der Hütt-Brauerei (Deutschland) eine thermische Solaranlage in die Prozesswärmebereitstellung implementiert. Im Rahmen der Modernisierung wurde das bestehende Würzekochsystem (Sudpfanne mit Innenkocher, siehe Abschnitt 3.3.1.1) auf das System Varioboil (siehe Abschnitt 3.3.2.4) umgestellt. Im bestehenden System waren die Warmwasserbereitstellung aus dem Pfannendunstkondensator bei der Würzekochung und der Verbrauch im Prozess ausgeglichen. Durch die Umstellung des Systems und der damit verringerten Verdampfungsrate während der Würzekochung stand allerdings auch weniger Warmwasser im Energiespeicher für die Produktion bereit. Dadurch ergab sich die Möglichkeit eine thermische Solaranlage in die Brauwasserversorgung einzubinden. Die Einbindung der Solarthermie der Brauerei Hütt ist in **Abbildung 3-22** dargestellt. [1]

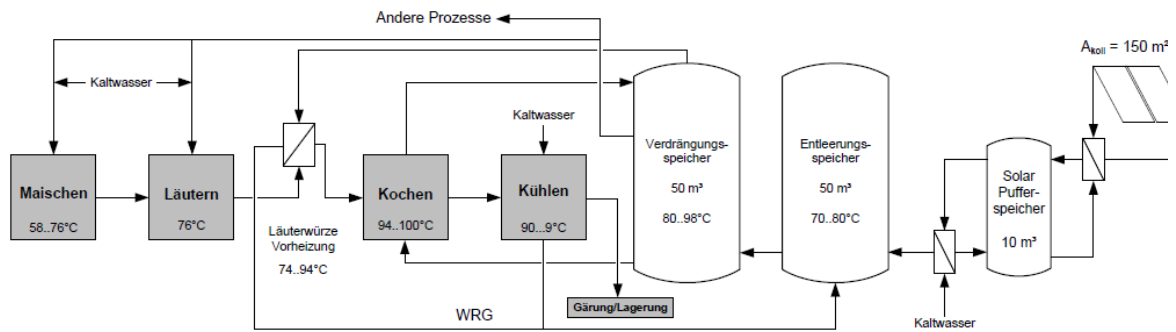


Abbildung 3-22: Einbindung Solarthermie bei der Brauerei Hütt [29]

Die Dimensionierung der Anlage (Apparaturfläche und Pufferspeicher) erfolgte auf Basis von Simulationsergebnissen für den Standort. Um Stagnationszeiten im Sommer zu minimieren ging aus den Simulationsergebnissen eine Apparaturfläche von 150m² in Kombination mit einem zehn m³ Pufferspeicher hervor. Die tatsächliche Apparaturfläche (155,5 m²) ergab sich aufgrund der Abmessungen der verwendeten Kollektoren. In **Abbildung 3-23** ist die Hydraulik des Solarkreises der Brauerei Hütt dargestellt. [1]

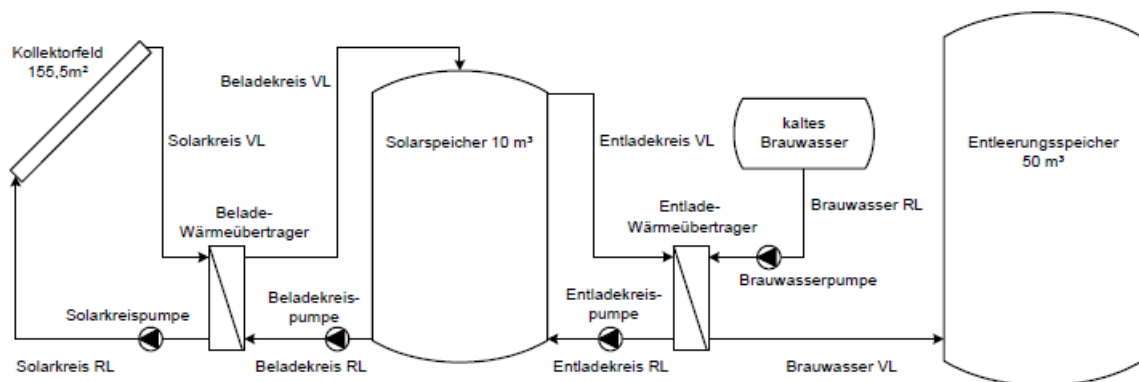


Abbildung 3-23: Hydraulik Solarkreis Brauerei Hütt [1]

3.4.2. Biogas aus Biertrebern / Brauereireststoffen

Biogas ist neben Sonnen-, Wasser und Windenergie eine regenerative Energiequelle, die zur Einsparung fossiler Brennstoffe beiträgt. Biogas entsteht beim natürlichen Abbau organischer Stoffe durch Bakterien, der anaeroben Fermentation. Die anaerobe Behandlung von Abwässern in der Brauindustrie ist bereits Stand der Technik. Auch der Biertreber und die Überschusshefe sind grundsätzlich als Substrat für die anaerobe Fermentation geeignet. [30]

Die Nutzungsmöglichkeiten von Biertrebern sind weitreichend:

- Anwendung als Futtermittel bei Milchkühen, Mastrindern, Schweinen etc. [31].
- Anwendung als Substrat zur Pilzzucht [32].
- Thermische Verwertung in einer Treberverbrennung zur Prozessdampferzeugung [33].

Biertreber sind zwar prinzipiell ein sehr nährstoffreiches, jedoch schwer verdauliches Viehfutter, wodurch Überlegungen zu einer anderweitigen Nutzung in Betracht zu ziehen sind. Die Brauerei Göss beispielsweise betrieb seit 2003 eine Anlage zur thermischen Verwertung von Biertrebern und Versorgung der Prozessdampfschiene. Im Rahmen des Projektes „Green Brewery“ wurde die alternative Verwertung von Biertrebern in einer Biogasanlage evaluiert, wobei ein Umstieg auf den Fermentationsprozess empfohlen wurde. Die Problematik bei der thermischen Verwertung bestand in der Treberfeuchte und den damit verbundenen Energieaufwand im Trocknungsprozess. [15, 33, 34]

Die anaerobe Fermentation zur Biogaserzeugung bezeichnet einen vierstufigen Prozess. Die einzelnen Stufen sind dabei die Hydrolyse (Verflüssigung), Acidogenese (Versäuerung), Acetogenese (Essigsäurebildung) und Methanogenese (Methanbildung). Das Verfahrensschema der anaeroben Fermentation ist in **Abbildung 3-24** dargestellt. In der Hydrolyse werden langkettige Verbindungen (Proteine, Fette, Kohlenhydrate) mithilfe von Enzymen in kurzkettigere (Fettsäuren, Aminosäuren, Zucker) zerlegt. In der Acidogenese werden die Produkte der Hydrolyse (Aminosäuren, etc.) zu kurzkettigen Fettsäuren verstoffwechselt und anschließend während der Acetogenese zu Kohlendioxid, Wasserstoff und Acetat abgebaut. In der Methanogenese wird aus den verschiedenen Edukten Methan (CH₄) gebildet. [30, 35]

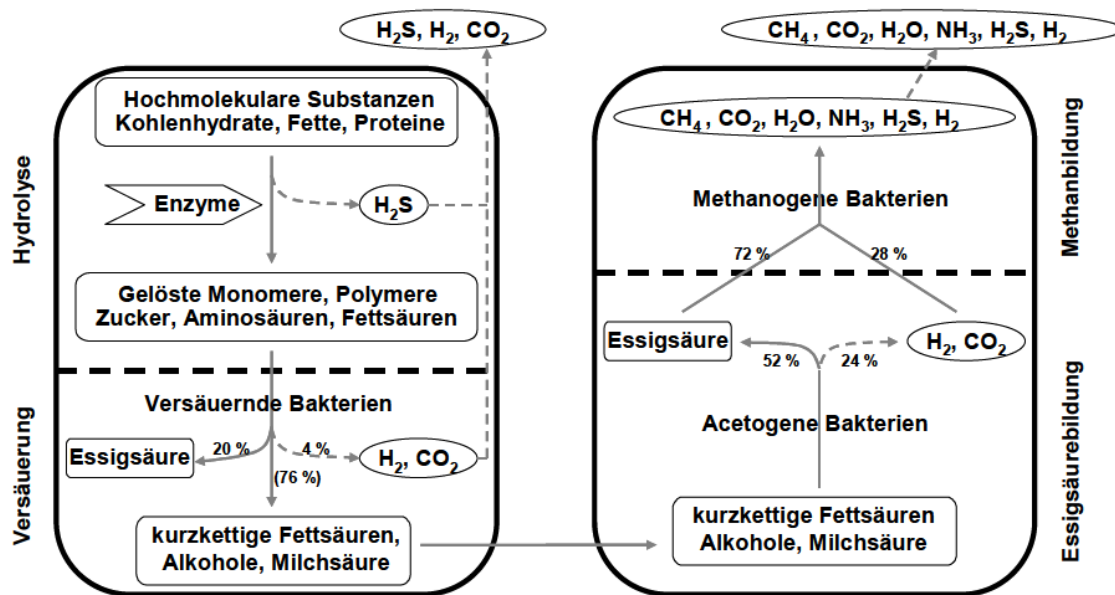


Abbildung 3-24: Schema des anaeroben Abbauprozesses [36]

3.4.2.1. Biogasanlage der Brauerei Göss

Die Biogas-Anlage der Brauerei Göss wurde vom Unternehmen BDI-BioEnergy geplant und aktuell bereits umgesetzt, in der Anlage werden Biertreber und die Überschusshefe verwertet. Die Biertreber werden von einem Speichersilo im ersten Prozessschritt in eine Anschlämmstation befördert, in welcher Treber mit Substrat auf den richtigen Feststoffgehalt angemischt wird. Die angeschlammten Treber werden weiter in einen Hydrolysebehälter gefördert, in den auch die Hefe direkt gepumpt wird. Nach einer Verweilzeit von einigen Tagen wird das entstandene Substrat in einen Fermenter gepumpt, wo durch methanbildende Bakterien Methan und Kohlendioxid entsteht. Die Anlage liefert das produzierte Biogas an einen Dampfkessel für die Prozessdampferzeugung und/oder ein Blockheizkraftwerk zur Verstromung. Dank der Biogasanlage kann die Brauerei Göss nun in Kombination mit der solarthermischen Prozesswärmebereitstellung (siehe Abschnitt 3.4.1.1) ihren gesamten Energiebedarf CO_2 -neutral decken. [35]

4. Bestehende Kleinbrauanlage

In den letzten Jahren hat sich neben den Großbrauereien die Anzahl kleiner Gasthofbrauereien, beziehungsweise sogenannter Kleinbrauanlagen, vervielfacht. Vor allem für Gasthäuser bietet sich mit der Produktion einer eigenen Biersorte ein neues Geschäftsfeld. Die Motivationen zur Errichtung einer solchen Anlage können dabei verschiedene Gründe haben, wobei die Investitionskosten hierbei für ein Kleinunternehmen wie ein Gasthaus durchaus beträchtlich sein können. Die Brauerei Linko wurde 2005 errichtet und ist Mitglied beim Österreichischen Haus- und Kleinbrauverband. Das Herzstück die Brauerei ist ein drei Geräte Sudhaus in Edelstahl. Im folgenden Abschnitt wird die im Rahmen dieser Arbeit optimierte und automatisierte Kleinbrauanlage des Gasthofes Linko in Traisen und die Prozessführung der produzierten untergärigen hefetrüben Biere dargestellt.

4.1. Sudhaus

Das Herzstück der Brauerei ist ein drei Geräte Sudhaus der Fa. Labu Buchrucker GmbH. Drei Geräte Sudhaus bezeichnet dabei die Maische/Sudpfanne, den Läuterbottich und den Whirlpool. In **Abbildung 4-1** ist das Sudhaus dargestellt, am linken Bildrand ist die Maische/ Sudpfanne dargestellt und am rechten Bildrand der Läuterbottich und Whirlpool, die übereinander angeordnet sind. In der Mitte ist die Steuerung/Maischautomatik der Sudpfannenheizung dargestellt, welche im Maisch- und Kochprozess die Regelung der Energiezufuhr übernimmt. Maischautomatik bezeichnet dabei die automatische Regelung der Temperaturanhebungen und Rastzeiten im Maischeprozess (siehe Abschnitt 4.3.3).

Das Labu Dreigerätesudhaus ermöglicht zwei Sude parallel und nahezu zeitgleich zu produzieren. Diese Prozessführung wird auch Doppelsud genannt (siehe Abschnitt 4.3). Vorteile dieses Systems bestehen in einem geringeren Platzbedarf und niedrigeren Anschaffungskosten im Vergleich zu Zweigerätesudhäusern. Zweigerätesudhaus bezeichnet eine Sudpfanne und einen Läuterbottich der auch als Whirlpool genutzt wird. Bei der Doppelsudprozessführung können ebenfalls zwei verschiedene Biersorten parallel produziert werden, da keine Berührung der beiden Sude stattfindet. Die Pumpwege erfolgen über eine externe Pumpe, wobei für den jeweiligen Prozessschritt die Schläuche an die benötigten Anschlüsse angeschlossen werden. Die Pumpe ist eine sogenannte Blockpumpe und verwendbar als Maische-, Würzepumpe und im Gärkellerbetrieb. Das Sudhaus ist für Infusions- und Dekoktionsverfahren im Maischeprozess ausgelegt. [37]



Abbildung 4-1: Labu Dreigerätesudhaus Basisversion

- (1) Sudpfanne/Maischepfanne (2) Läuterbottich (3) Whirlpool
(4) Steuerung/Maischautomatik (5) Blockpumpe (6) Zentrale Abläuterstation
(7) Antriebsmotor Rührwerk

4.1.1. Sudpfanne

Die Sudpfanne ist in Edelstahl ausgeführt und wird elektrisch beheizt mit Spezial-Keramik Heizkörper. Am Kopf der Sudpfanne (Edelstahlkugelhaube mit Klapptüre) ist ein Rührwerk, angetrieben von einem Getriebemotor, angebracht. Das Rührwerk dient zur Verhinderung von Klumpenbildung beim Maischen. Der Boden der Sudpfanne ist konisch ausgeführt um beim Abpumpen der Maische/Würze restlosen Ablauf zu gewährleisten. Zur Reinigung der Sudpfanne ist am Kopf ein rotierender Sprühkopf angebracht. Die maximale Fassungsmenge der Sudpfanne beträgt 300 l. [37]

4.1.2. Läuterbottich/Whirlpool

Der Läuterbottich und der Whirlpool sind in einem Turmaufbau integriert. Im Läuterbottich ist ein Edelstahl-Senkboden mit konische Schlitzten integriert, auf dem die Trennung der Trebern von der Würze stattfindet. Die Würze läuft durch den Senkboden und wird über einen Spezialboden mit Ablaufrinne außen über eine sogenannte Zentrale-Abläuterstation in den Whirlpool geleitet (siehe **Abbildung**

4-1). Die Regelung der Abläutergeschwindigkeit erfolgt über ein Schauglas und die Stellung eines händisch betätigten Scheibenventils. Der Whirlpool ist mit einem tangentialen Einlauf ausgestattet, wodurch während des Pumpvorgangs in den Whirlpool die Drehströmung zur Heißtrubabtrennung erzeugt wird. Der Läuterbottich und Whirlpool sind beide mit einem rotierenden Sprühkopf zur Reinigung und einer schwenkbaren Mannlochöffnung ausgestattet. In der Prozessführung (siehe Abschnitt 4.3) dient der Whirlpool als Zwischenbehältnis der Würze zwischen Läuterprozess und Würzekochung, sowie als „klassischer“ Whirlpool nach der Würzekochung zur Heißtrubabtrennung. [37]

4.2. Gärraum:

Für die Gärung des Jungbieres, beziehungsweise der Lagerung des Bieres nach dem Hauptgärprozess waren ein Hauptgärbottich mit 5 hl Fassungsvermögen, vier Lagertanks und zwei ZKT zu je sechs Hektoliter (hl) vorhanden. Der Gärprozess kann somit, sowohl nach dem „klassischen“ offenen Verfahren im Hauptgärbottich und anschließender Lagerung in den Lagertanks, als auch im „Eintankverfahren“ in den ZKT durchgeführt werden. Der Hauptgärbottich, die Lagertanks sowie die ZKT stammen ebenfalls von der Fa. Labu Buchrucker GmbH. Der Gärraum, beziehungsweise die Gär- und Lagergefäße sind in der Brauerei Linko im selben Gebäude untergebracht, wie das drei Geräte-Sudhaus. Traditionell wird die Gärung in sogenannten Gärkellern durchgeführt, mit den modernen Reinigungs- und Desinfektionstechniken sind bei oberirdischen Gäräumen jedoch keine Nachteile verbunden [4]. Die Kühlung des Hauptgärbottichs, der ZKT und der Lagertanks erfolgt direkt über ein Eiswassergeführtes System. Das System besteht aus einem Ausgleichsbehälter, einem Wasserwerk für den Flüssigkeitskreislauf und einer Kältemaschine die nach dem Kaltdampfprozess (siehe Abschnitt 7.3.3) arbeitet.

4.2.1. Hauptgärbottich:

Im Hauptgärbottich wird im „klassischen“ Gärverfahren der gekühlten Würze die Hefe zugesetzt, um die Hauptgärung (die Umwandlung des in der Würze enthaltenen Zuckers zu Alkohol) zu starten. Der Hauptgärtank der Brauerei Linko (siehe **Abbildung 4-2**) ist komplett in Edelstahl gefertigt und besitzt ein Fassungsvermögen von 5 hl. Der Mantel des Hauptgärbottichs ist als isolierter Doppelmantel ausgeführt und mit 40 mm Polyurethan (PU) ausgeschäumt. Die Kühlung erfolgt direkt über zirkulierendes Eiswasser im Mantel und wird von einer elektronischen Steuerung über ein Magnetventil gesteuert. Der Boden ist konisch ausgeführt mit einem mittig angeordneten Bodenablauf und einem weiteren Ablauf oberhalb des Konus. Bei untergärigen Bieren setzt sich die Hefe am Ende der Hauptgärung am Boden des

Gärgefäßes ab [4]. Im Hauptgärbottich der Brauerei Linko setzt sich die Hefe somit im Bereich des Konus ab. Der Ablauf oberhalb des Konus dient für die Stammwürzebestimmung, beziehungsweise für die Bestimmung des Vergärungsgrades während des Gärprozesses. Für Reinigungszwecke ist am Kopf des Hauptgärbottichs ein rotierender Sprühkopf angeordnet. [37]



Abbildung 4-2: Außenansicht und Querschnitt des Hauptgärbottichs [37]

4.2.2. Lagertanks:

Im „klassischen“ Gärprozess wird das Bier nach der Hauptgärung zur Nachgärung und Lagerung in die Lagertanks geschlaucht. Die in der Brauerei Linko installierten Lagertanks sind sogenannte Flachkonische Lagertanks aus Edelstahl, wobei sich flachkonisch hierbei auf die Ausführung des Bodens bezieht (siehe **Abbildung 4-3**). Die Lagertanks sind ebenfalls doppelwandig mit PU-Isolierung (50 mm) ausgeführt und besitzen ein Brutto-Fassungsvermögen von 540 l. In der Praxis sind ca. 450 l nutzbar, da der für die CIP-Reinigung am Kopf der Lagertanks installierte Sprühkopf trocken bleiben muss. Die Temperatursteuerung/Kühlung der Lagertanks ist ident mit der des Hauptgärbottichs. Durch Direkt-, Einzelkühlung der Tanks ist eine gute Einflussnahme auf die Temperatur während der Lagerung, beziehungsweise Nachgärung möglich [4]. [37]



Abbildung 4-3: Außenansicht und Querschnitt der flachkonischen Lagertanks [37]

4.2.3. Zylindrokonische Tanks (ZKT):

In sogenannten ZKT kann die Haupt- und Nachgärung in einem Tank erfolgen. Der grundsätzliche Aufbau eines ZKT ist in **Abbildung 4-4** dargestellt. Zylindrokonische Tanks bieten aufgrund des zylindrischen Bodens die Möglichkeit der Hefeentnahme ohne das Bier umzuschlauchen. Die ZKT der Brauerei Linko sind ebenfalls wie der Hauptgärbottich und die Lagertanks direkt gekühlt, doppelwandig und isoliert ausgeführt.



Abbildung 4-4: Aufbau zylindrokonischer Tank [38]

4.3. Prozessführung

In der Brauerei Linko werden hauptsächlich untergärige hefetrübe Biere gebraut. Die Hauptsorten sind „Pilsner“ und „Wiener Gerstl“. Die Prozessführung beziehungsweise der Prozessablauf beider Sorten ist ident, Sie unterscheiden sich in der Würzeherstellung nur in den eingesetzten Malzsorten und der zugesetzten Hopfenmenge. Die im folgenden Abschnitt vorgestellte Prozessführung bezieht sich auf die Rezeptur der Hauptsorten „Pilsner“ und „Wiener Gerstl“.

4.3.1. Reinigung der Anlage/CIP

Die Reinigung der Anlage erfolgt üblicherweise direkt vor und nach dem Brauprozess um Produktreste und Ablagerungen von der Oberfläche der Gefäße zu entfernen. In modernen Anlagen sind die meisten Behältnisse bereits für eine automatisierte Reinigung vorbereitet (Sprühköpfe). Die maschinelle Reinigung einer Brauanlage wird üblicherweise als CIP (Cleaning in Place) bezeichnet. [2]

Das Reinigungsverfahren der Brauerei Linko beinhaltet mehrere Schritte. Zuerst werden die Behälter mit Frischwasser gespült um grobe Verunreinigungen zu beseitigen. Anschließend wird ein basisches Reinigungsmittel-Wasser Gemisch in jedem Behälter im Kreis gepumpt, um eine keimfreie Oberfläche zu erreichen. Das Kreispumpen erfolgt dabei mithilfe der Blockpumpe über den Ablauf und den Sprühkopf des jeweiligen Behälters. Nach jedem Reinigungsschritt müssen die Schläuche für den nächsten Schritt umgeschlossen werden. Die Bedienung der Blockpumpe erfolgt ebenfalls manuell.

4.3.2. Schrotung des Malzes

Das Schrotten des Malzes erfolgt in der Brauerei Linko über eine Zweiwalzen-Trockenschrotmühle mit Einlauftrichter (Getreidequetsche). Aufgrund der Verwendung eines Läuterbottichs müssen die Spelzen des Malzkornes möglichst unzerstört erhalten bleiben [2]. Die benötigte Menge für das jeweilige Rezept wird händisch gewogen und anschließend in den Einlauftrichter der Schrotmühle eingebracht.

4.3.3. Maischprozess

Der Maischeprozess wird in der Brauerei Linko nach dem Infusionsverfahren mit Einmaischen bei 50 °C durchgeführt (siehe **Abbildung 4-5**). Für das Einmaischen werden in der Brauerei Linko 150 l Brauwasser verwendet, die manuell in die Sudpfanne geleitet werden. Für die direkte Erreichung der Einmaischttemperatur wird Heißwasser mit 80 °C (bereitgestellt über den Elektroboiler, siehe Kapitel 6)

und Grundwasser in die Sudpfanne geleitet. Die Malzzugabe erfolgt händisch über die Klapptüre der Sudpfanne. Die weiteren Maischtemperaturen und Rastzeiten bis zur Abmischtemperatur sind in Tabelle 4-1 dargestellt. Die Einhaltung der Rastzeiten wird durch die Maischautomatik sichergestellt. Beim Infusionsverfahren kommt dem Rühreffekt eine große Bedeutung zu. Bei unzureichender Vermischung kommt es zu Temperaturdifferenzen in der Maische und einer verschlechterten Enzymarbeit und damit einer niedrigeren Sudhausausbeute (siehe Abschnitt 6.6.3) [2]. In der Brauerei Linko übernimmt das Rühren das am Kopf der Sudpfanne angebrachte Rührwerk, welches während des gesamten Maischprozesses eingeschaltet ist, um Klumpenbildung und Temperaturdifferenzen in der Maische zu verhindern. Das Rührwerk wird von einem einphasig direkt angeschalteten Getriebemotor angetrieben.

Tabelle 4-1: Maischtemperaturen und Rastzeiten für Pilsner und Wiener Gerstl

Maischtemperatur	Rastzeit
62 °C	20 m
68 °C	5 m
72 °C	20 m
78 °C	15 m

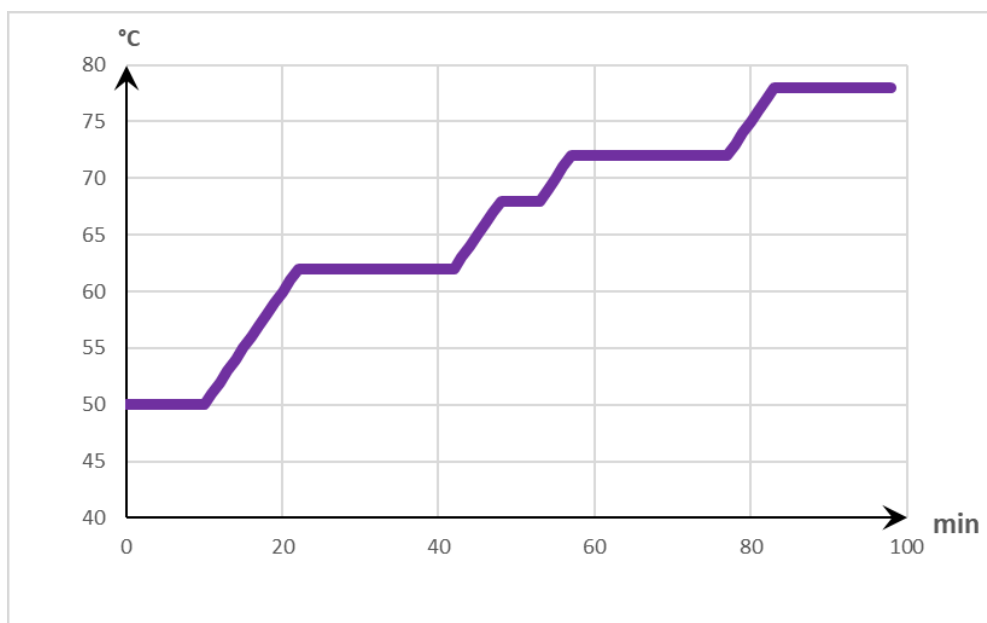


Abbildung 4-5: Infusionsverfahren Einmaischen bei 50 °C LinkoBräu

4.3.4. Läuervorgang

Der Läuervorgang erfolgt in der Brauerei Linko durch einen sogenannten Läuervottich. Nach Ende des Maischprozesses wird die Maische mithilfe der Blockpumpe in den Läuervottich gepumpt. Nach dem Pumpvorgang wird in der Brauerei Linko eine 20-minütige Läuerrast eingehalten. Während der Läuerrast beginnt in der Sudpfanne der zweite Maischprozess des Doppelsudes. Nach Ablauf der Läuerrast wird das Läuerventil (handbetätigtes Scheibenventil) unter Überprüfung des Durchflusses im Schauglas der Abläuervstation ca. halb geöffnet. Optimum für die Prozessführung bezeichnet dabei ein Durchfluss, bei dem der Läuervorgang gleichzeitig mit dem Ende des zweiten Maischprozess beendet wird. Die Würze wird über die Abläuervstation in den Whirlpool geleitet. Der Whirlpool besitzt eine Füllstandsanzeige über die der Füllstand im Whirlpool abgelesen werden kann. Die Nachgüsse zum Auswaschen der Trebern werden ebenfalls händisch durchgeführt. Die Nachgüsse erfolgen nach Erreichen der Füllstände 100, 150 und 200 Liter im Whirlpool. Insgesamt werden dabei 150 Liter Heißwasser aufgegossen mit der Verteilung 60 l, 60 l und 30 l. Die mengenmäßige Bestimmung der Aufgießmengen erfolgt über einen Heißwasserzähler im Zulauf des Läuervottichs. Der Treberkuchen, der im Läuervottich zurückbleibt, muss um eine bessere Sudhausausbeute (siehe Abschnitt 6.6.3) zu erreichen vor den Nachgüssen „geschnitten“ werden. Das bedeutet ein Schneidwerk wird bis auf ca. 5 cm über den Senkboden in den Treberkuchen abgesenkt und anschließend langsam durch den Treberkuchen geführt. Die Arbeit mit dem Schneidwerk bestimmt die Läuervdauer und Klarheit der ablaufenden Würze wesentlich [2]. Das Schneiden erfolgt in der Brauerei Linko mit einer manuellen Schneidevorrichtung. Der Läuervstop ist erreicht, sobald 250 l Würze im Whirlpool abgeläuert sind. Nach Erreichen des Läuervstops werden die Trebern manuell über die Mannlochöffnung entfernt (Austrebern).

4.3.5. Kochen der Würze

Nach Ende des zweiten Maischprozesses und des Läuervorganges wird mithilfe der Blockpumpe die Maische des zweiten Sudes in den Läuervottich gepumpt und anschließend die abgeläuerte Würze des ersten Sudes zur Würzekochung in die Sudpfanne. Die Kochdauer der Würze beträgt in der Brauerei Linko für die Hauptsorten „Pilsner“ und „Wiener Gerstl“ 75 Minuten, die Einhaltung der Kochzeit wird dabei durch die Koch-/Maischautomatik sichergestellt. Die Hopfengabe während der Würzekochung erfolgt händisch über die Klapptüre der Sudpfanne. Die Hopfengabe erfolgt in Form von Hopfenpellets. Nach Rezeptur der beiden Hauptsorten werden drei Hopfengaben am Beginn, am Ende und während des Kochvorganges zu definierten Zeitpunkten durchgeführt. Während des

Kochvorganges des ersten Sudes wird der Läutervorgang des zweiten Sudes durchgeführt. Nach Ende des Kochvorganges wird in der Brauerei Linko eine Kochrast von zehn Minuten eingehalten.

4.3.6. Entfernen des Heißtrubes:

Zur Entfernung des Heißtrubes dient in der Brauerei Linko der Whirlpool mit tangentialem Einlauf. Am Ende des Kochvorganges des ersten Sudes befindet sich jedoch die abgeläuterte Würze des zweiten Sudes im Whirlpool. Als Zwischenschritt wird so die gekochte Würze in den Läuterbottich gepumpt und anschließend die abgeläuterte Würze des zweiten Sudes in die Sudpfanne. Die gekochte Würze wird im direkten Anschluss über den tangentialen Einlauf vom Zwischenlager Läuterbottich in den Whirlpool gepumpt und verbleibt anschließend 20 Minuten im Whirlpool. Gleichzeitig zum Einpumpen in den Whirlpool wird der Kochvorgang des zweiten Sudes gestartet.

4.3.7. Würzekühlen:

Die Würzekühlung auf Anstelltemperatur zur anschließenden Vergärung der Würze wird in der Brauerei Linko über einen zweistufigen Plattenwärmetauscher (siehe **Abbildung 4-6**) bewerkstelligt. Der Wärmetauscher besteht aus zwei unterschiedlich großen Plattenwärmetauschern, die miteinander verbunden sind [37]. In der ersten (größeren) Stufe wird die heiße Würze im Gegenstromverfahren mit Leitungswasser gekühlt. Die zweite Stufe ist in der Brauerei Linko in das Kühlsystem der Gär- und Lagertanks implementiert. In der zweiten Stufe wird die Würze ebenfalls im Gegenstrom mit Eiswasser weiter abgekühlt. Bei der Würzekühlung wird die Würze aus dem Whirlpool über den Plattenwärmetauscher in das Gärgefäß gepumpt. Die Betätigung der Ventile für den Leitungs- und Eiswasserzufluss sowie die Betätigung der Pumpe werden händisch durchgeführt. Das erhitzte Leitungswasser der ersten Stufe wird zur anschließenden Reinigung des Sudhauses verwendet.

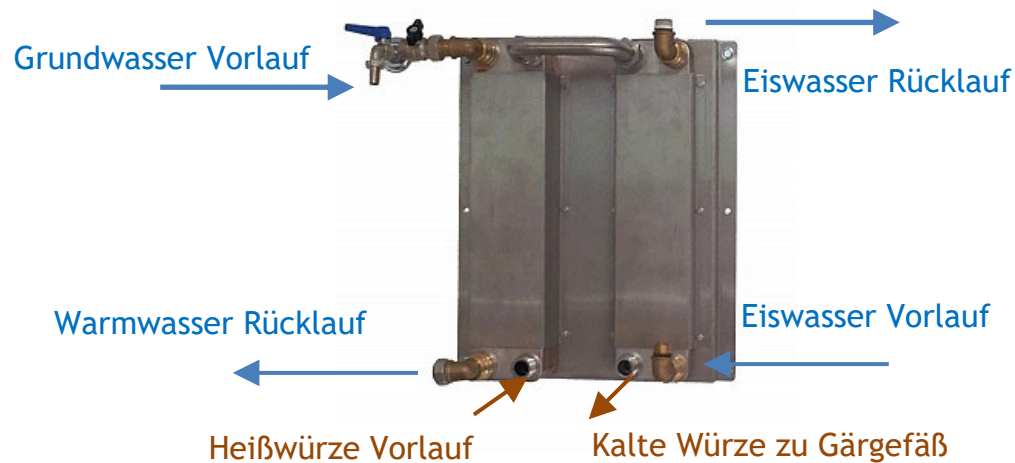


Abbildung 4-6: Plattenwärmetauscher Brauerei Linko [39]

4.3.8. Gärung

Die Gärung erfolgte in der Brauerei Linko, je nach freien Kapazitäten entweder im „klassischen“ Verfahren im Hauptgärbottich und anschließendem Umschlauchen in einen der flachkonischen Lagertanks, oder im „Eintankverfahren“ in einen der beiden ZKT. Die Hefe wird anschließend an die Würzekühlung händisch zur Würze hinzugefügt. Die Messung des Vergärungsgrades (Maß der Umwandlung) erfolgt in der Brauerei Linko mit einem sogenannten Aräometer (Bierspindel). Der Vergärungsgrad bezeichnet die prozentuale vergorene Menge der angestellten Extraktmenge [2]. Die Gärung der untergärigen Biersorten wird in der Brauerei Linko bei einer Anstelltemperatur von sechs °C durchgeführt.

Die Bierspindel besteht aus einem beschwerten Schwimmkörper aus Glas, der durch die Dichte der zu messenden Flüssigkeit einen Auftrieb erfährt. Je höher der Extraktgehalt desto geringer ist die Eintauchtiefe der Bierspindel in die Flüssigkeit. An der Bierspindel befindet sich eine Skalierung, üblicherweise nach Plato⁴, welche bei der Messung am Flüssigkeitsspiegel abgelesen wird. Für die Messung wird eine Gärprobe in einen Messzylinder überführt. In der Brauerei Linko wird die Bestimmung der Extraktmenge anschließend an die Würzekühlung durchgeführt (Stammwürzebestimmung) und während des Hauptgärprozesses üblicherweise alle zwei Tage. Tritt keine Änderung des Extraktgehaltes auf, wird im „klassischen“ Verfahren das Bier in einen Lagertank umgeschlaucht, beziehungsweise im „Eintankverfahren“ die Hefeentnahme durchgeführt. Die Dauer des Hauptgärprozesses beträgt in der Brauerei Linko ca. zehn Tage. [40]

⁴ Grad Plato ist der Stammwürzegehalt des Bieres in Gramm je 100 Gramm Bier [3]

5. Automatisierung und Optimierung der Kleinbrauanlage

In diesem Kapitel wird die durchgeführte Automatisierung der bestehenden Brauanlage, beziehungsweise genauer die Steuerungskomponenten und die Programmierung des Prozessablaufes vorgestellt. Die Automatisierung der Anlage wurde durchgeführt, da die Arbeit in der Brauerei mit vielen Wartezeiten verbunden war. Um die Absatzmenge zu erhöhen, den Prozessablauf zu optimieren beziehungsweise zu standardisieren, wird eine Vollautomatisierung des Brau- und Reinigungsprozesses angestrebt. Im Rahmen der Automatisierung und dieser Arbeit wurde die elektrische Energieversorgung der Brauerei und des Gasthofes neugestaltet, da die bestehende Anspeisung bereits an den Grenzen Ihrer Leistungsfähigkeit angelangt war. Die Stromversorgung und die Herstellung der Peripherie für die Steuerungskomponenten geschahen ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit und wurden größtenteils selbst erledigt. Die Dokumentation dieser Arbeiten kann in [41] nachgelesen werden.

5.1. Änderungen der Anlage

In diesem Abschnitt werden die getätigten Umbauarbeiten und vorgenommenen Änderungen der Kleinbrauanlage und der Prozessführung vorgestellt. Vom Altbestand wurden im Wesentlichen nur die Geräte des Sudhauses, die Sudpfanne und der Läuterbottich/Whirlpool übernommen. Die Temperatursteuerung der Maischautomatik wurde ersetzt und im neuen Steuerungskonzept implementiert. Zusätzlich wurde eine Rezeptverwaltung (siehe Abschnitt 5.6.3) für verschiedene Biersorten implementiert um zukünftige Produktportfolioerweiterungen bewerkstelligen zu können. Die manuell geschaltene Blockpumpe wurde durch eine mittels Frequenzumrichter angesteuerte Impellarpumpe ersetzt. Die Verwendung einer Impellarpumpe in Kombination mit Frequenzumrichter hat jenen Vorteil, dass Pumpgeschwindigkeiten z. B. während der Würzekühlung geregelt werden können, um die gewünschten Prozesstemperaturen zu erreichen. Ein weiterer Vorteil der Impellarpumpe ist die Trockenlauffähigkeit. Um automatisierte Pumpvorgänge bewerkstelligen zu können, wurde die Anlage fixverrohrt. Für die Steuerung der Flüssigkeitsverläufe wurden nach Stand der Technik pneumatisch angetriebene Ventile verwendet. Aus Prozesssicherheitsgründen wurden alle Ventile zusätzlich mit Stellungsrückmeldern ausgestattet, um Fehlstellungen identifizieren zu können. Nach energietechnischen Gesichtspunkten sind im Bereich der Ventiltechnik zwar elektrische Antriebe vorzuziehen, auf Grund der Prozesssicherheit, der kurzen Betriebszeiten und anraten von technischen Mitarbeitern der Privatbrauerei Egger

wurde jedoch davon abgesehen. Um den Flüssigkeitszulauf zur und Flüssigkeitsablauf von der Anlage mengenmäßig bestimmen zu können, wurde die gesamte Anlage auf einem mittels Wägezellen gewogenen Rahmen aufgebaut. Da der Läuterbottich und Whirlpool in einem Behältnis aufgebaut sind, wurde im Ablauf des Whirlpools ein Druckdifferenzsensor installiert, um den Füllstand des Whirlpools unabhängig vom Füllstand des Läuterbottichs bestimmen zu können. Die neukonzeptionierte und automatisierte Anlage ist in **Abbildung 5-1** dargestellt.

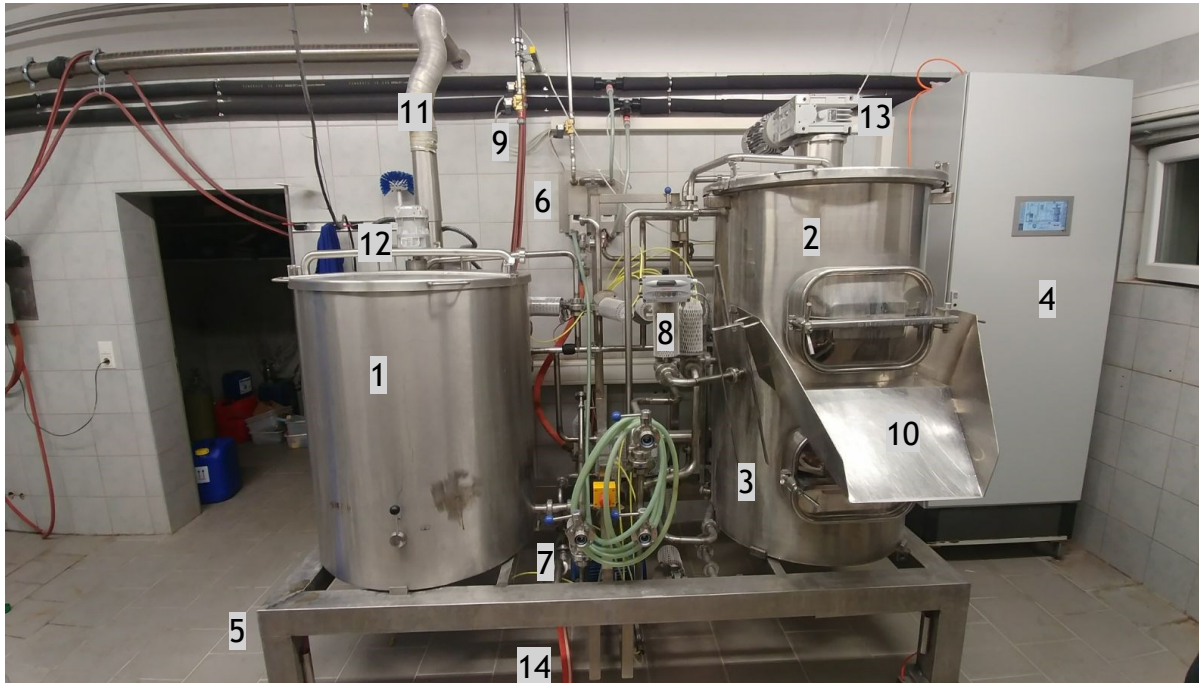


Abbildung 5-1: Brauanlage „neu“ Gasthof Linko

- (1) Sudpfanne/Maischepfanne (2) Läuterbottich (3) Whirlpool
- (4) Schaltschrank mit Steuerungskomponenten (5) Rahmen mit Wägezellen (6) Würzekühler (7) Impellarpumpe (8) Regelventil „r2“
- (9) Kalt- und Warmwasserzulauf (10) Treberrutsche (11) Dunstschlot
- (12) Antriebsmotor Rührwerk) (13) Antriebsmotor Austreereinheit
- (14) Abfluss

5.2. Änderungen Gärraum

Für die Lagertanks wurde ein neuer Kühlraum errichtet, welcher nach Stand der Technik mit Aluminium-PU-Schaum Paneelen der Fa. BRUCHA gedämmt wurde. Im Zuge der Optimierung wurden ebenfalls die Lagerkapazitäten der Brauerei erweitert. Zu den bestehenden Lagerkapazitäten wurden sechs weitere ZKT zu je zehn hl angeschafft. Die Tanks sind ebenfalls doppelwandig für eine Direktkühlung

ausgeführt. Die Temperaturregelung mithilfe der Magnetventile wurde im neuen Steuerungskonzept implementiert (siehe Abschnitt 5.6.5). Zusätzlich wurde ein neuer vergrößerter Ausgleichsbehälter für den Kühlkreislauf angeschafft, um ein ständiges Anfahren und Abstellen der Kältemaschine zu verhindern. Durch die Erweiterung der Lagerkapazitäten, wurde auch eine neue Kältemaschine angeschafft, um die Kühlung der vollen Lagerkapazität sicher stellen zu können. Das Kühlsystemkonzept für die Gär- und Lagertanks wurde von einem Eiswassersystem auf ein System mit einem Glykol-Wasser-Gemisch umgestellt. Die Umstellung wird angestrebt, da mit einem glykolgeführten System niedrigere Kühltemperaturen erreicht werden können als mit der bisherigen Eiswasserkühlung und damit eine längere Haltbarkeit des Bieres. Aktuell wird jedoch die Kühlung der Tanks noch vom bestehenden System bewerkstelligt, da die Umbauarbeiten am Gärraum/Lagerraum noch nicht abgeschlossen sind

5.3. Änderungen in der Prozessführung

Um den Brauprozess automatisch bewerkstelligen zu können, müssen die Prozessführungen und technischen Lösungen für die bisher manuell betätigten Verfahrensschritte definiert werden. Das Verfahrensflussbild (siehe **Abbildung 5-5**) der automatisierten Prozessführung wurde von Moritz Hübl im Rahmen seiner Arbeit „Fördertechnische Optimierung einer Brauanlage“ [42] erstellt. Gemeinsam mit Moritz Hübl wurden auf Basis der Prozessanforderungen die Anordnung der Sensoren und Aktoren erarbeitet, um die Prozessführung sicherzustellen. Für genaue Informationen über die verwendeten Sensoren und Aktoren sei hier auf [41] verwiesen. Der Brauprozess selbst wurde im Rahmen der Automatisierung im Vergleich zur bisherigen Prozessführung nicht verändert. Durch die Automatisierung der Anlage wurden jedoch die manuellen Tätigkeiten auf ein Minimum reduziert. Aufgrund der Arbeitserleichterung und der Anschaffung zusätzlicher ZKT, wird zukünftig eine Prozessführung mit zwei aufeinanderfolgender Brauprozesse angestrebt (Vierfachsud), um bisherige Lieferengpässe zu beseitigen und das Fassungsvermögen der neuen ZKT vollständig auszunutzen. Die Automatisierung des Prozessablaufes bezieht sich in der aktuellen Ausbaustufe auf die Würzeherstellung. Die Schrotung des Malzes wird aktuell wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben manuell durchgeführt.

5.3.1. Reinigung der Anlage/CIP

Wie auch im Brauprozess wurde eine Vollautomatisierung des Reinigungsprozesses angestrebt. Aktuell muss am Beginn des automatischen Prozesses das Reinigungsgemisch (120l Wasser + CIP-Lauge) manuell in die Sudpfanne eingebracht

werden. Die anschließende Reinigung der Anlage erfolgt mit dem neuen Steuerungskonzept vollautomatisch. Durch die Fixverrohrung der Anlage muss durch die Reinigungsprozessführung sichergestellt werden, dass alle Rohrleitungen gereinigt werden. Der Start des Reinigungsprozesses erfolgt mittels Start-Button beziehungsweise Eingabe der Startzeit. Die Reinigungsflüssigkeit wird aufgeheizt und gemäß des Reinigungsablaufes (siehe Anhang) durch die Anlagenbauteile gepumpt, danach werden alle Anlagenteile mit Frischwasser gespült.

5.3.2. Maischprozess

Die Temperaturführung und Rastzeiten sind vom Rezept vorgegeben. Durch die Implementierte Rezeptverwaltung können hier im Vergleich zur Maischautomatik der bestehenden Anlage, verschiedenste Prozessführungen realisiert werden. Die Menge des Brauwassers wird automatisch nach den im Rezept hinterlegten Warm- und Kaltwassermengen über die Ventile „kw“, „ww“ und „s1“ (siehe **Abbildung 5-5**) in die Sudpfanne geleitet. Die Mengenbestimmung erfolgt dabei über eine laufende Gewichtsmessung der Anlage. Die Malzzugabe erfolgt in weiterer Folge, wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben, manuell. In der Steuerung des Prozessablaufes wurde hier ein Haltepunkt implementiert, sobald das Malz hinzugefügt wurde muss vom Maschinenbediener eine Messagebox bestätigt werden, danach beginnt der Aufheizvorgang der Maische nach den im Rezept hinterlegten Temperaturstufen und Rastzeiten bis hin zur Abmaischetemperatur.

5.3.3. Läuervorgang

Im Läuervorgang wurde, im Rahmen der Automatisierung, das manuell betätigte Läuerventil der zentralen Abläuerstation, durch ein pneumatisch betätigtes Regelventil ersetzt. Im Verfahrensflussbild (siehe **Abbildung 5-5**) wird das Regelventil als Ventil „r2“ bezeichnet. Durch die Verwendung eines Regelventils kann die Stellung des Ventils an den aktuellen Durchfluss angepasst werden und somit die Dauer des Läuervorganges an die gewünschte Prozessführung angepasst werden. Der aktuelle Durchfluss wird über den Druckdifferenzsensor „PDT1“ (siehe **Abbildung 5-5**), der unterhalb des Whirlpools angebracht ist bestimmt. Über den Ausgabewert des Druckdifferenzsensors wird steuerungsintern der Füllstand im Whirlpool errechnet und in weiterer Folge über die Änderung des Füllstandes der aktuelle Durchfluss. Die Nachgüsse werden automatisch bei Erreichen der jeweiligen Füllstände im Whirlpool über die Ventile „ww“ und „s2“ gesteuert, die mengenmäßige Bestimmung der Nachgüsse erfolgt dabei über eine laufende Gewichtsmessung der Anlage. Für das Schneiden und das an den Läuervorgang anschließende Austrebern wurde eine automatische Austrebereinheit mit

Schneidwerk in den Läuterbottich integriert (siehe **Abbildung 5-2**). Der Antrieb der Austreereinheit erfolgt über einen 1,5 KW Asynchron-Getriebemotor, welcher über einen Frequenzumrichter von der SPS angesteuert wird (siehe Abschnitt 5.5.3). Das Schneiden des Treberkuchens erfolgt in negativer Drehrichtung der Austreereinheit, das Schneidwerk wird dabei mit 0,72 U/min durch den Treberkuchen geführt. Das nach dem Läuterstop anschließende Austrebern wird durch den Austreberarm in positiver Drehrichtung der Austreereinheit bewerkstelligt. Die für den Austreibervorgang notwendige Öffnung der Mannlochöffnung muss aktuell noch manuell durchgeführt werden, in der Software ist dazu ein Haltepunkt implementiert, der vom Maschinenbediener bestätigt werden muss. Im vollautomatischen Betrieb soll die Öffnung der Mannlochöffnung zukünftig mit einem Pneumatikzylinder erfolgen.

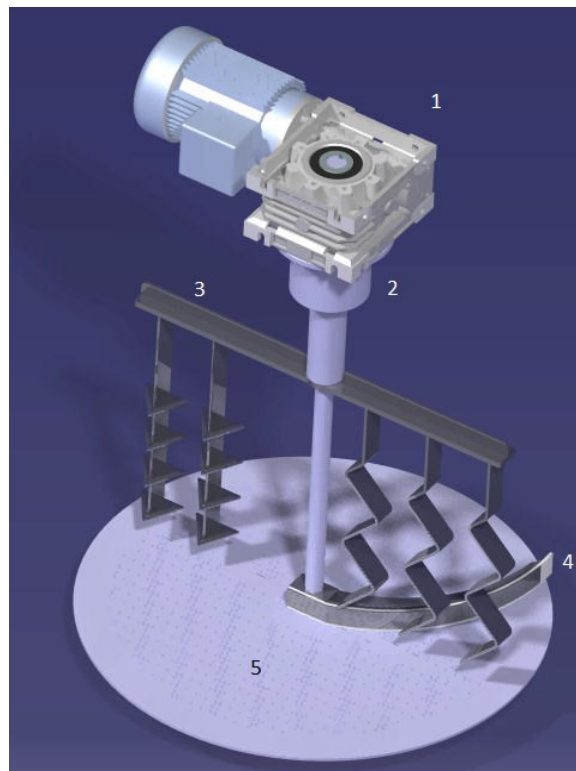


Abbildung 5-2: Aufbau Austreereinheit [42]

- (1) Asynchronmotor mit Getriebe, (2) Freilaufeinheit, (3) Schneidwerk
(4) Austreberarm, (5) Senkboden

5.3.4. Kochen der Würze

Die Dauer der Würzekochung wurde ebenfalls als Prozessvariable in die Rezeptverwaltung implementiert, und kann damit je nach Biersorte individuell variiert werden. Für einen vollautomatischen Brauprozess muss die Hopfengabe

während der Würzekochung automatisch erfolgen. Aktuell muss diese manuell durchgeführt werden, in der Visualisierung (siehe Abschnitt 5.6.2) werden dazu während des Kochvorganges die verbleibende Zeit bis zur Hopfengabe dargestellt. Das Konzept für die zukünftige automatische Hopfengabe ist in **Abbildung 5-3** dargestellt. Die Hopfengabeapparatur besteht dabei aus einem Hauptkörper mit Kammern für die einzelnen Hopfengaben und ist am Kopf der Sudpfanne angebracht. Die Kammern werden vor Start des Brauprozess mit den Hopfenmengen für das jeweilige Rezept befüllt. Die Hopfengabe erfolgt während des Kochvorganges durch drehen des Hauptkörpers, wobei die Hopfenpellets durch das Fallrohr in die Sudpfanne der Würze zugegeben werden. Die Drehung des Hauptkörpers wird durch einen Schrittmotor der Fa. B&R bewerkstelligt.

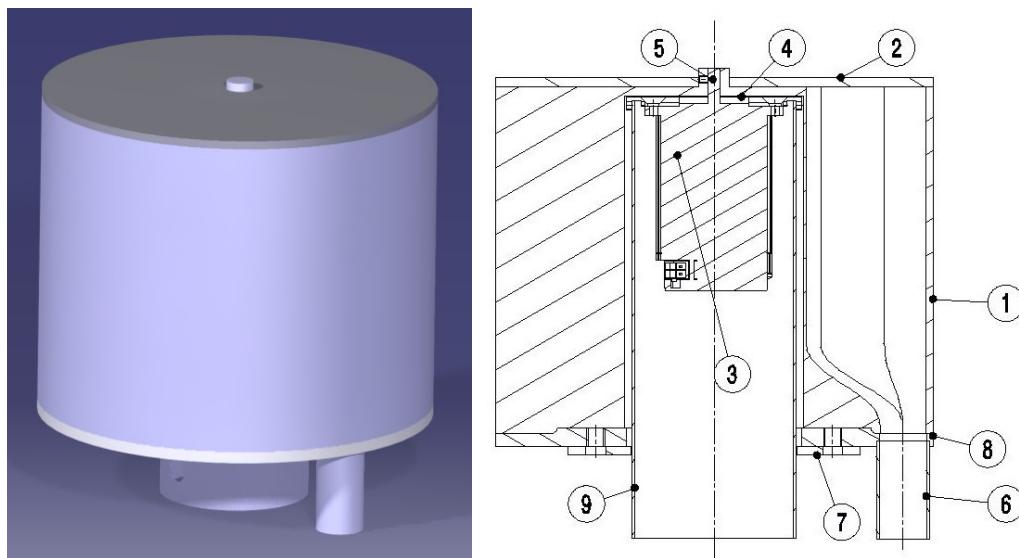


Abbildung 5-3: Konzept Hopfengabe [42]

- (1) Hauptkörper mit Kammern, (2) Deckel, (3) Schrittmotor, (4) Schrittmotormontageplatte, (5) Motorwelle, (6) Fallrohr in die Sudpfanne, (7) Untere Grundplatte, (8) Obere Grundplatte, (9) Tragrohr

5.3.5. Pumpvorgänge/Würzekühlung

Die Automatisierung der Pumpvorgänge und das Würzekühlen wurden durch die jeweiligen pneumatisch angetriebenen Scheibenventile und der Impellarpumpe realisiert. Die größte Herausforderung in Bezug auf die Prozesssicherheit war hierbei die Erkennung des Pumpendes der einzelnen Pumpvorgänge. Das Ende der Pumpvorgänge wird Softwaretechnisch auf Basis der Füllstände und der Gewichtsverlagerung der Anlage bestimmt (siehe Abschnitt 5.6.6).

5.4. Verfahrensflussbild

Das Verfahrensflussbild des automatisierten Brauprozesses ist in **Abbildung 5-5** dargestellt. Die Bezeichnung der Anlagenbauteile im Verfahrensflussbild wurde numerisch durchgeführt. Die Bezeichnung der Sensoren und Aktoren erfolgte auf Basis der Deutschen Industrienorm 19227 für graphische Symbole und Kennbuchstaben für die Prozessleittechnik [43]. Zum besseren Verständnis sind die Bezeichnungen der Anlagenbauteile in Tabelle 5-1 dargestellt.

Tabelle 5-1: Anlagenbauteilbezeichnungen Verfahrensflussbild

Bezeichnung	Anlagenbauteil
B1	Sudpfanne
B2	Läuterbottich
B3	Whirlpool
B4	CIP-Lauge Behälter
EWVK	Eiswasser-Würzekühler
FWVK	Frischwasser-Würzekühler

5.4.1. Ventile

Die Bezeichnung der Ventile erfolgt auf Basis der Nummerierung in Tabelle 5-1. Ventile mit der Bezeichnung „e“ entsprechen den Einlaufventilen (Ausnahme „t3“ für tangentialen Einlauf des Whirlpools) und Ventile mit der Bezeichnung „u“ entsprechen den Ablaufventilen. Die Ventile für die jeweiligen Sprühdüsen besitzen die Bezeichnung „s“. Eine Besonderheit hierbei stellt das Ventil „s6“ dar, welches für eine Frischwasserzuleitung zur Saugseite der Pumpe (Reinigungszwecke) herstellt. Alle produktberührenden Ventile und jene für die Sprühdüsen wurden als pneumatisch betätigte Scheibenventile DN25 mit Stellungsrückmelder ausgeführt (siehe **Abbildung 5-4**). Die Meldung der Stellung erfolgt über eine Schalfahne, welche sich beim Öffnen und Schließen des Ventils mitbewegt. Der Stellungsrückmelder ist an der Position der geöffneten Stellung angebracht und meldet, wenn die Schalfahne an dieser Position steht. Die Ansteuerung der Druckluftventile erfolgt über eine sogenannte Ventilinsel (Magnetventile), welche von der Steuerung mit einem geeigneten Ventilinselmodul (siehe Abschnitt 5.5.4) angesprochen wird. Die Ventile wurden mit Gewinde/Gewinde Anschluss in die Anlage integriert, um defekte Ventile möglichst schnell ersetzen zu können.

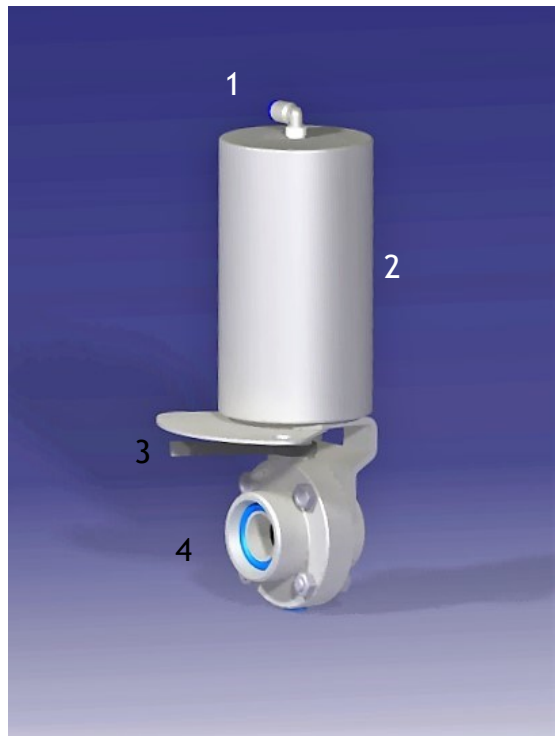


Abbildung 5-4: Pneumatisch angetriebenes Scheibenventil (DN25)

- (1) Pneumatikanschluss
- (2) pneumatischer Antrieb
- (3) Schaltfahne für Positionsbestimmung
- (4) Scheibenventil

Die Ventile für Warm- und Kaltwasserzulauf, sowie die Ventile für die Würzekühlung („kw“, „ww“, „k1“ und „k2“) wurden als elektrisch betätigte Scheibenventile ausgeführt. Das Regelventil „r2“ wird direkt angesteuert von einem digitalen elektropneumatischen Stellungsregler (im Verfahrensflussbild als GC1 bezeichnet). Zusätzlich ist das Ventil mit einem Wegmesssystem zur Bestimmung der Iststellung ausgestattet. In Tabelle 5-2 ist eine Übersicht aller Ventile und ihrem Verfahrenszweck dargestellt.

Tabelle 5-2: Übersicht Ventile

Bezeichnung	Verfahrenszweck
s1	Sprühkopf - Sudpfanne
s2	Sprühkopf - Läuterbottich
s3	Sprühkopf - Whirlpool
s4	Sprühkopf - CIP-Lauge Behälter
s5	Sprühkopf 2 - Läuterbottich
s6	Frischwasserzuleitung Saugseite Pumpe
u1	Ablauf Sudpfanne
u2	Ablauf Läuterbottich
u3	Ablauf Whirlpool
u4	Ablauf CIP-Lauge Behälter
e1	Einlauf Sudpfanne
e2	Einlauf Läuterbottich
t3	Tangentialer Einlauf Whirlpool
wk	Zuleitung Würzekühler
re	Verbindung Druckleitung-Reinigungsleitung
r2	Regelventil für Läturvorgang
Man Druck	Manuelles Scheibenventil auf der Druckleitung
Man Saut	Manuelles Scheibenventil auf der Saugleitung
Man CIP	Manuelles Ventil für CIP-Reinigung
kw / ww	Kaltwasser / Warmwasser Zuleitung
k1	Kaltwasser Zuleitung für FWWK
k2	Eiswasser Vorlauf für EWWK

5.4.2. Aktoren

Die Bezeichnung der Aktoren wurde ebenfalls auf Basis der Nummerierung der Anlagenteile gewählt. Der Antriebsmotor für das Rührwerk wurde von der bestehenden Anlage (siehe Kapitel 4) übernommen, der Motor ist als Getriebemotor mit einer Nennleistung von 70 W und einer Nenndrehzahl von 32 U/min ausgeführt und wird direkt über ein Leistungsschütz angeschalten. Die Antriebsmotoren der Impellarpumpe und der Austreereinheit (beide 1,5 KW Nennleistung) werden über einen Frequenzumrichter (siehe Abschnitt 5.5.3) angesteuert. Die Heizungen der Sudpfanne und des CIP-Lauge Behälters werden ebenfalls über Leistungsschütze angesteuert. Der elektropneumatische Stellungsregler „GC1“ wird über einen analogen Ausgang der Steuerung angesteuert. In Tabelle 5-3 ist eine Übersicht der Aktoren dargestellt.

Tabelle 5-3: Übersicht Aktoren

Bezeichnung	Verfahrenszweck
M1	Antriebsmotor Rührwerk Sudpfanne
M2	Antriebsmotor Austreibereinheit
P1	Impellarpumpe
h1	Sudpfannenheizung
h4	Heizung CIP-Lauge Behälter
SC1	Frequenzumrichter für M2
SC2	Frequenzumrichter für P1
GC1	elektropneumatischen Stellungsregler Ventil „r2“

5.4.3. Sensoren

Für die Automatisierung werden im wesentlichen Temperatursensoren, Wägezellen und ein Druckdifferenzsensor zur Füllstandsbestimmung im Whirlpool verwendet. Als Temperatursensoren wurden einheitlich PT100-Klasse-A Sensoren verwendet. Der Druckdifferenzsensor ist wesentlich für die unabhängige Bestimmung der Füllstände in Whirlpool und Läuterbottich, der verwendete Sensor ist lebensmittelecht ausgeführt und Eingangsseitig mit einem Relativdruck von 0..100 mbar belastbar und für die auftretenden Füllhöhen im Whirlpool (0..700 mm) dimensioniert. Der Anlagenrahmen wurde auf insgesamt vier Wägezellen der Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) aufgebaut, wodurch eine Schwerpunktbestimmung der Anlage und in weiterer Folge eine Bestimmung der Füllstände in den einzelnen Behältern ermöglicht wird. Die vier Wägezellen wurden auf Anweisung der Fa. HBM jeweils in einem Verbund von zwei Zellen parallel verdrahtet (links/rechts).

Tabelle 5-4: Übersicht Sensoren

Bezeichnung	Verfahrenszweck
TJT1	Temperatursensor Sudpfanne
TJT2	Temperatursensor Zuleitung
TJT3	Temperatursensor CIP-Lauge Behälter
TJT4	Temperatursensor Würzekühlung
WJT1	Wägezellen links
WJT2	Wägezellen rechts
PDT1	Druckdifferenzsensor Whirlpool
PDT2	Druckdifferenzsensor CIP-Lauge Behälter

5.4.4. Aktueller Stand

Die Umbauarbeiten der Anlage sind aktuell noch nicht abgeschlossen, nicht realisiert wurden zum jetzigen Zeitpunkt beispielsweise die Aktoren „h4“ und die Hopfengabeapparatur (siehe Abschnitt 5.3.4). Bei den Sensoren wurden der Temperatursensor und der Druckdifferenzsensor des CIP-Lauge Behälters (TJT3 und PDT2) aktuell nicht realisiert.

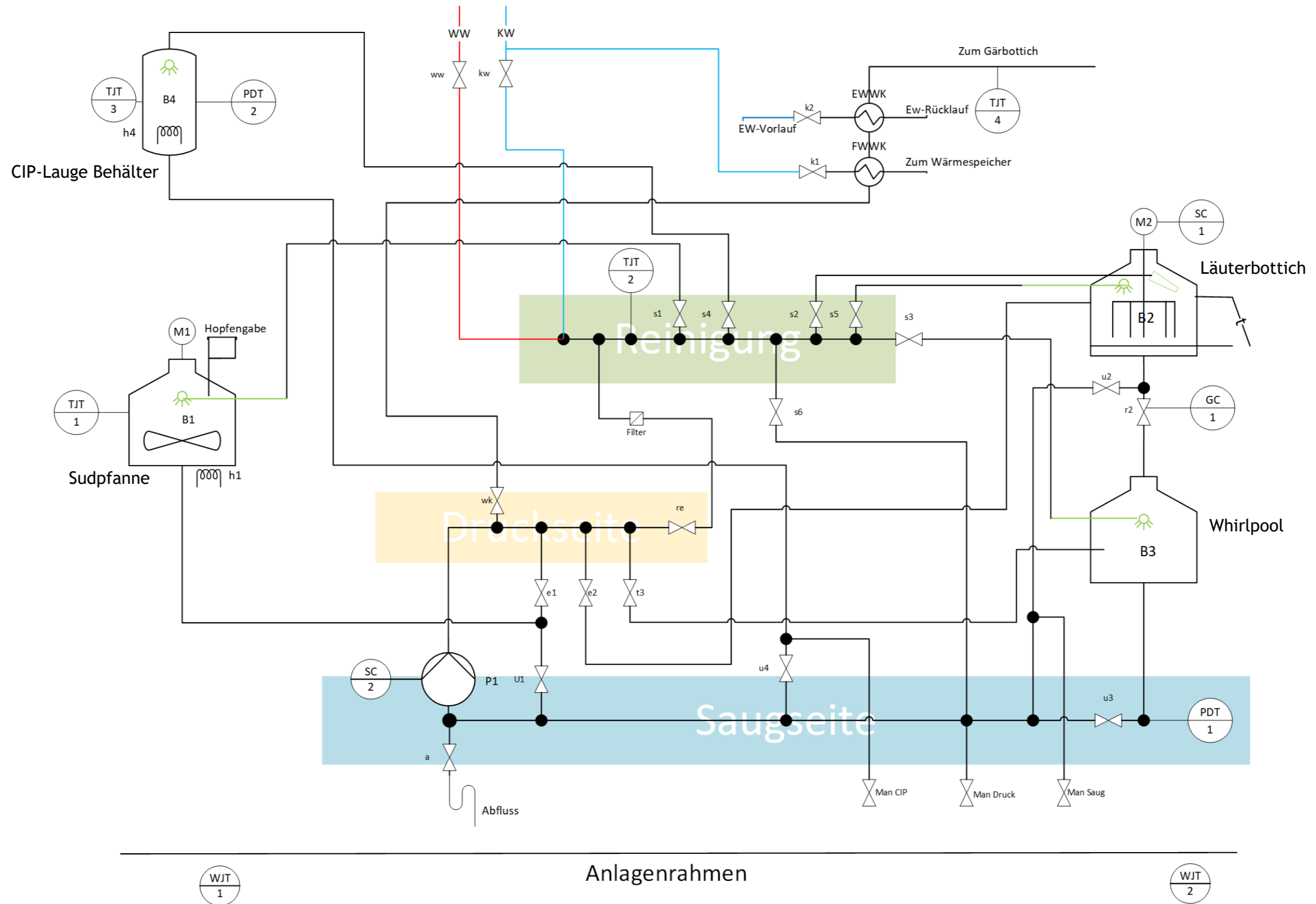


Abbildung 5-5: Verfahrensflussbild automatisierte Kleinbrauanlage Gasthof Linko [42]

5.5. Steuerungskomponenten

In diesem Abschnitt wird auf die verwendeten Steuerungskomponenten und deren Topographie eingegangen. Das verwendete System stammt von der Fa. Bernecker & Rainer (B&R). Als Zentrale Steuerungseinheit wurde ein sogenanntes Power Panel verwendet. Das Power Panel ist über das Bussystem „POWERLINK“ (siehe Abschnitt 5.5.5) mit dem I/O-System, sowie den Frequenzumrichtern für die Ansteuerung der Impellarpumpe (P1) und des Austrebermotors (M2) verbunden. Für die Ansteuerung der einzelnen Druckluftventile wurde eine Ventilinsel (Magnetventile) der Fa. NORGREN verwendet, die wiederum von einem externen Ventilinselmodul der Fa. B&R angesteuert wird. Das Ventilinselmodul ist als externes Modul über den B&R internen X2X-Link mit dem restlichen I/O-System verbunden. In **Abbildung 5-8** ist die Topographie des Steuerungssystems, wie es in der Brauerei Linko installiert ist, dargestellt.

5.5.1. Power Panel C70

Power Panel bezeichnet ein Terminal mit eingebauter speicherprogrammierbarer Steuerung (SPS) und stellt damit eine zentrale Einheit für die Visualisierung, Bedienung und Steuerung der Anlage dar. Die Power Panels der Fa. B&R zeichnen sich durch ihre kompakte Konstruktion und ihrer einfachen Montage aus. Die Front des Power Panels ist in Schutzart IP65 ausgeführt und somit optimal für raue Umgebungen wie beispielsweise in Brauereien geeignet. Das in der Brauerei Linko verwendete Power Panel mit der Typenbezeichnung „4PPC70_101G_20W“ besitzt einen Touchscreen mit einer Displaydiagonale von 10,1“. Als CPU ist ein INTEL ATOM Prozessor verbaut, wodurch Applikationen mit Geschwindigkeiten bis zu 1 ms Zykluszeit möglich sind. [44]

5.5.2. X20-I/O-System

Das X20 I/O System bezeichnet ein scheibenbasierendes Ein- und Ausgangssystem. Das System ist beliebig nach den jeweiligen Anforderungen konfigurierbar und erweiterbar. Die I/O Module des X20-Systems sind dreigeteilt, ein Modul besteht dabei aus Busmodul (Grundplatte), Elektronikmodul und Feldklemme (siehe **Abbildung 5-6**). Die Kommunikation mit der SPS geschieht über das Bussystem Powerlink (siehe Abschnitt 5.5.5), für die Einbindung des I/O-Systems in den Powerlink dient der sogenannte X20-Buscontroller (siehe **Abbildung 5-8**). Der X2X Link dient zur Kommunikation zwischen den Busmodulen sowohl internen als auch externen wie beispielsweise der dezentralen Ventilinselansteuerung (siehe Abschnitt 5.5.4). Den X2X Link bildet eine durchgängige Rückwand zwischen den Busmodulen

als auch das X2X-Link Kabel, welches für Einbindung von dezentralen Modulen oder Verbindung von mehreren I/O-Systemen in verschiedenen Schaltschränken dient. [45]

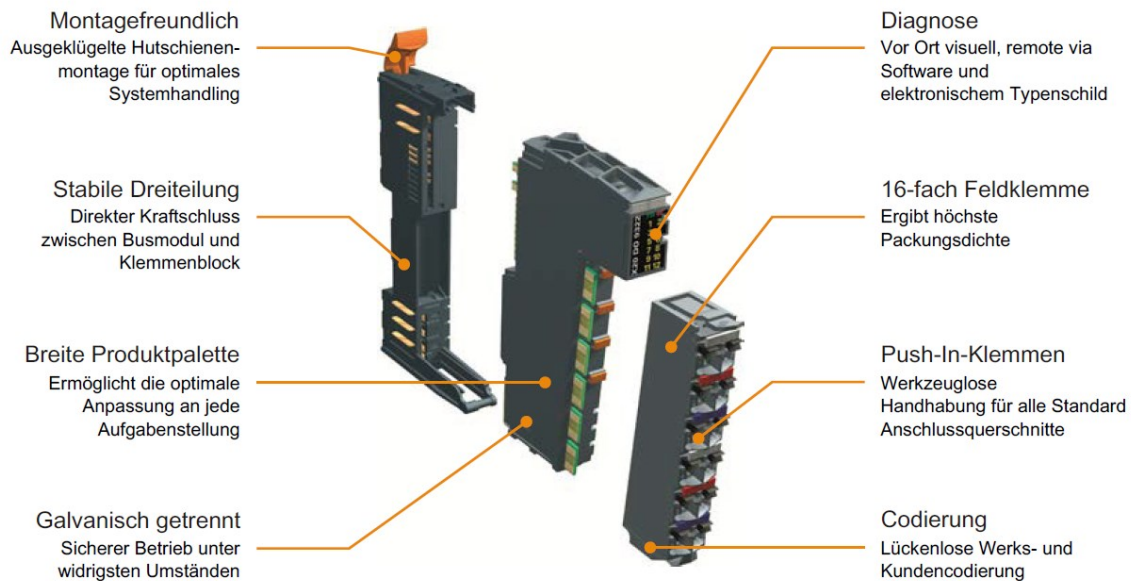


Abbildung 5-6: Aufbau X20 I/O-Modul [45]

Die in der Brauerei Linko verwendete Konfiguration der I/O Module wurde im Rahmen der absolvierten Schulungen zur Software „Automation Studio“ gemeinsam mit Mitarbeitern im Education Support der Fa. B&R erstellt. Die Konfiguration (siehe **Abbildung 5-7** und Tabelle 5-5) wurde auf Basis der Anforderungen für die Automatisierung erstellt:

- Temperaturmessungen mittels PT100 Sensoren
- Gewichtsmessungen mittels Dehnungsmessstreifen (Wägezellen)
- Analoge Eingänge für Druckdifferenzsensor (Füllstandsmessung) und Iststellung des Regelscheibenventils (Ventil „r2“)
- Analogere Ausgang für die Ansteuerung des Regelscheibenventils (Ventil „r2“)
- Digitale Eingänge für Stellungsrückmelder der pneumatisch angetriebenen Scheibenventile
- Digitale Ausgänge für die Ansteuerung von diversen Aktoren (z. B. Rührwerkmotor, Sudpfannenheizung, Heißwasser-Boiler, Druckluftkompressor)
- Schrittmotoransteuerung für Hopfengabeapparatur (siehe Abschnitt 5.3.4)

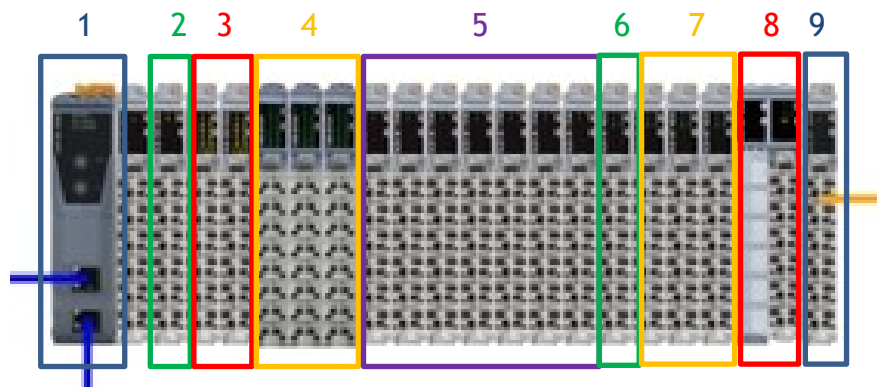


Abbildung 5-7: Übersicht X20 I/O-System Brauerei Linko

- (1) X20BC0083 (2) X20AO2622
 (3) X20DO9322 (4) X20DIF371
 (5) X20AI1744 (6) X20AI4622
 (7) X20AT4222 (8) X20SM1436
 (9) X20BT9400

Tabelle 5-5: Beschreibung der verwendeten X20 I/O Module in der Brauerei Linko

Bezeichnung	Beschreibung
X20BC0083	Bus Controller, ermöglicht die Kopplung von X2X Link I/O Knoten an POWERLINK [46]
X20AO2622	Analoges Ausgangsmodul, 2 analoge Ausgangskanäle mit 13 Bit Wandlerauflösung, Strom- oder Spannungssignal für jeden Kanal wählbar [47]
X20DO9322	Digitales Ausgangsmodul, zwölf digitale Ausgangskanäle in ein-Leitertechnik (Source Beschaltung) [48]
X20DIF371	Digitales Eingangsmodul, 16 digitale Eingangskanäle in ein-Leitertechnik (Sink Beschaltung) [49]
X20AI1744	Vollbrücken DMS-Eingang für Gewichtsmessung mit vier-Leiter oder sechs-Leiter Dehnungsmessstreifen-Zellen (DMS-Zellen) [50]
X20AI4622	Analoges Eingangsmodul, 4 analoge Eingangskanäle mit 13 Bit Wandlerauflösung, Strom- oder Spannungssignal für jeden Kanal wählbar [51]
X20AT4222	Eingangsmodul für Widerstands-Temperaturmessung, 4 Eingangskanäle für PT100/PT1000 Widerstandstemperatursensoren [52]

X20SM1436	Schrittmotormodul zur Ansteuerung von Schrittmotoren mit einer Nennspannung von 24-39 VDC bei einem Motorstrom bis 3A, zusätzlich 4 dig. Gebereingänge (externe Positionsbestimmung) [53]
X20BT9400	Bus Transmitter, wird am Ende des X20 Blocks gesteckt zur Anbindung externer Ein- und Ausgangsmodule an den X2X-Link (Anschluss für X2X Link Kabel) [54]

5.5.3. ACOPOSInverter P74

Die verwendeten Frequenzumrichter für die Ansteuerung des Austrebermotors (M2) und der Impellarpumpe (P1) stammen ebenfalls von der Fa. B&R. ACOPOSInverter P74 bezeichnet die Produktfamilie der Frequenzumrichter. Die Überlegung, die Umrichter ebenfalls von der Fa. B&R zu beziehen, war der Plug&Play Einsatz, die ACOPOSInverter kommunizieren direkt über das Bussystem „POWERLINK“ mit der Steuerung und können direkt in der B&R eigenen Software „Automation Studio“ parametrisiert, getestet und angesprochen werden. Beide Antriebsmotoren (M2, P1) besitzen eine Nennleistung von 1,5 KW, auf Basis dieser wurde die Baugröße der Umrichter gewählt. In der Produktfamilie wird diese Baugröße als „Baugröße B“ bezeichnet. Die Anspeisung der Umrichter wurde einphasig gewählt, aufgrund von Ausführungsbestimmungen die die Absicherung der Umrichter betreffen. Die genaue Typenbezeichnung der eingesetzten Umrichter lautet „8I74S200150.01P-1“. [55]

5.5.4. Ventilinselansteuerung XV-Modul

Die Ansteuerung der pneumatisch betätigten Scheibenventile erfolgt über eine sogenannte Ventilinsel der Fa. NORGREN (Magnetventile). Für die Ansteuerung von Ventilinseln bestehen die Möglichkeiten direkt über ein Feldbussystem, oder mit einzelnen verdrahteten Ausgängen. B&R liefert mit den XV-Modulen eine weitere Möglichkeit. Der Vorteil dieses Moduls ist der verminderte Verdrahtungsaufwand im Vergleich zu einzelnen Ausgängen und Kosteneinsparung im Vergleich zu Ventilinseln mit Feldbuslösungen. Das XV-Modul wird direkt über den X2X-Link angesprochen und ausgangsseitig über einen Multipolanschluss mit der Ventilinsel verbunden. Für den Einsatz in der Brauerei Linko wurde das Modul in IP67 Ausführung gewählt, da dieses extern (außerhalb des Schaltschranks) an der Ventilinsel installiert wurde. Das Modul wird dabei direkt über einen 25-poligen D-SUB-Stecker (24 Ausgänge und Massepotential) an der Ventilinsel gesteckt. Die genaue Bezeichnung des verwendeten Moduls ist „7XV124.50-51“. [56]

5.5.5. Powerlink

Der POWERLINK bezeichnet ein Echtzeit-Ethernet-Bussystem, welches eine gänzlich Software basierte Lösung für Echtzeitübertragung auf Basis des IEEE 802.3 Ethernet-Standard bietet. Da der POWERLINK eine reine Software Lösung ist, können vom Anwender die bereits bekannten standardisierten Ethernet Komponenten und Diagnose-Tools verwendet werden. [57]

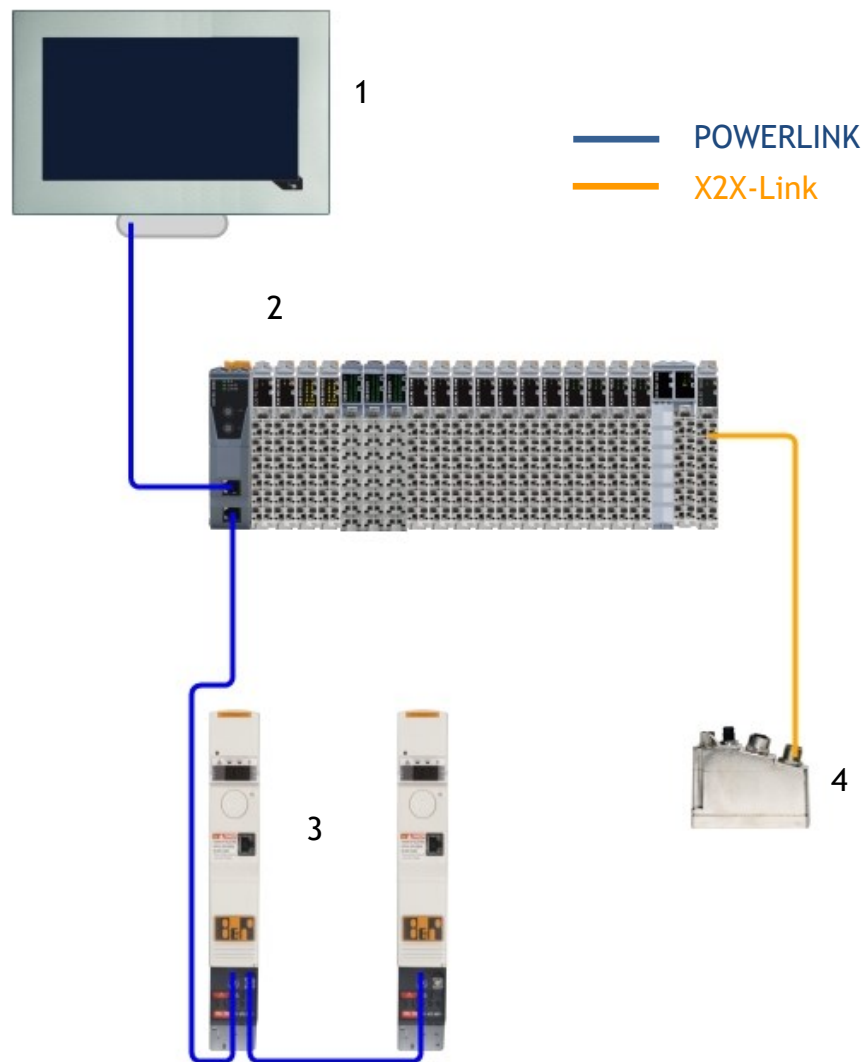


Abbildung 5-8: Topographie der Steuerungskomponenten

- (1) Powerpanel C70
- (2) X20 I/O - System
- (3) Frequenzumrichter (ACOPOS Inverter P74)
- (4) Ventilinselansteuerungsmodul (7XV124.50-51)

5.6. Programmierung der Steuerung

In diesem Abschnitt wird auf die Programmierung und den Programmablauf des automatisierten Brauprozesses eingegangen. Die Programmierung der B&R Komponenten erfolgt mit der hauseigenen Software dem B&R Automation Studio. Um die Software kennen zu lernen, wurde im Rahmen der Arbeit eine einwöchige Schulung im Haus der Fa. B&R absolviert. In dieser Schulung erlangten die Teilnehmer grundsätzliches Wissen über die Anwendung der Software und die Programmierung von B&R Systemen. Als Programmiersprache wurde hauptsächlich Strukturierter Text und teilweise Kontaktplan verwendet.

5.6.1. Softwarestruktur

Für die Programmstruktur des Prozessablaufes wurden die einzelnen Arbeitsschritte in simple Ventilschalt- und Pumpvorgänge unterteilt und mithilfe eines übergeordneten Hauptprogramms nacheinander gemäß dem Prozessablauf abgearbeitet. Das Hauptprogramm übergibt einen Startbefehl an den jeweiligen Prozess und dieser liefert am Ende des Prozesses einen Erledigt-Befehl zurück an das Hauptprogramm (siehe **Abbildung 5-9**). Nach Erledigung eines Prozesses startet das Hauptprogramm den nächsten Teilprozess. Auf Basis des Gesamtprozesses wurde gemeinsam mit Moritz Hübl eine Unterteilung in die Teilprozesse und ein Prozessablauf erstellt, im Anhang ist dazu der logische Prozessablaufplan dargestellt. Die Unterteilung in die einzelnen Prozessschritte liefert den Vorteil, dass Teilprozesse die mehrmals ausgeführt werden, programmtechnisch nur einmal ausprogrammiert werden müssen. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei Prozessänderungen im Wesentlichen nur das Hauptprogramm adaptiert werden muss. Neben dem Brauprozess wurde noch ein zweites Hauptprogramm für den Reinigungsprozess zum Reinigen der Anlage vor und nach dem eigentlichem Brauprozess entwickelt. Neben dem Prozessablauf wurden noch eine Alarmverwaltung für den Fehlerfall und eine Rezeptverwaltung für verschiedene Biersorten implementiert. B&R liefert hierfür bereits vorgefertigte Lösungen, sogenannte mapp-Bausteine, die im Rahmen der Programmierung übernommen und für die Anwendung in der Brauerei adaptiert wurden. Die B&R mapp Technology bezeichnet dabei die Abdeckung wiederkehrender Programmieraufgaben, die durch vorgefertigte Bausteine im Automation Studio bereitgestellt sind [58]. Die Temperatursteuerung der neuen zehn hl Tanks wurde ebenfalls in die Steuerung implementiert.

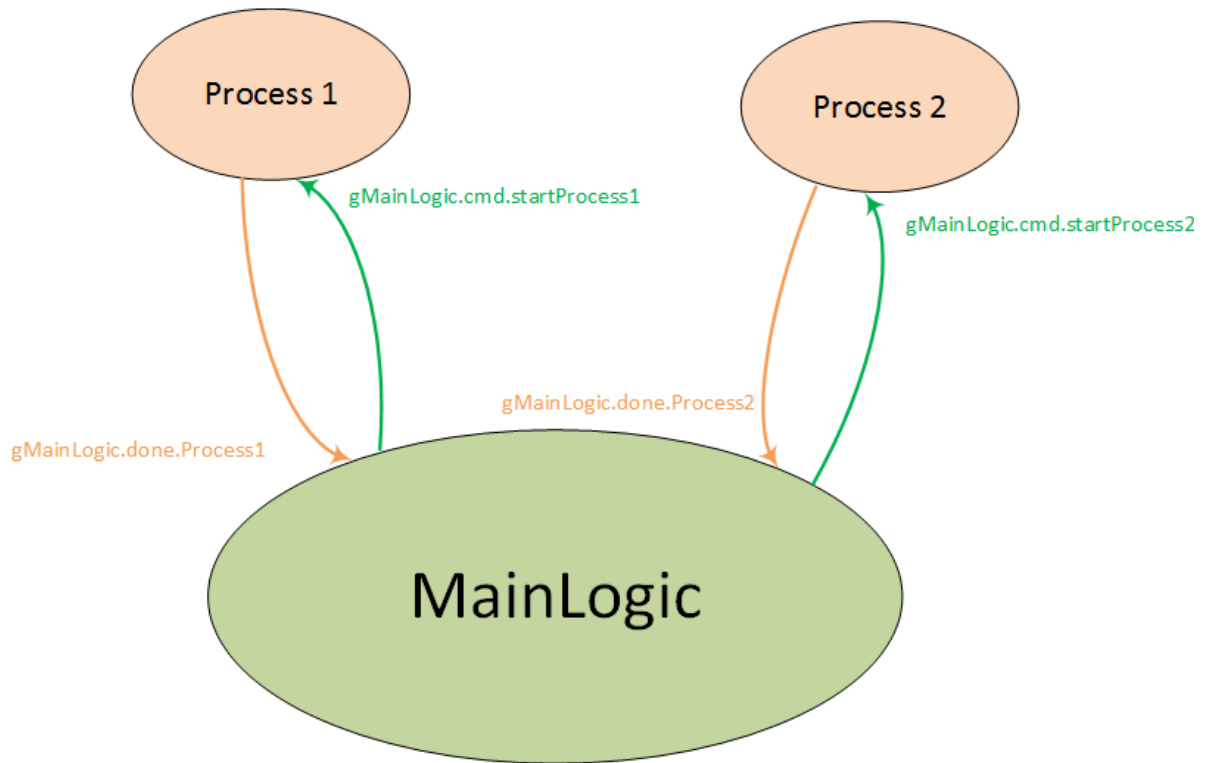


Abbildung 5-9: Softwarestruktur

5.6.2. Visualisierung

Im B&R Automation Studio sind für Visualisierungen bereits vorgefertigte Templates vorhanden. Um die Visualisierung für den Maschinenbediener realitätsgetreu zu gestalten, wurden die Anlagenteile aus den CAD-Zeichnungen der Anlage gerendert und in die Visualisierung eingebettet. In **Abbildung 5-10** ist die Homeseite der Visualisierung dargestellt, in der alle für den Prozess notwendigen Daten wie beispielsweise aktueller Prozessschritt, Sudpfannentemperatur und während der Pumpprozesse der Flüssigkeitsverlauf dargestellt wird. Über die Buttons an der rechten und linken Seite erfolgt ein Wechsel zu der gewünschten Seite der Visualisierung. Die Visualisierung wird direkt am Power Panel angezeigt und kann im Netzwerk des Gasthauses über Virtual Network Computing (VNC) erreicht werden. Dazu wurde an der Steuerung ein VNC-Server eingerichtet.

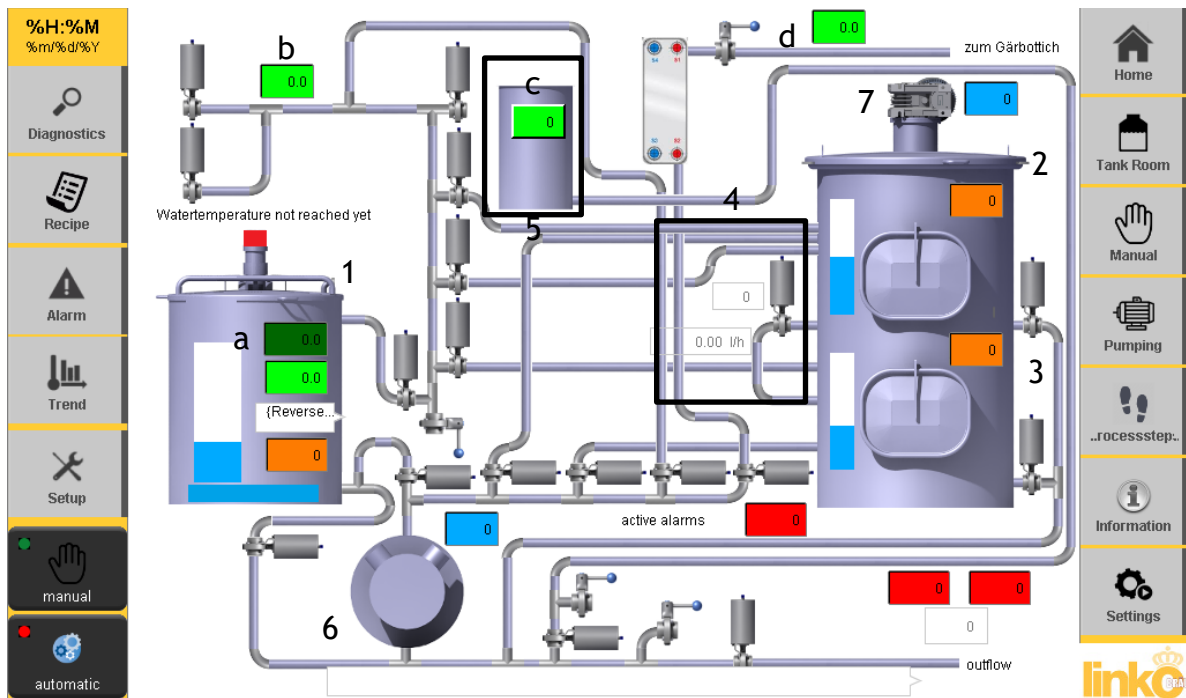


Abbildung 5-10: Visualisierung Brauanlage „neu“ Brauerei Linko

- (1) Sudpfanne/Maischepfanne (2) Läuterbottich (3) Whirlpool
- (4) Abläuterstation mit Regelventil „r2“ + Durchflussanzeige
- (5) CIP-Lauge Behälter (6) Impellarpumpe P1
- (7) Antriebsmotor Austreibereinheit M2
- (a) Temperatursensor TJT1 (b) Temperatursensor TJT2
- (c) Temperatursensor TJT3 (d) Temperatursensor TJT4

Die dargestellten Informationen in den Ausgabefeldern bezeichnen je nach Farbe des Ausgabefeldes verschiedenste Prozessvariablen:

- Dunkelgrün - Solltemperatur
- Hellgrün - aktuelle Temperatur
- Orange - Füllstand des jeweiligen Behältnisses
- Weiß - verbleibende Rastzeit (Maischprozess) /Kochzeit
- Blau - aktuelle Frequenz des Antriebes

5.6.3. Rezeptverwaltung

Für die Rezeptverwaltung wurde die mapp-Komponente „MpRecipe“ verwendet, die mapp Komponente liefert vorgefertigte Funktionsblöcke die in der Programmierung parametrisiert werden müssen. Als Basis der Rezeptverwaltung dient der Funktionsblock MpRecipeXml, welcher die Möglichkeit bietet, Parameter von einer bestimmten Datei im XML Format zu laden beziehungsweise zu speichern. Als

Anwender müssen dem Funktionsblock lediglich der Speicherort der Datei und der Dateiname übergeben werden. Über einen Registrier-Funktionsblock (MpRecipeRegPar) muss der gewünschte Rezeptparameter in der Rezeptverwaltung registriert werden. Für die Anbindung der Rezeptverwaltung zur Visualisierung wird der Funktionsblock MpRecipeUI verwendet. In der Automation Studio Hilfe ist eine Schritt-für-Schritt Anleitung (Getting Started Beispiel) für die Erstellung einer Rezeptverwaltung mithilfe der mapp-Komponente verfügbar. Die erstellte Rezeptverwaltung für die Brauerei Linko ist in **Abbildung 5-11** dargestellt.

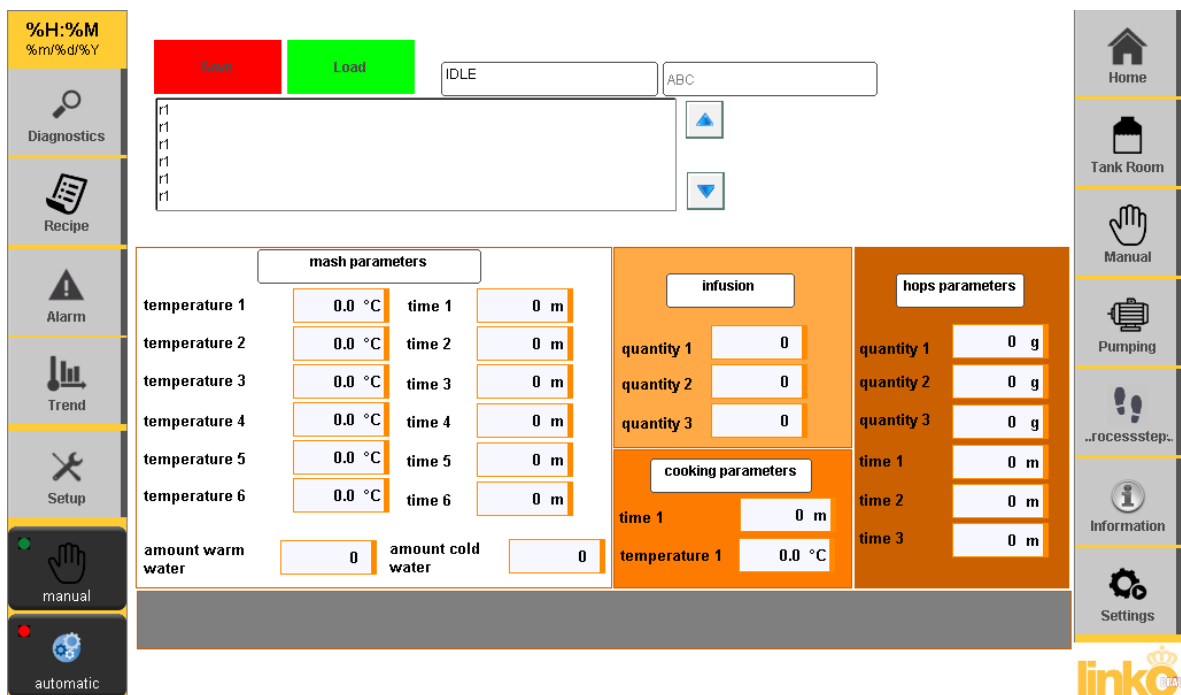


Abbildung 5-11: Visualisierung der Rezeptverwaltung Brauerei Linko

In der Rezeptverwaltung der Brauerei Linko können die Maischparameter (Temperaturstufen, Rastzeiten, Wassermengen für den Einlassvorgang), die Kochparameter (Zeit und Temperatur), die Aufgießparameter (Mengen der Nachgüsse im Läutervorgang), sowie die Hopfenmengen und Hopfengabezeiten eingegeben werden. Über die Scrollbuttons können die verschiedenen Rezepte ausgewählt werden. Am oberen Bildrand befinden sich die Buttons für Speichern und Laden des jeweiligen Rezepts, sowie eine Statusanzeige der Rezeptverwaltung.

5.6.4. Achsenansteuerung

Die Achsenansteuerung bezeichnet die Programmierung einer Antriebsachse (z. B. ACOPOSInverter oder Schrittmotormodul). Die Achsenansteuerung in der Brauerei Linko wird über die mapp-Komponente MpAxis bewerkstelligt. Die MpAxis Komponente bietet dabei Standardfunktionen für die Ansteuerung und Konfiguration

von Einzelachsen. Mithilfe der mapp-Komponente können sämtliche Arten von Antriebsachsen angesprochen werden, die über den POWERLINK mit der SPS verbunden sind. Zusätzlich werden über die mapp-Komponente zyklische Antriebsdaten, wie beispielsweise aktuelles Antriebsmoment bereitgestellt. [59]

5.6.5. Temperatursteuerung ZKT

Die Temperatursteuerung der, im Zuge der Optimierung, zusätzlich angeschafften ZKT wurde aus Kosteneffizienz-Gründen in das Steuerungskonzept implementiert. Jeder Tank wurde dazu mit einem PT100-Temperaturwiderstandsensor ausgestattet, um die aktuelle Temperatur bestimmen zu können. Als Aktor der Direktkühlung dient ein elektrisch betätigtes Scheibenventil, welches den Zufluss des Kühlmittels in die Mantelkühlung steuert. Die Kühlung erfolgt dabei in einer zwei Punkt Regelung (Ein/Aus). Um ständiges Ein- und Ausschalten des Ventils zu verhindern, basiert die Regelung auf einer Schalthysterese (siehe **Abbildung 5-12**).

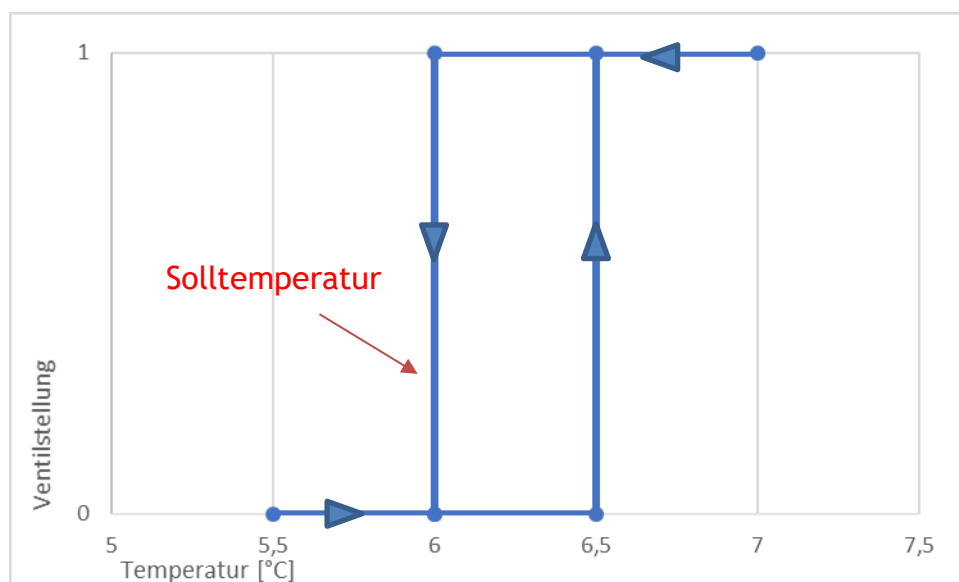


Abbildung 5-12: Schalthysterese Temperatursteuerung ZKT

Die Schalthysterese des Ventils erlaubt so Tanktemperaturen von 0,5 °C über der Solltemperatur. Für die Bedienung der Temperatursteuerung wurde eine eigene Seite in der Visualisierung erstellt (siehe **Abbildung 5-13**), in der die gewünschte Solltemperatur eingestellt und die Regelung für die einzelnen Tanks aktiviert und deaktiviert werden kann. Die Solltemperatur der einzelnen Tanks wird in den dunkelgrünen Ausgabefeldern angezeigt, bei Klick auf das Feld erscheint ein numerisches Eingabetouchpad für die Einstellung der Solltemperatur. Die aktuelle Temperatur wird in den hellgrünen Ausgabefeldern angezeigt. Bei Klick auf die

Tanknummer erscheint ein Trend der Tanktemperatur über die letzten zwölf Stunden.

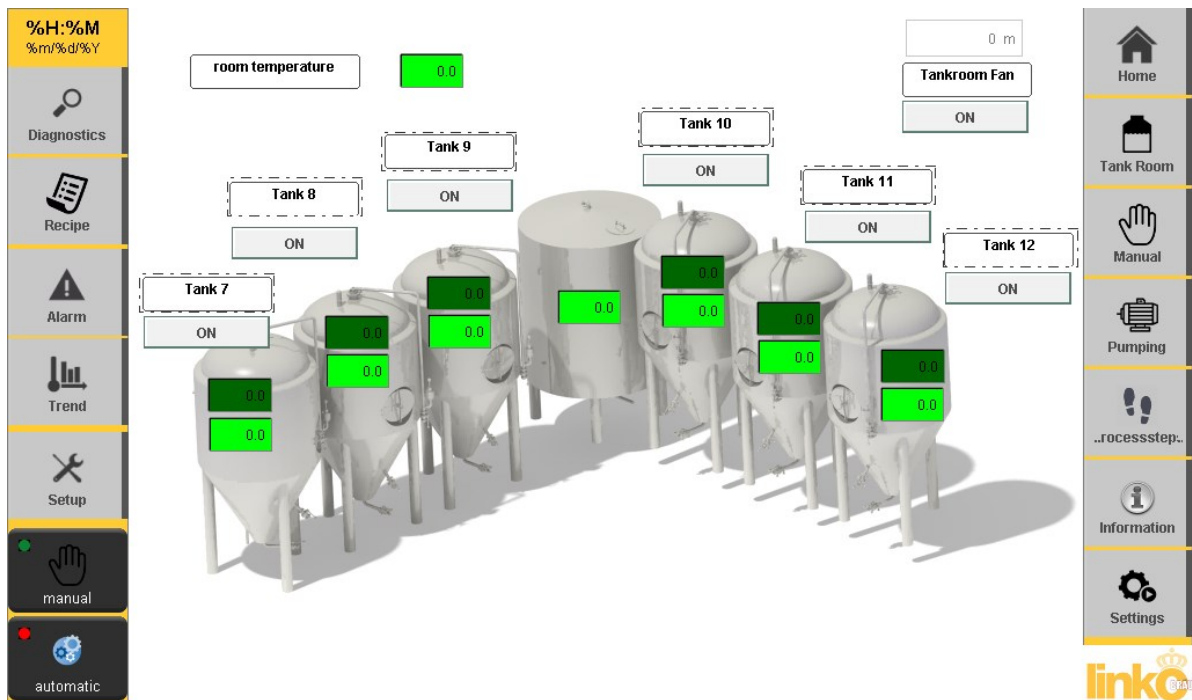


Abbildung 5-13: Visualisierung der Temperatursteuerung

5.6.6. Pumpvorgänge

Die Erkennung des Pumpendes der einzelnen Pumpvorgänge stellte die größte Herausforderung in der Programmierung des Prozessablaufes dar. Basis der Erkennung bilden zwei Überprüfungen:

- Füllstandsüberwachung
- Gewichtsverlagerung der Anlage

Für die Füllstands Berechnung wird laufend ein Schwerpunkt auf Basis der Gewichtsmessung berechnet (links/rechts). Der Füllstand des Whirlpools wird direkt mithilfe des Druckdifferenzsensors (PDT1) gemessen, wodurch eine Aufteilung der Füllstände im Läuterbottich und Whirlpool ermöglicht wird. Die Gewichtsverlagerung während der Pumpvorgänge wird ebenfalls über die Gewichtsmessung erkannt (siehe **Abbildung 5-14**). Bei jedem Pumpvorgang wird der Gewichtswert der Wägezellen WJT1 überwacht und laufend die Steigung der Änderung berechnet. Ein Pumpvorgang wird beendet sobald der Füllstand des jeweiligen Behälters gleich Null ist und keine Gewichtsänderung mehr auftritt. Eine Besonderheit stellt der Pumpvorgang zwischen dem Läuterbottich und des Whirlpools dar (siehe Abschnitt 4.3.5). Bei diesem Pumpvorgang findet keine Gewichtsverlagerung statt und der Sensorwert des

Druckdifferenzsensors im Whirlpool (PDT1) ist während des Pumpvorganges mit großen Schwankungen behaftet. Dieser Pumpvorgang wird nach einer Pumpzeit, die im Laufe einiger Testsude evaluiert wurde beendet. Um Prozesssicherheit zu gewährleisten, werden die Füllstände im Läuterbottich vor dem Pumpvorgang und im Whirlpool nach dem Pumpvorgang verglichen. Stimmen diese überein wird der Brauprozess fortgeführt, bei Nichtübereinstimmung wird ein Alarm ausgelöst und der Programmablauf gestoppt.

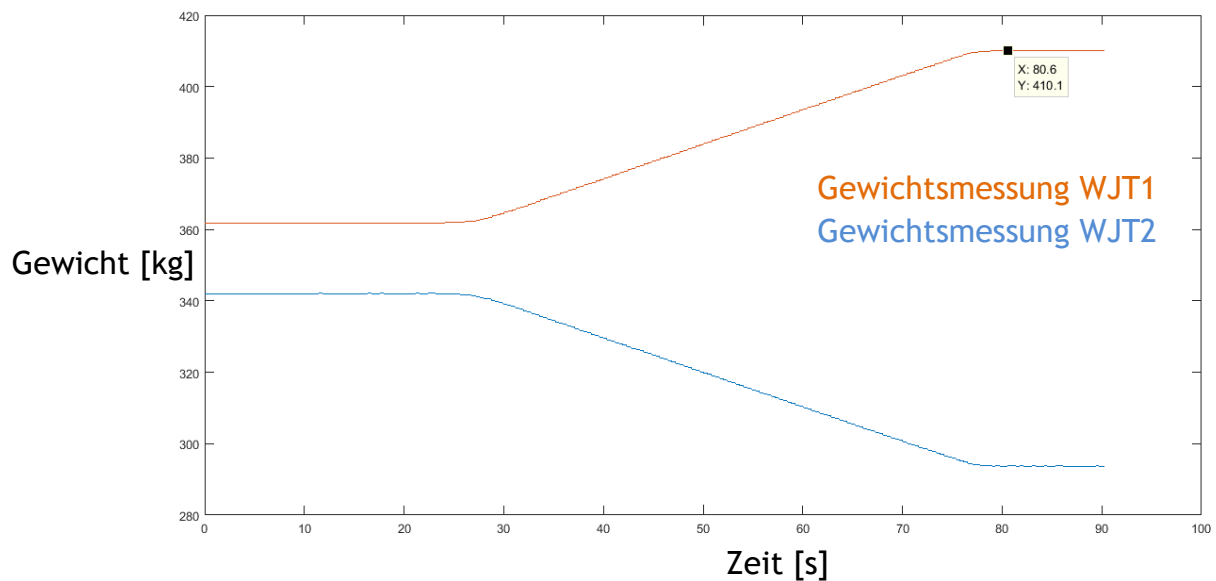


Abbildung 5-14: Gewichtsverlauf bei einem Pumpvorgang von der Sudpfanne in den Läuterbottich

6. Energiebereitstellung der Kleinbrauanlage

Für die weitere energietechnische Betrachtung des Brauprozesses sind der Energiebedarf, der Rohstoffverbrauch sowie der zeitliche Ablauf des Prozesses wesentlich. In diesem Kapitel wird auf Basis der aktuellen Anlagentechnik und Prozessführung die Energiebereitstellung der einzelnen Anlagenteile, der Energieverbrauch, der Rohstoffeinsatz sowie der zeitliche Ablauf im Brauprozess dargestellt. Die Energiebereitstellung der Brauerei Linko erfolgt ausschließlich elektrisch und wird in der folgenden Betrachtung in die Energiebereitstellung des Brauprozesses und der Peripherie differenziert. Die Peripherie bezeichnet dabei beispielsweise die Energiebereitstellung für die Warmwasserbereitung, die Kühlung der Gär- bzw. Lagertanks, oder der elektrischen Antriebe.

6.1. Energiebereitstellung Brauprozess

Die Wärmeenergiebereitstellung für das Maischen und Kochen im Brauprozess erfolgt ausschließlich über die an der Sudpfanne angebrachten Spezial-Keramik Heizkörper. Insgesamt sind sieben Spezial-Keramik Heizkörper am Boden der Sudpfanne angebracht, wodurch die Heizkörper eine unsymmetrische Last darstellen. Die gesamte Anschlussleistung der Widerstandsheizung beträgt zwölf kW.

6.2. Energiebereitstellung Peripherie

Für die Brauerei ist bei der Errichtung ein eigener Warmwasserkreislauf installiert worden, da für die Nachgüsse im Läutervorgang (siehe Abschnitt 0) prozesstechnisch höhere Temperaturen, als im normalen Trinkwarmwasserkreislauf des Gasthauses benötigt werden. Das Heißwasser wird über einen Elektroboiler bei 80 °C bereitgestellt. Die Anschlussleistung dieses Boilers beträgt zehn kW und das Fassungsvermögen 150 l. Durch die benötigte Menge an Heißwasser beim Läutervorgang (siehe Abschnitt 0) und der Prozessführung beim Maischeprozess (siehe Abschnitt 4.3.3) wird ein schneller Aufheizvorgang des Elektroboilers gefordert.

Die Kühlung der Gär- bzw. Lagertanks erfolgt wie in Abschnitt 4.2 beschrieben direkt über eine Eiswasserkühlung. Aktuell wird der Wasserkreislauf über einen herkömmlichen Kaltwassersatz mit 3,5 kW Anschlussleistung gekühlt. Im Endausbau soll dieser durch einen größeren Kaltwassersatz und das Kühlmittel Wasser im Kreislauf durch ein Glykol-Wasser Gemisch ersetzt werden.

Neben der Kühlung und Heißwasserbereitstellung werden im aktuellen Stand der Peripherie außerdem folgende Lasten zugeordnet:

- Blockpumpe
- Steuerungskomponenten B&R
- Schrotmühle
- Fasswaschanlage
- Beleuchtung Sudhaus/Gärraum

6.3. Energiebedarf Brauprozess

Um für alternative Wärmebereitstellungssysteme des Brauprozesses und allgemein einen Anhaltspunkt über den elektrischen Energiebedarf der Brauanlage zu erhalten, wurde die Stromaufnahme der Heizwiderstände in der Sudpfanne über den Prozessverlauf der Würzeherstellung mithilfe eines Power Quality Analyzers gemessen (siehe **Abbildung 6-1** und **Abbildung 6-2**). Die Messung erfolgte vor dem Umbau der Anlage, für einen Brauvorgang mit Doppelsud-Prozessführung der Sorte „PILSNER“. Da der Prozessablauf im Maische- und Kochvorgang im Zuge der Automatisierung in Bezug auf den Energieeinsatz unverändert blieb, besitzen die erhaltenen Messdaten auch für die derzeitige Anlage Gültigkeit.

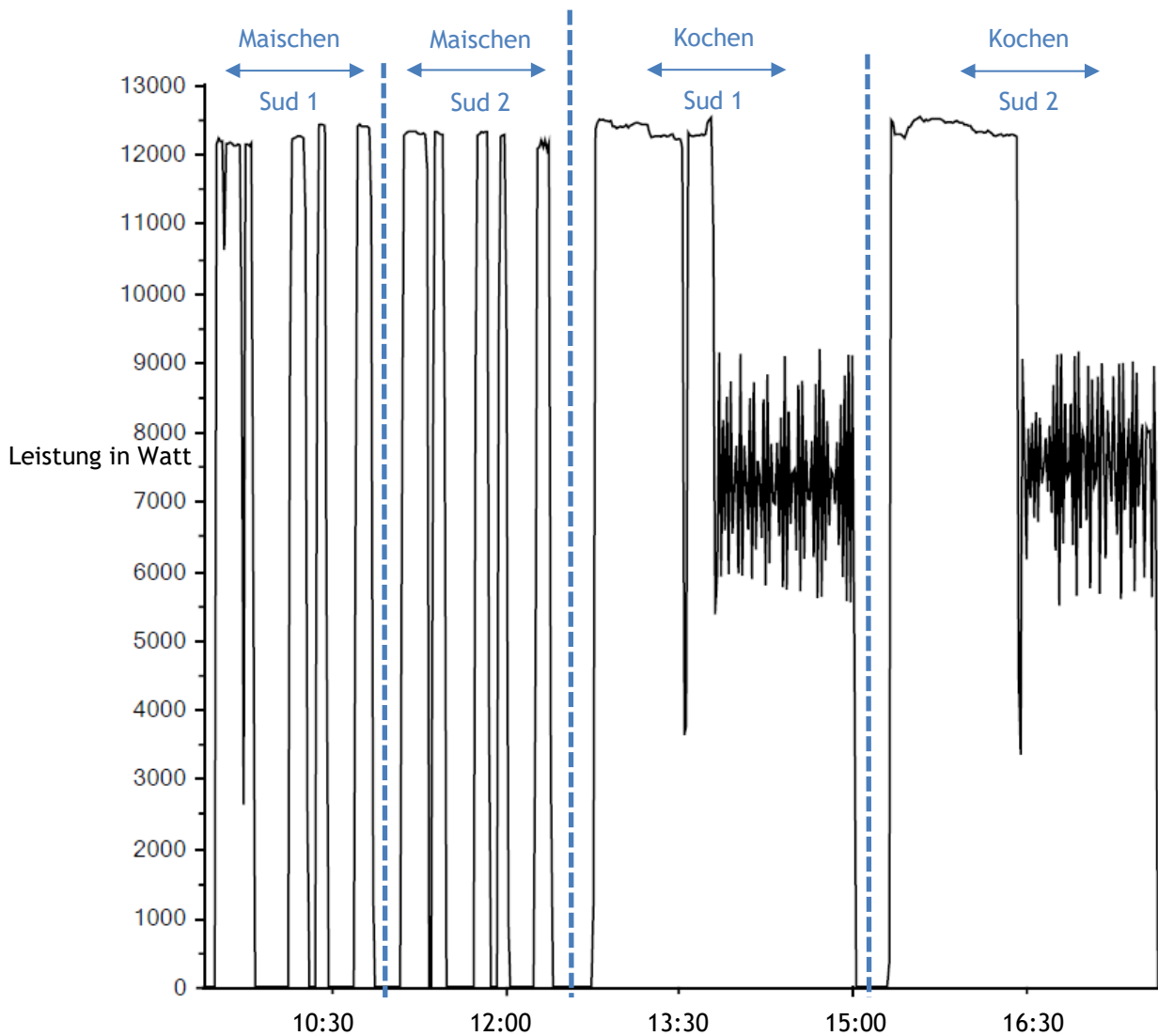


Abbildung 6-1: Momentane Leistungsaufnahme in W über den Zeitraum eines Brauprozesses

Wie in **Abbildung 6-1** ersichtlich, lassen sich anhand der Leistungsaufnahme und der bekannten Prozessführung die einzelnen Prozessschritte sehr gut identifizieren. Am Beginn der Zeitreihe werden die Maischvorgänge dargestellt. Die Regelung der Heizstäbe wird auf Basis der Prozessführung (siehe **Abbildung 4-5**) in einer Zweipunktregelung durchgeführt. Um die nächste Temperaturstufe beim Infusionsverfahren zu erreichen, bleiben die Heizwiderstände durchgehend eingeschaltet. Sobald die Temperatur erreicht ist, werden sie unter Einhaltung der Rastzeiten ausgeschaltet. Am Ende der Zeitreihe sind die Kochvorgänge beider Sude dargestellt. Hier ist gut erkennbar, dass die Temperatursteuerung die Heizleistung mithilfe einer Pulsweitenmodulation zurücknimmt sobald die Kochtemperatur erreicht ist.

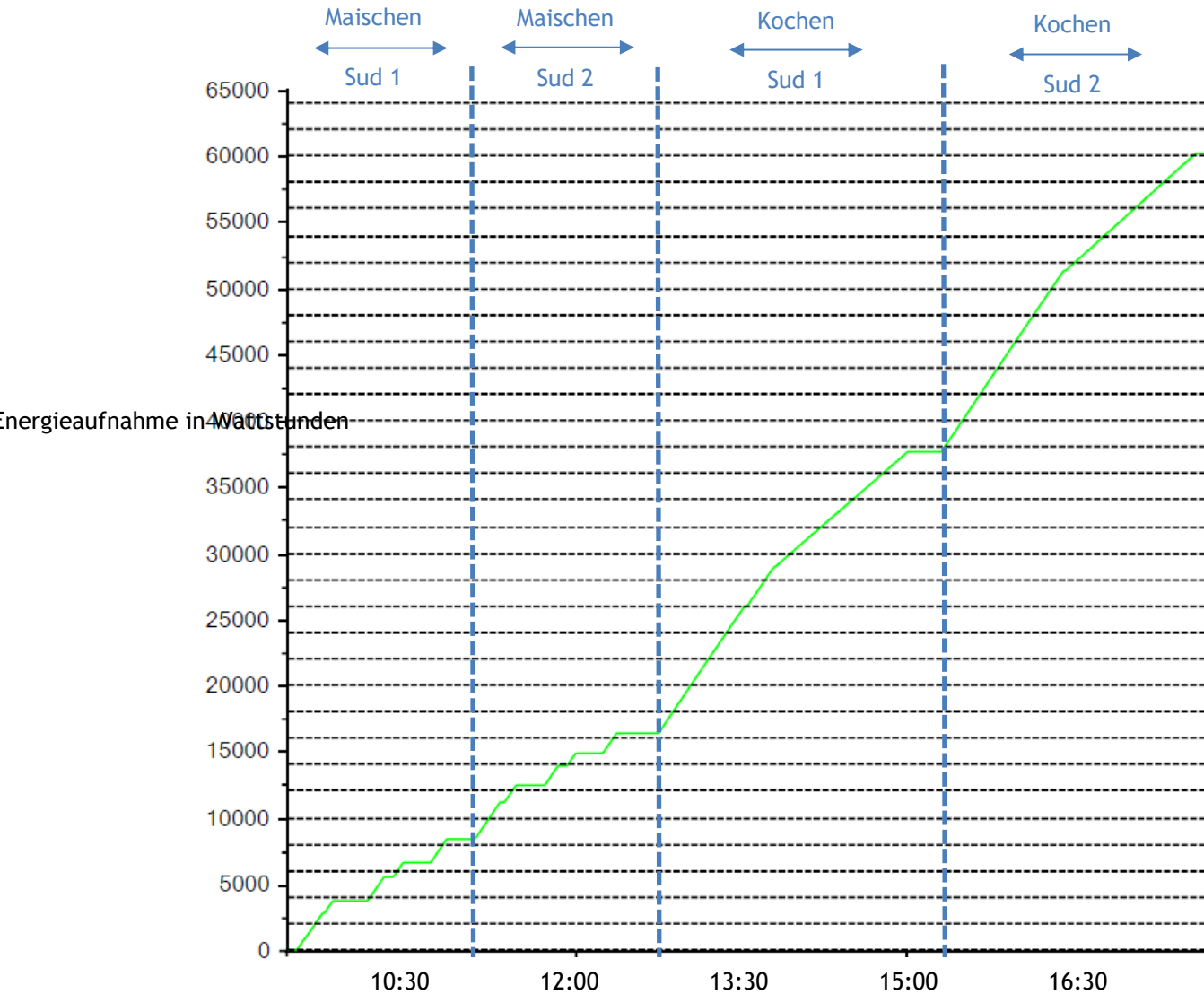


Abbildung 6-2: Energieaufnahme in Wh eines Brauprozesses

In **Abbildung 6-2** ist die kumulierte Energieaufnahme eines Brauprozesses dargestellt. Wie in **Abbildung 6-1** lassen sich auch hier die einzelnen Prozessschritte gut identifizieren. Im Verlauf der Maischvorgänge sind sehr gut die Temperaturstufen des Infusionsverfahrens erkennbar. Während der Rastzeiten tritt keine Energieaufnahme auf. Der Verlauf der Energieaufnahme entspricht bei den Maischvorgängen dem gewünschten Verlauf der Temperatur. Weiters kann festgestellt werden, dass die beiden Kochvorgänge den Großteil der Energieaufnahme verursachen. Auf Basis der erhaltenen Messdaten werden während eines Brauvorganges 60.210 Wh an elektrischer Energie für die Wärmebereitstellung verbraucht.

6.3.1. Verwendete Messtechnik

Für die Aufzeichnung des elektrischen Energieverbrauchs des Brauprozesses wurde ein HT Instruments PQA 823 Power Quality Analyzers (siehe **Abbildung 6-3**) verwendet. Die Auswertung der Messdaten erfolgte mit der von der Firma HT Instruments bereitgestellten Software TopView.



Abbildung 6-3: HT Instruments PQA 823

6.4. Energiebedarf Peripherie

Der Power Quality Analyzer stand leider nur für einen Tag zur Verfügung, daher konnte der Energiebedarf der einzelnen Peripheriegeräte nicht explizit gemessen werden. Im Zuge der Automatisierung und Umbauarbeiten der Brauerei wurde die elektrische Energiebereitstellung neugestaltet. In der nach Stand der Technik ausgeführten Anspeisung wurde eine Trennung des Gasthofes und der Brauerei durchgeführt. Um in Zukunft den jährlichen Energieverbrauch der Brauerei bestimmen zu können, wurde in der Anspeisung der Brauerei eine Zählvorrichtung integriert. Mithilfe des Stromzählers kann der gesamte Energieverbrauch bestimmt werden und mit den Messdaten aus Abschnitt 6.3 und den Aufzeichnungen der Brauvorgänge in Brauprozess und Peripherie differenziert werden.

Für die Bestimmung des gesamten Energieverbrauchs der Brauerei wurde der Zähler auf Null zurückgesetzt. Um eine repräsentative Messung zu erhalten wurde im Rahmen der zeitlichen Möglichkeiten ein Messzeitraum von eineinhalb Monaten

gewählt. In Tabelle 6-1 ist der gemessene Energieverbrauch nach eineinhalb Monaten dargestellt.

Tabelle 6-1: Zählerstände Stromverbrauch Brauerei gesamt

Datum	Zählerstand
19.09.2017	0 kWh
2.11.2017	2335,9 kWh

In diesem Zeitraum wurden in der Brauerei Linko sechs Brauvorgänge mit Doppelsudprozessführung durchgeführt. In zwei der Brauvorgänge wurden nicht die Hauptsorten „Pilsner“ und „Wiener Gerstl“ produziert, wobei für die produzierten Sorten nur geringfügige Anpassungen in den Temperaturstufen des Maischprozesses erfolgten und somit einen geringen Einfluss auf den Energiebedarf hatten und daher für die Differenzierung vernachlässigt wurden. Mit den in Abschnitt 6.3 dargestellten Messdaten des Power Quality Analyzers kann der Energiebedarf in diesem Zeitraum auf Brauprozess und Peripherie aufgeteilt werden (siehe Tabelle 6-2).

Tabelle 6-2: Aufteilung Energiebedarf in Brauprozess und Peripherie

Bezeichnung	Energiebedarf [kWh]	Energiebedarf [%]
Brauprozess	361,3	15,5
Peripherie	1974,6	84,5

Für den Energiebedarf, der eindeutig der Bierherstellung zugeordnet werden kann, muss neben dem Brauprozess die Heißwasserbereitung durch den Elektro-Boiler berücksichtigt werden. Die Wärmemenge und den damit verbundenen Energieverbrauch für die Heißwasserbereitstellung lässt sich am besten über den Massenstrom, Ein- und Ausgangstemperatur des Wasser abschätzen. Die Grundwassertemperatur T_{EIN} wurde am Standort Traisen mit zwölf °C gemessen. Die Grundwassertemperatur schwankt Jahreszeitabhängig um einige °C, für die Abschätzung des Energieverbrauchs wurde diese Schwankung vernachlässigt und die Umgebungstemperatur für die weiteren Berechnungen in dieser Arbeit mit zwölf °C festgelegt. Der Elektroboiler heizt das Grundwasser auf $T_{AUS} = 80\text{ °C}$, da diese Temperatur prozessbedingt zum Aufgießen der Trebern beim Abläutern benötigt wird (siehe Abschnitt 0).

6.4.1. Heißwasserverbrauch

Am Beginn des Prozesses werden zum Einmischen 150 Liter Wasser mit einer Temperatur von 50 °C benötigt. In der Brauerei wird dazu das 80 °C heiße Warmwasser mit Grundwasser vermischt um die entsprechende Einmischtemperatur zu erhalten. Hierzu werden in der aktuellen Prozessführung 85 Liter Heißwasser verwendet. Weitere 150 Liter Heißwasser werden zum Aufgießen der Trebern, im Prozessschritt Läutern, benötigt. Aufgrund der Doppelsud - Prozessführung der Anlage werden pro Brauprozess insgesamt 470 Liter Heißwasser benötigt. Die Mengenbestimmung in der Steuerung erfolgt auf Basis der Gewichtsmessung mittels Wägezellen (Vernachlässigung der Dichte), wodurch die Heißwassermenge 470 kg (m_{Wasser}) entspricht.

6.4.2. Energiebedarf Heißwasserbereitstellung

Der Stromverbrauch des Boilers lässt sich mit Hilfe des Wärmebedarfs für die Heißwasserbereitstellung berechnen. Die benötigten Berechnungswerte sind in Tabelle 6-3 dargestellt.

Tabelle 6-3: Berechnungswerte für die Berechnung des Wärmebedarfs

Berechnungsparameter	Wert
Mittlere Spez. Wärmekapazität des Wassers	$cp_{\text{Wasser}} = 4,182 \text{ kJ/kg}$

Der Wärmebedarf für die Heißwasserbereitstellung mittels Boiler berechnet sich nach Formel (6.1).

$$Q_{\text{Boiler}} = m_{\text{Wasser}} \cdot cp_{\text{Wasser}} \cdot (T_{\text{AUS}} - T_{\text{EIN}}) \quad (6.1)$$

$$Q_{\text{Boiler}} = 470 \text{ kg} \cdot 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot (80^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C}) = 133,7 \text{ MJ}$$

$$Q_{\text{Boiler}} = 133,7 \text{ MJ} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{1000 \text{ kJ}}{1 \text{ MJ}} = 37,1 \text{ kWh}$$

Elektrisch betriebene Warmwasserspeicher nutzen bei der Erwärmung nahezu 100 % der elektrischen Leistung aus. Verluste entstehen nur durch den Wärmeübergang zur Umgebung (thermische Isolierung). Im Zuge dieser Arbeit wurde der Boiler jedoch in die Automatisierung (siehe Abschnitt 5) eingebunden, wodurch in Zukunft keine Wärmehaltungsverluste auftreten. Für die Berechnung des Stromverbrauchs wurden die Wärmehaltungsverluste vernachlässigt. Der Stromverbrauch entspricht daher näherungsweise dem Wärmebedarf für die Heißwasserbereitstellung. Auf Basis des

Stromverbrauchs für die Heißwasserbereitstellung und der Anzahl der Brauvorgänge lässt sich der Energiebedarf weiter unterteilen in Brauprozess, Heißwasserbereitstellung und Peripherie (siehe Tabelle 6-4).

Tabelle 6-4: Aufteilung Energiebedarf in Brauprozess, Heißwasserbereitstellung und Peripherie

Bezeichnung	Energiebedarf [kWh]	Energiebedarf [%]
Brauprozess	361,3	15,5
Heißwasserbereitstellung	222,6	9,5
Peripherie	1752,0	75

Aus der Verteilung in Tabelle 6-4 wird ersichtlich, dass der Großteil (75 %) des Energiebedarfs im gemessenen Zeitraum durch die Peripheriegeräte und nicht unmittelbar durch den Brauprozess verursacht wird. Die Großverbraucher dabei sind einerseits die Fasswaschanlage und die Kühlung der Gär- und Lagertanks. Im betrachteten Zeitraum betrug die Ausschlagsmenge insgesamt ca. 2900 l, wobei diese nur auf Basis der angestrebten Ausschlagsmenge pro Sud von 240 l abgeschätzt werden kann. Für zukünftige Betrachtungen wurde in der Softwareprogrammierung (siehe Abschnitt 5.6) eine Prozessdatenerfassung implementiert, wodurch die genaue Erfassung der Ausschlagsmenge und Ausschlagstemperatur pro Sud ermöglicht wird. Mit den aktuellen Daten lässt sich der gesamte Energieeinsatz kaum oder nur auf Basis umfangreicher Näherungen auf die Ausschlagsmenge beziehen, da die Lagerzeit, der Betrieb der Fasswaschanlage und die in den Tanks lagernde Biermenge Einfluss auf den Energiebedarf der Peripherie haben.

6.5. Energiebedarf Teilprozesse

Auf Basis der Messdaten des Power Quality Analyzers und des Heißwasserverbrauches (siehe Abschnitt 6.3 und Abschnitt 6.4) kann der Energiebedarf für die jeweiligen Teilprozesse bestimmt werden. Energieeinsatz erfolgt in den Teilprozessen Maischen, Kochen und Läutern. Die Verteilung des Energieeinsatzes (siehe Tabelle 6-5) auf die Teilprozesse erfolgte auf Basis des Heißwassereinsatzes und des Energiebedarfs der Heizstäbe in den jeweiligen Prozessen. Die Aufteilung des gemessenen Energiebedarfs der Heizstäbe wurde mithilfe der Software TopView durchgeführt. Der jeweilige Heißwassereinsatz basiert auf der Prozessführung für die Hauptsorten „Pilsner“ und „Wiener Gerstl“.

Tabelle 6-5: Aufteilung des Energiebedarfs auf Teilprozesse

Prozessschritt	Energiebedarf Heizstäbe [kWh]	Heißwasser - eininsatz [kg]	Energiebedarf Heißwassereinsatz [kWh]
Maischen	16,4	170	13,4 ⁵
Kochen	43,8	-	-
Läutern	-	300	23,7

Die Verteilung des gesamten Energieeinsatzes der Heizstäbe und der Warmwasserbereitung auf die drei Prozesse ist in **Abbildung 6-4** dargestellt. Der energieintensivste Prozess ist das Kochen der Würze, wobei hier ca. 45% des gesamten Energieeinsatzes aufgewendet werden müssen. Dieses Ergebnis korreliert mit den Erkenntnissen der Literaturrecherche in Großbrauanlagen (siehe Abschnitt 3.2).

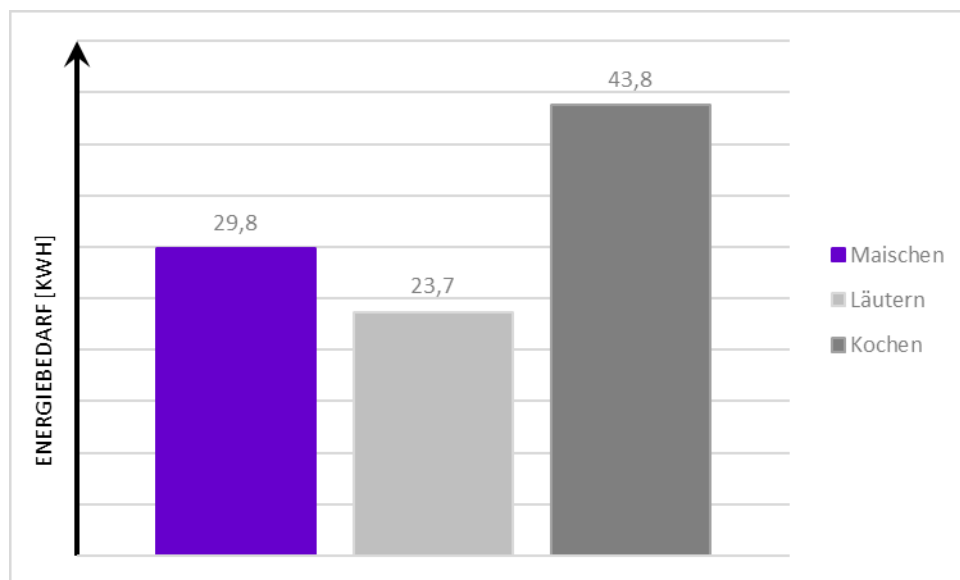


Abbildung 6-4: Energiebedarf Teilprozesse

Die Summe des elektrischen Energieeinsatzes für einen Doppelsud beträgt 97,3 kWh, beziehungsweise 350,4 MJ.

⁵ Bei Grundwassertemperatur von 12 °C

6.6. Kennzahlen

Für den Vergleich von Brauereien in Bezug auf Energie- und Rohstoffverbrauch, stellen wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt Kennzahlen ein geeignetes Hilfsmittel dar. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Kennzahlen für die bestehende Kleinbrauanlage des Gasthofes Linko berechnet. Der zu Grunde liegende Energie- und Rohstoffbedarf pro Brauprozess ist in Tabelle 6-6 dargestellt.

Tabelle 6-6: Zusammenfassung Energie- und Rohstoffverbrauch pro Doppelsud (Brauerei Linko)

Parameter	Wert
Malzmenge	$M_M = 80 \text{ kg}$
Hopfenmenge	260/450 g
Wärmebedarf	$Q = 403,5 \text{ MJ}$
Wasserverbrauch	$V_{WV} = 2860 \text{ l}$
Ausschlagsvolumen	$V_{\text{Ausschlag}} = 480 \text{ l}$

6.6.1. Spezifische Wärmeenergie

Der gesamte Wärmebedarf in der Brauerei Linko berechnet sich auf Basis des prozessbezogenen elektrischen Energiebedarfs. Der prozessbezogene Energiebedarf bezeichnet dabei die Wärmebereitstellung über die Sudpfannenheizung, die Heißwasserbereitstellung sowie den elektrischen Energiebedarf im CIP-Prozess. Der Wärmeenergieeinsatz im Brauprozess beträgt 350,4 MJ. Der Wärmebedarf für den CIP-Reinigungsprozess berechnet sich über die Wärmeenergie die notwendig ist, um die benötigte Wassermenge (siehe Abschnitt 6.6.2) von der angenommenen Umgebungstemperatur (zwölf °C) auf 65 °C aufzuheizen. Der Wärmebedarf für den CIP-Prozess beträgt 26,6 MJ. Die CIP-Reinigung erfolgt vor und nach dem eigentlichen Brauprozess, somit werden insgesamt 53,2 MJ aufgewendet. In Formel (6.2) wird die spezifische Wärmeenergie für den Brauprozess der Brauerei Linko berechnet.

$$Q_{\text{spez}} = \frac{Q}{V_{\text{Ausschlag}}} = \frac{403,5 \text{ MJ}}{480 \text{ l}} = 0,84 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 84 \frac{\text{MJ}}{\text{hl}} \quad (6.2)$$

Im Vergleich zu Großbrauanlagen mit konventioneller Würzekochung ohne Wärmerückgewinnungssystemen (siehe Abschnitt 3.2) scheint die spez. Wärmeenergie gering, wobei hier die Bezugsgrenzen rein im Brauprozess gelegt wurden. Die berechnete Kennzahl vernachlässigt die Gebindereinigung, um einen

⁶ Wärmebedarf Brauprozess + Wärmebedarf für 2 CIP-Prozesse (davor und danach)

genaueren Vergleich mit Großbrauanlagen bewerkstelligen zu können, bedarf es weiterer Messungen im Bereich der Gebindereinigung.

6.6.2. Spezifischer Wasserverbrauch

Für die Berechnung des spez. Wasserverbrauches (siehe Formel (6.3)), wurde im zu Grunde liegenden Wasserbedarfs, sowohl der produktbezogene Wasserverbrauch, als auch der prozessbezogene Wasserverbrauch (z.B. Würzekühlung, Reinigung) miteinbezogen. Nicht miteinbezogen wurde der Wasserverbrauch für die Reinigung der Lagertanks. Der Wasserverbrauch der Würzekühlung wurde auf Basis des Durchflusses durch den Plattenwärmetauscher und der Pumpzeit beim Würzekühlen berechnet. Für die Grundreinigung der Anlage im CIP-Prozess werden 120 l Wasser verwendet. Die CIP-Reinigung findet immer vor und nach dem Brauprozess statt, somit werden insgesamt 240 l benötigt. Für die Spülprozesse während des Brauprozesses werden insgesamt 1420 l verwendet. Dieser Wert wurde auf Basis der Anzahl und Dauer der Spülprozesse und des Durchflusses der Zuleitung abgeschätzt. In Tabelle 6-7 ist die Übersicht der benötigten Wassermengen pro Doppelsud dargestellt.

Tabelle 6-7: Übersicht Wassermengen pro Doppelsud⁷

Prozess	Wassermenge
Maischen	300 l
Läutern	300 l
Würzekühlen	600 l
CIP-Reinigung	240 l
Spülprozesse	1420 l
Summe	2860 l

$$V_{WV\text{spez}} = \frac{V_{WV}}{V_{\text{Ausschlag}}} = \frac{2860 \text{ l}}{480 \text{ l}} = 5,95 \frac{\text{hl}}{\text{hl}} \quad (6.3)$$

Zum Vergleich in anderen Brauereien liegt der Wasserverbrauch laut Literatur zwischen drei und zehn hl pro hl Ausschlagsvolumen. In der Studie Wasserverbrauch und Wasserbedarf des Lebensministeriums wird der Median der Verteilung beim Wasserverbrauch in Brauereien mit 4,25 hl/hl angegeben. [60]

⁷ Dichte wurde vernachlässigt

6.6.3. Sudhausausbeute

Die Sudhausausbeute bezeichnet wie viel Prozent der ursprünglichen Schüttungsmenge (Malzmenge die beim Einmaischen dem Brauwasser hinzugefügt wird) als Extraktmenge in der Ausschlagswürze enthalten ist. Die Sudhausausbeute ist somit eine wichtige Kennzahl für die Arbeit in einem Sudhaus. [2]

Die Schüttungsmenge für die Hauptsorten „Pilsner“ und „Wiener Gerstl“ beträgt in der Brauerei Linko 80 kg. Die Extraktmenge oder auch Stammwürze gemessen in °P (siehe Abschnitt 4.3.8) beträgt in der Brauerei Linko üblicherweise 12 °P, bei einer Ausschlagsmenge von 480 l. Die Sudhausausbeute berechnet sich nach Formel (6.4) [6].

$$\begin{aligned} \text{Sudhausausbeute (\%)} & & (6.4) \\ &= \frac{\text{Extraktgehalt [}^\circ\text{P]} \cdot \text{Menge der Würze [l]}}{\text{Schüttung}} \\ \text{Sudhausausbeute (\%)} &= \frac{12 \text{ }^\circ\text{P} \cdot 480 \text{ l}}{80 \text{ kg}} = 72 \text{ \%} \end{aligned}$$

Die Sudhausausbeute liegt in der Brauerei Linko üblicherweise bei 72 %, in Großbrauanlagen werden zum Vergleich 75 bis 80 % erzielt [2].

6.6.4. Hopfenverbrauch

Die Hopfenmenge richtet sich nach dem gewünschten Aroma und der Intensität des Hopfenaromas [40]. Die Dosierung richtet sich hauptsächlich nach der gebrauten Biersorte und dem gewünschten Bitteraroma. In der Brauerei Linko werden 260g Hopfenpellets beim „Wiener Gerstl“ und 450 g beim „Pilsner“ pro Doppelsud zugesetzt. Die verwendete Hopfensorte ist die „Hallertauer Perle“.

6.7. Prozesszeitdiagramm

Der zeitliche Ablauf beziehungsweise die Gleichzeitigkeit von Energieeinsatz und Abwärmepotentialen ist für die energietechnische Betrachtung in Bezug auf den Einsatz von Wärmespeichern essentiell. Ein Überblick über den zeitlichen Ablauf des Brauprozesses der Brauerei Linko ist in **Abbildung 6-5** dargestellt. Der dargestellte Ablauf bezieht sich auf die Herstellung der Hauptsorten in der aktuellen Prozessführung. Relevant für die weitere Betrachtung sind jene Prozesse, in denen Aufheizvorgänge, beziehungsweise Kochvorgänge und Kühlvorgänge durchgeführt werden (siehe Tabelle 6-8).

Tabelle 6-8: Oberes und Unteres Temperaturniveau der Heiz/Kühlprozesse

Prozessschritt	Beschreibung	TO	TU
Maischen	Heizprozess	78 °C	50 °C
Kochen	Heiz/ Kochprozess	98 °C	~60°C ⁸
Würzekühlen	Kühlprozess	75 °C	15°C ⁹

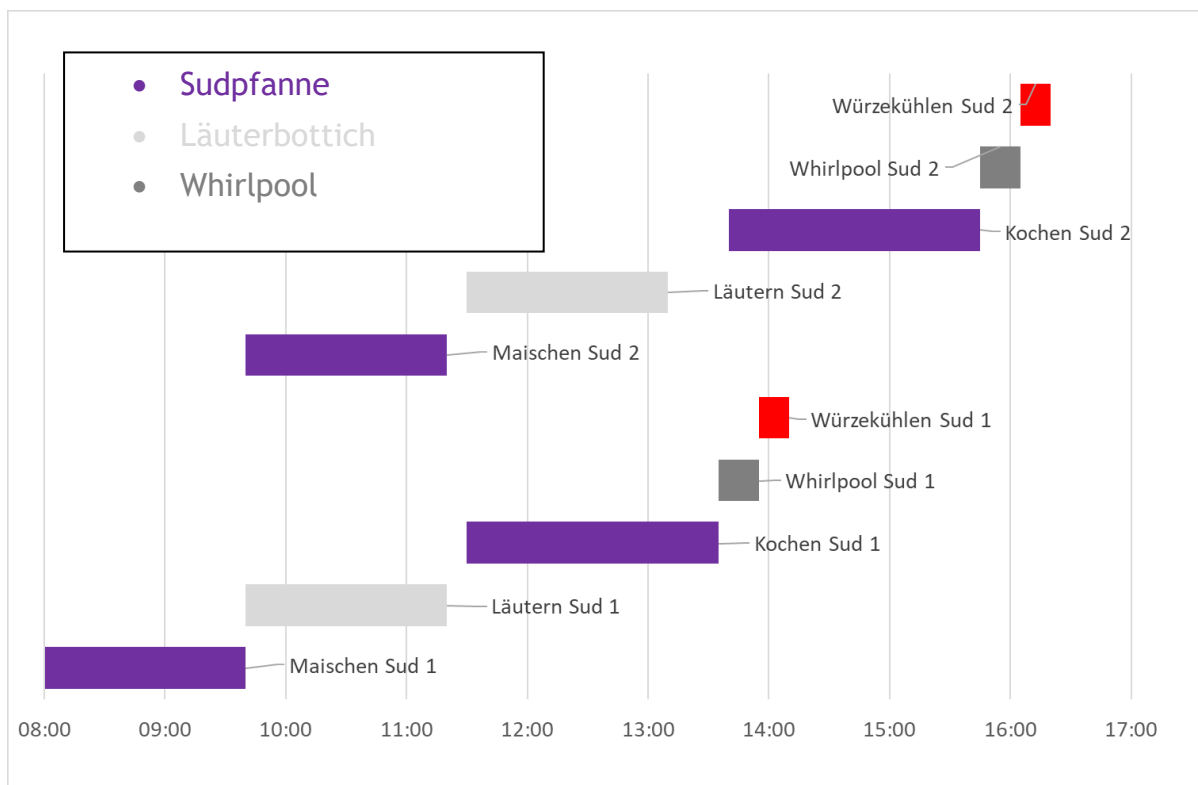


Abbildung 6-5: Prozesszeitdiagramm

Auf Basis des Zeitverlaufes im Brauprozess wird die Doppelsudprozessführung verdeutlicht. Sehr gut zu erkennen ist, dass die Keramik-Heizstäbe während des Brauprozesses beinahe durchgehend für die Wärmeenergiezufuhr in der Sudpfanne eingeschaltet bleiben. Der Einsatz des Heißwassers erfolgt am Beginn der Maischprozesse und während der Läutervorgänge, somit müssen innerhalb von fünf Stunden 520 l Heißwasser bereitgestellt werden (siehe Abschnitt 6.4.1). Die Würzekühlung erfolgt, im Verhältnis zu den Heizprozessen, in sehr kurzer Zeit, wodurch große Kühlleistungen erforderlich sind.

⁸ Nicht konstant für jeden Brauprozess, abhängig von Wärmeverlusten bei Läutervorgang

⁹ Gemessen mit Temperatursensor in Gärtank

7. Potentiale zur Wärmerückgewinnung

Aufgrund des hohen thermischen Energieverbrauchs in Brauereien sind Überlegungen zur Wärmerückgewinnung unabdingbar. Um die Potentiale für Wärmerückgewinnung identifizieren zu können, müssen die Temperaturniveaus der einzelnen Prozessschritte bekannt sein. Diese lassen sich sehr gut in einer sogenannten Heatmap darstellen (siehe **Abbildung 7-1**). Das größte Potential von Wärmerückgewinnungen liegt beim Bierbrauprozess in der Abwärme des Würzekochens, da hier das Temperaturniveau der Abwärme am Höchsten ist. In der Kleinbrauerei Linko sind neben dem Pfannendunst, Potentiale zur Wärmerückgewinnung, bei der Würzekühlung in Form von Warmwasser und in der Abwärme der Kältemaschine (Kühlkreislauf Lagertanks) vorhanden. In diesem Kapitel werden die hier genannten Potentiale für mögliche Wärmerückgewinnung behandelt.

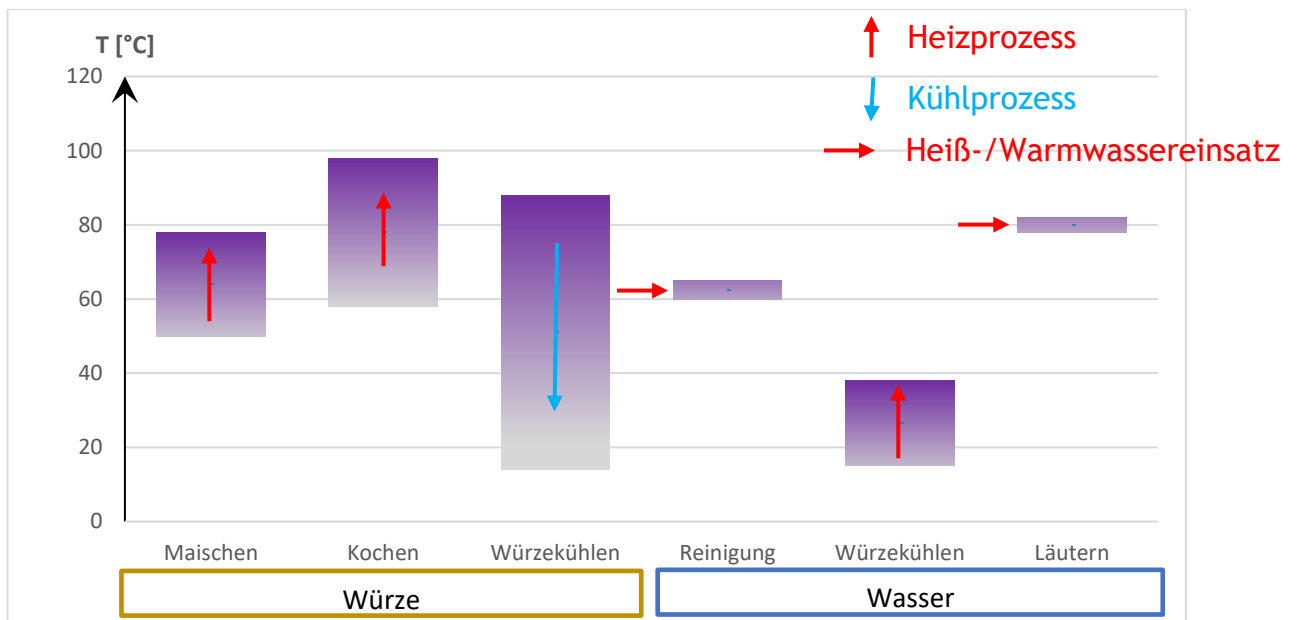


Abbildung 7-1: Heatmap Brauprozess

In **Abbildung 7-1** sind die Temperaturniveaus der einzelnen Prozesse im Brauprozess der Brauerei Linko dargestellt. In der Heatmap sind dazu die unteren, sowie oberen Temperaturniveaus der jeweiligen Prozesse dargestellt. Die Pfeile bezeichnen Heiz- und Kühlprozesse, bei der Würzekühlung beispielsweise wird die Würze im Gegenstrom mit Frischwasser gekühlt. Waagrechte Pfeile bezeichnen Heißwassereinsatz beim jeweiligen Temperaturniveau. Im Zuge der Umbauphase konnten Schwankungen beim unteren Temperaturniveau beim Kochprozess beobachtet werden. Eine Erklärung dafür stellt der Wärmeverlust beim Läturvorgang in der Abläuterstation dar. Mit der Regelung des Regelventils auf Basis

des Durchflusses sollte dieser Wärmeverlust in Zukunft jedoch konstant gehalten werden (siehe Abschnitt 5.3.3). Aus der Heatmap wird ersichtlich, dass auf Basis des Temperaturniveaus die Abwärme beim Kochen (Brüden) z. B. zum Aufheizen des Reinigungswassers oder des Läuterprozesses verwendet werden könnte. Zusätzlich könnte das anfallende Warmwasser bei der Würzekühlung (38 °C) für das Maischen im nächsten Brauprozess oder für die anschließende CIP-Reinigung rückgeführt werden. Bei einer Rückführung müsste jedoch in der Sudpfanne nachgeheizt werden, beziehungsweise durch Optimierung der Durchflussgeschwindigkeiten in der ersten Stufe des Plattenwärmetauschers das Temperaturniveau des anfallenden Warmwassers erhöht werden (siehe Abschnitt 7.5).

7.1. Würzekühlung

Das Kühlen der Heißwürze am Ende des eigentlichen Brauprozesses wird in der Brauerei Linko über einen zwei stufigen Plattenwärmetauscher bewerkstelligt (siehe Abschnitt 4.3.7). In der ersten Stufe wird die Heißwürze mit Grundwasser im Gegenstrom vorgekühlt. Die zweite Stufe ist in den Kühlkreislauf der Tankkühlung geschaltet. Um die Wärmemenge, beziehungsweise die Menge des anfallenden Warmwassers zu bestimmen, wurden die Ein- und Ausgangstemperaturen der Würze und des Wassers bestimmt. Da die Impellarpumpe im Zuge der Automatisierung nun mit einem Frequenzumrichter angesteuert wird, ist der Volumenstrom der Würze durch den Plattenwärmetauscher mengenmäßig regelbar. Im Zuge einiger Testsude, um für die Programmierung Parameterdaten zu sammeln, stellte sich ein Volumenstrom von 0,264 l/s als Optimum dar. Bei diesem Volumenstrom wird die Würze bestmöglich in der ersten Stufe gekühlt. Eine weitere Absenkung des Volumenstromes hatte keine Auswirkung auf die Austrittstemperatur der Würze. Die zweite Stufe des Wärmetauschers war während der Testsude nicht in Betrieb, da diese in den Kühlkreislauf eingebunden ist und damit keine Messung der Ein- und Ausgangstemperaturen des Kühlmediums möglich ist. Bei diesem Volumenstrom ergaben sich folgende Ein- und Ausgangstemperaturen in der ersten Stufe des Wärmetauschers (Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1: Ein- und Ausgangstemperaturen Würzekühlung (Plattenwärmetauscher Stufe 1)

Temperatur	Wert
Eingangstemperatur Würze	75 °C
Ausgangstemperatur Würze	18 °C
Eingangstemperatur Kühlwasser	12 °C
Ausgangstemperatur Kühlwasser	38°C

Um mit den gemessenen Ein- und Ausgangstemperaturen nun die übertragenen Wärmemengen zu bestimmen, bedarf es einiger zusätzlicher Berechnungsparameter (siehe Tabelle 7-2).

Tabelle 7-2: Berechnungsparameter zur Bestimmung der übertragenen Wärmemengen

Berechnungsparameter	Wert
Dichte der Heißwürze bei 75 °C	$\rho_{\text{Würze75}} = 1023,80 \text{ kg/m}^3$ [61]
Spez. Wärmekapazität der Heißwürze bei 75 °C	$c_{\text{Würze75}} = 4,0933 \text{ kJ/kg K}$ [61]
Spez. Wärmekapazität der Würze bei 18 °C	$c_{\text{Würze18}} = 3,998 \text{ kJ/kg K}$ [61]
Wirkungsgrad Plattenwärmeübertrager*	$\eta_{PW} = 0,99$

*Näherung

Mithilfe der Wärmekapazitäten und Dichten lassen sich mit Formel (7.1), die Wärmemengen des Würzeeingangs- und Würzeausgangsstrom bestimmen (siehe Tabelle 7-3). Die Berechnung Masse erfolgte auf Basis der Dichte und dem durchschnittlichen Ausschlagsvolumen von 240 l pro Sud.

$$Q = m \cdot c_p \cdot T \quad (7.1)$$

Tabelle 7-3: Wärmeinhalt Würze Ein- und Ausgangsstrom

Stoffstrom	Wärmeinhalt Q [kJ]
Würze Eingang	350.160
Würze Ausgang	286.013

$$Q_{\text{übertragen}} = (Q_{\text{Ein}} - Q_{\text{Aus}}) \cdot \eta_{PW} = 63505 \text{ kJ} = 17,7 \text{ kWh} \quad (7.2)$$

Aus den absoluten Wärmegehalten lässt sich in weiterer Folge nach Formel (7.2) die gekühlte Wärmemenge bzw. die übertragene Wärmemenge an das Kühlmedium berechnen. In der Berechnung wurde der Wirkungsgrad des Plattenwärmeübertragers berücksichtigt. Da der Brauprozess als Doppelsud geführt wird, ergibt sich somit pro Brauprozess ein Abwärmepotential von 35,4 kWh bei 38 °C. Entspricht einer Warmwassermenge von ca. 1200 l¹⁰. Aufgrund der Warmwassermenge empfiehlt sich bei einer Nutzung des Abwärmepotentials eine Absenkung des Grundwasservolumenstroms und Anhebung des Temperaturniveaus.

¹⁰ Bei 12 °C Kaltwassertemperatur und 38 °C Austrittstemperatur

7.2. Pfannendunst Sudpfanne

Der Pfannendunst oder Brüden die während des Kochprozesses entstehen, sind energietechnisch am Besten geeignet für den Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen. Das Temperaturniveau der Brüden ist am Höchsten und Wasserdampf weist eine vergleichsweise hohe spezifische Wärmekapazität auf. In Großbrauereien zählt die Kondensation, beziehungsweise die Rückführung mittels Brüdenverdichtung des Pfannendunstes, zum Stand der Technik (siehe Abschnitt 3.3.1.2). In der Brauerei Linko wird dieser aktuell über einen Rauchfang ins Freie geleitet. Im Zuge der Automatisierung wurde die Brauanlage auf einen mittels Wägezellen gewogenen Rahmen aufgebaut. Um das Wärmerückgewinnungspotential ermitteln zu können, wurde die Masse an Wasser die während der Kochprozesse (Doppelsud) verdampft, mittels der Wägezellen bestimmt. Die Auswertung erfolgt dabei softwaretechnisch und wurde in die Prozessdatenerfassung implementiert.

Pro Kochvorgang verdampfen durchschnittlich 12,75 kg Wasser (m). Die nutzbare Wärmemenge Q , beispielsweise in einem Pfannendunstkondensator (siehe Abschnitt 3.3.1.2) kann mithilfe der Verdampfungsenthalpie des Wassers (siehe Tabelle 7-4) bestimmt werden.

Tabelle 7-4: Berechnungsparameter Pfannendunst

Berechnungsparameter	Wert
Verdampfungsenthalpie Wasser bei 100 °C	$\Delta h(V) = 2257 \text{ kJ/kg}$

$$Q = m \cdot \Delta h(V) = 12,75 \text{ kg} \cdot 2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 28777 \text{ KJ} = 8 \text{ kWh} \quad (7.3)$$

Das Abwärmepotential der Brüden bei einem Doppelsud beträgt somit 16 kWh. Die mit einem Pfannendunstkondensator mögliche Wärmerückgewinnung entspricht ca. 16% des gesamten Energieeinsatzes im Brauprozess, bei einem Temperaturniveau von ca. 100 °C. Die Kochtemperatur ist abhängig von der vorherrschenden Wetterlage, in der Praxis wurde eine Kochtemperatur von 98,9-99,5 °C beobachtet. Aufgrund des geringen Massenstroms (12,75 kg/ 75 min) wurde eine weitere Abkühlung und Ausnutzung der latenten Wärme des Brüden-Kondensats nicht betrachtet.

7.3. Kühlsystem Lagertanks

Wie in Abschnitt 5.2 erwähnt wird aktuell die Kühlung der Gär- und Lagertanks mit der bestehenden Kälteanlage bewerkstelligt. Die Betrachtung des Abwärmepotentials in diesem Abschnitt erfolgt auf Basis des zukünftig verwendeten Systems. Die Kühlung des Systems erfolgt mithilfe einer Kältemaschine die nach dem Kaltdampfprozess arbeitet, im folgenden Abschnitt werden die in das System eingebrachten Wärmemengen und das damit einhergehende Abwärmepotential abgeschätzt. In **Abbildung 7-3** ist ein Grundriss des Sudhauses und des im Zuge der Umbauarbeiten zusätzlich errichteten Kühlraums/Gärraums dargestellt. Im Grundriss sind ebenfalls Leitungsführungen, sowie die Aufstellung der Gär und Lagertanks eingezeichnet. Die automatische Malzförderung (Malzförderer) ist aktuell nicht ausgeführt.

7.3.1. Grundlagen Kälteerzeugung:

Das am häufigsten angewendete Verfahren bei der Kälteerzeugung ist der sogenannte Kaltdampfprozess (siehe **Abbildung 7-2**). Ein Kältemittel wird bei niedrigen Temperaturen verdampft und anschließend bei erhöhtem Druck und gesteigener Temperatur kondensiert. Die während der Verdampfung aufgenommene Wärmeenergie kann so auf einem höheren Temperaturniveau wieder abgegeben werden.

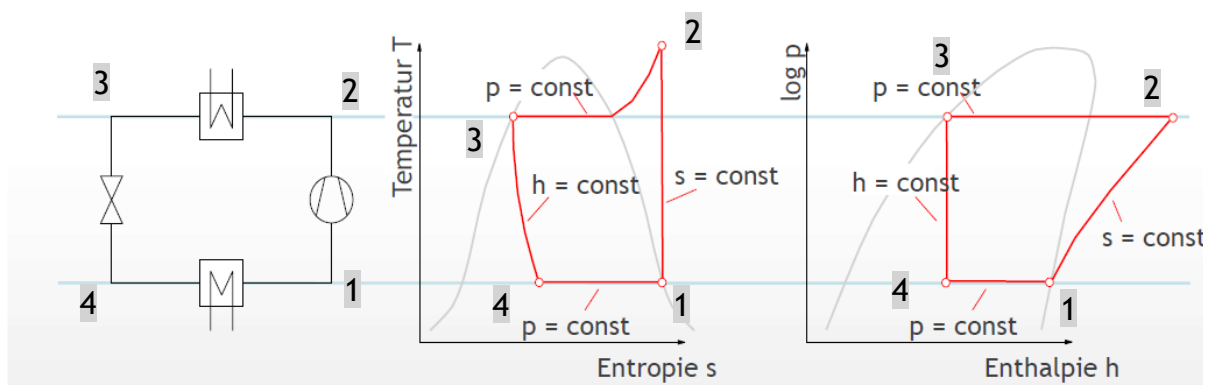


Abbildung 7-2: Kaltdampfprozess [62]

- 1→2 isentrope Verdichtung ($s = \text{const}$)
- 2→3 isobare Wärmeabfuhr ($p = \text{const}$)
- 3→4 isenthalpe Drosselung ($h = \text{const}$)
- 4→1 isobare Wärmezufuhr ($p = \text{const}$)

Der Kreisprozess verläuft zwischen zwei Druckniveaus. Ausgehend vom Zustand eins (siehe **Abbildung 7-2**), erfolgt im Verdichter eine Verdichtung auf das höhere Druckniveau. Im einfachsten Fall arbeitet der Verdichter adiabat und reversibel (isentropen Zustandsänderung). Das Medium ist im Austrittszustand zwei gasförmig, thermodynamisch als überhitzter Zustand bezeichnet. Bei der isobaren Wärmeabfuhr von Zustand zwei auf drei kommt es zunächst zu einer Temperatursenkung und in weiterer Folge zur Kondensation des Kältemittels. Die Wärme wird dabei vom Kältemittel an ein externes Medium abgegeben, üblicherweise erfolgt diese Wärmeabfuhr an die Umgebungsluft. Im idealisierten Prozess tritt so in Zustand drei siedendes Kältemittel aus. Die siedende Flüssigkeit wird in weiterer Folge in der isenthalpen Drosselung in einem adiabaten Expansionsventil auf Niederdruckniveau entspannt, dabei tritt eine Temperatursenkung des Kältemittels auf. Im Zustand vier liegt das Kältemittel als Zweiphasengemisch vor (Nassdampf), welches wiederum dem Verdampfer zugeführt wird, in dem die Kühllast vom Kältemittel aufgenommen wird. [63]

Bei niedrigem Druck wird so Wärmeenergie in den Kreis aufgenommen und am hohen Druckniveau, auf dem die Kondensation stattfindet, wieder abgegeben. Energie wird dem Kreis, bei der Erzeugung der Druckdifferenz, als Antriebsenergie über den Verdichter zugeführt. Der Wirkungsgrad von Kältemaschinen wird üblicherweise als Energy Efficiency Ratio (EER) bezeichnet und über die abgeführte Wärmemenge bezogen auf die Exergiezufuhr in der Verdichtung beschrieben (siehe Formel **(7.4)**).

$$EER = \frac{\dot{Q}_{K\ddot{u}hlung}}{P_{el}} \quad (7.4)$$

$\dot{Q}_{K\ddot{u}hlung}$: „Kühlung“ Wärmeabfuhr / Kühllast

P_{el} : Exergiezufuhr z. B. elektrische Energie

Das Abwärmepotential beziehungsweise die Nutzwärme einer Kältemaschine ergibt sich dabei als Summe der abgeführten Wärmemenge und der eingesetzten elektrischen Energie, abzüglich der in der Kältemaschine auftretenden Verlusten.

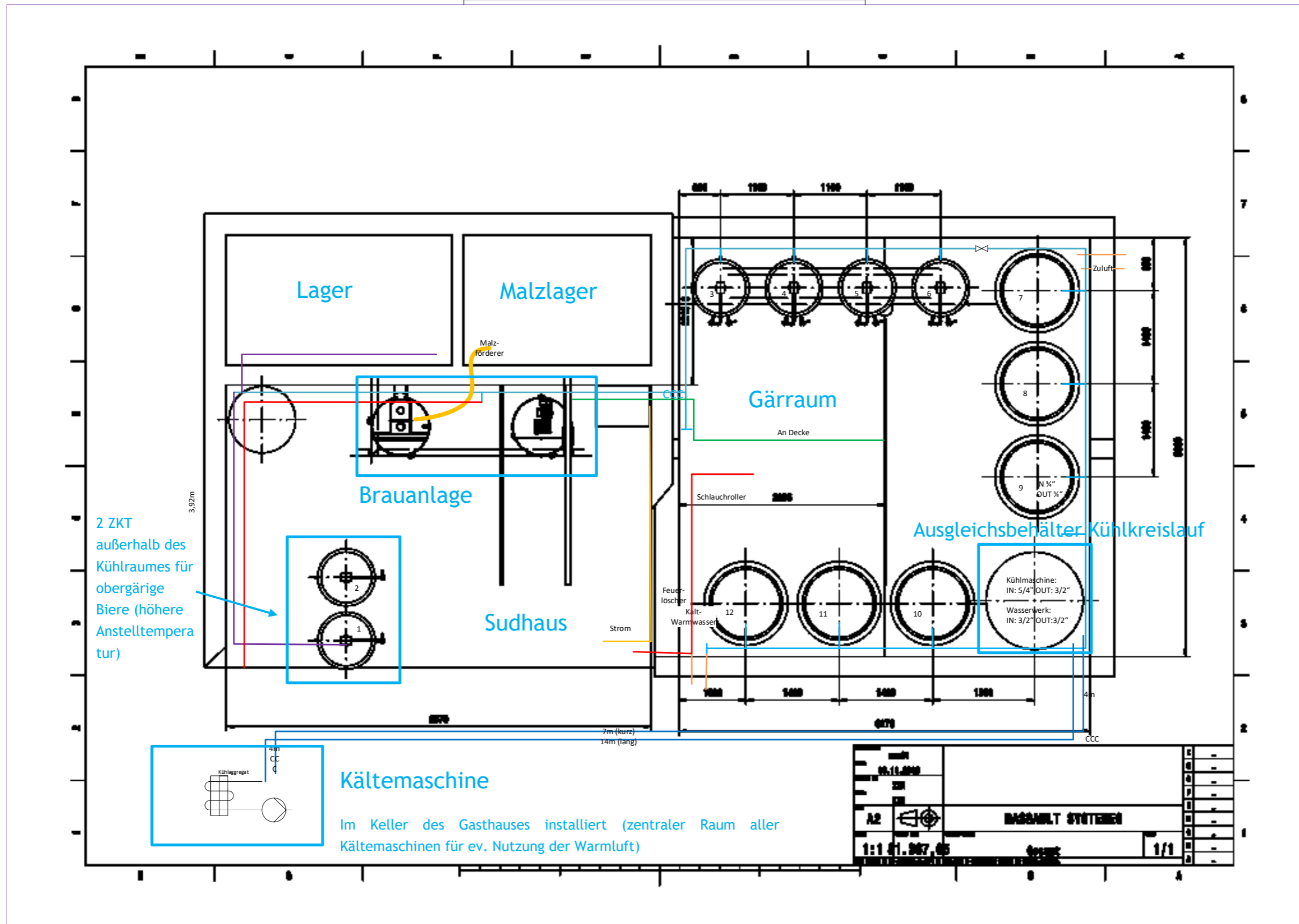


Abbildung 7-3: Grundriss Brauerei + Kühlraum

7.3.2. Berechnung des Kühlbedarfes

Im folgenden Abschnitt werden auf Basis der Kühlraumgröße, den verwendeten Isolationsmaterialien und den auftretenden Wärmelasten der Kühlbedarf für das Kühlsystem der Lagertanks in der Brauerei Linko berechnet.

Wärmelasten:

Grundsätzlich lassen sich Wärmeeinträge in einen Kühlraum in interne und externe Wärmequellen unterteilen. Zu den externen Quellen gehören z. B. die Wärmezufuhr durch Transmission und durch Lüftung bei Türöffnung. Interne Quellen ergeben sich z. B. durch Beleuchtung oder Personen, die sich im Kühlraum aufhalten. Eine Besonderheit des Kühlraumes beim Gasthof Linko stellt hierbei die Passivkühlung dar, da aktiv nur die Lagertanks mittels Glykol-Wassergemisch gekühlt werden und sich dadurch auch im Kühlraum selbst eine niedrigere Temperatur als die Außentemperatur einstellt. Für Abwärme Berechnungen der Kältemaschine müssen zu allererst die Wärmelasten, die auf das Kühlsystem einwirken, bekannt sein. Im Kühlraum des Gasthofes Linko treten folgende Wärmelasten auf:

- Transmissionswärme von Außen
- Wärmeeintrag durch Bierwürze
- Wärmeeintrag durch Beleuchtung
- Wärmeeintrag durch Belüftung
- Gärwärme

Berechnungswerte Kühlraumpaneele:

Für die Fassade wurde ein Paneel mit 140 mm Kerndicke (Dicke der PU-Schaumschicht) verwendet. Das Dach des Kühlraums wurde ebenfalls mit PU-Schaumpaneelen (140 mm Kerndicke) gedeckt und als Flachdach mit drei Grad Neigung ausgeführt. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Wandhöhen (siehe Tabelle 7-5). Zusätzlich wurde der Boden mit einer 100mm hohen Wärmedämmschicht versehen.

Tabelle 7-5: Berechnungswerte Kühlraumpaneele

Berechnungsparameter	Wert
U-Wert Fassadenpaneel	$u = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ [64]
U-Wert Dachpaneel	$u = 0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ [64]
Mittlere Raumhöhe	2,735 m
Wandhöhe Südseite	3 m
Wandhöhe Nordseite	2,47 m

Wandflächenberechnung:

Auf Basis des Grundrissplans (siehe **Abbildung 7-3**) und der Wandhöhen lassen sich die für den Wärmeeintrag in den Kühlraum relevanten Wand- und Dachflächen berechnen (Tabelle 7-6). Wobei die Nord-, Süd, und Ostwand sowie die Dachfläche Außenwände darstellen und die Westwand eine Abtrennung zum Sudhaus darstellt. Bei der Berechnung der Dachfläche wurde die Neigung vernachlässigt, diese bewirkt keine signifikante Größenänderung.

Tabelle 7-6: Wandflächen Kühlraum

Fläche	Wert
Wandfläche Außenwand Süd	18,51 m ²
Wandfläche Außenwand Nord	15,24 m ²
Wandfläche Außenwand Ost	17,23 m ²
Wandfläche West	17,23 m ²
Dachfläche	38,87 m ²
Außenwandfläche Gesamt	89,85 m ²

Berechnung Transmissionswärme

Entscheidend für die Transmissionswärme, die in einen Kühlraum eindringt, sind die Wärmedämmung der Hüllfläche und die Differenz zur Außentemperatur. Der U-Wert oder auch Wärmedurchgangskoeffizient k gibt an, welcher Wärmestrom durch einen Bauteil von einem Quadratmeter Fläche bei einer Temperaturdifferenz von einem Kelvin fließt.

Die Transmissionswärme kann dabei als stationärer Wärmedurchgang durch eine ebene Wand betrachtet werden. Dabei trennt die ebene Wand ein Fluid mit der Temperatur ϑ_1 vom Fluid mit der Temperatur $\vartheta_2 < \vartheta_1$. Im stationären Zustand (zugeführte Wärmemenge = abgeführte Wärmemenge) fließt ein Wärmestrom \dot{Q} aufgrund des Temperaturunterschieds vom Fluid 1 durch die Wand zum Fluid 2. Der Wärmedurchgangskoeffizient ergibt sich dabei über die Wärmeübergangskoeffizienten von Fluid 1 zur Wand, sowie von der Wand zu Fluid 2 und der Wärmeleitung in der Wand. Der Wärmestrom \dot{Q} geht zunächst vom Fluid 1 an die Wand mit der Fläche A_1 und Temperatur ϑ_{W1} und wird mit dem Wärmeübergangskoeffizienten α_1 beschrieben (siehe Formel (7.5)).

$$\dot{Q} = \alpha_1 \cdot A_1 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_{W1}) \quad (7.5)$$

Die Wärmeleitung in der Wand wird über die mittlere Wärmeleitfähigkeit λ_m der Wand, ihrer Dicke δ und der mittleren Fläche A_m beschrieben.

$$\dot{Q} = \frac{\lambda_m}{\delta} \cdot A_m \cdot (\vartheta_{W1} - \vartheta_{W2}) \quad (7.6)$$

Schließlich wird der Wärmeübergang von der Wand an Fluid mit Formel (7.7) beschrieben.

$$\dot{Q} = \alpha_2 \cdot A_2 \cdot (\vartheta_{W2} - \vartheta_2) \quad (7.7)$$

Für eine ebene Wand berechnet sich die mittlere Fläche A_m nach Formel (7.8).

$$A_m = \frac{1}{2} \cdot (A_1 + A_2) \quad (7.8)$$

Wird von gleichen Außen und Innenfläche ausgegangen ($A_1 = A_2$) kann die Fläche allgemein als Fläche A bezeichnet werden. Eliminiert man aus den drei Gleichungen die unbekanntenen Wandtemperaturen lässt sich der Wärmestrom mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten k beschreiben (siehe Formel (7.9)).

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (7.9)$$

Wobei für den Wärmedurchgangskoeffizienten k Formel (7.10) gilt.

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{\alpha_1 A_1} + \frac{\delta}{\lambda_m A_m} + \frac{1}{\alpha_2 A_2} \quad (7.10)$$

Für den Wärmedurchgang bei mehrschichtigen Wänden wie den verwendeten Paneelen lässt sich der Wärmedurchgang analog zur elektrischen Leitung berechnen (siehe Formel (7.11)).

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{\alpha_1 A_1} + \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_{mi} A_{mi}} + \frac{1}{\alpha_2 A_2} \quad (7.11)$$

In **Abbildung 7-4** ist beispielhaft der Temperaturverlauf beim Wärmedurchgang durch eine ebene Wand mit mehreren Schichten dargestellt. [65]

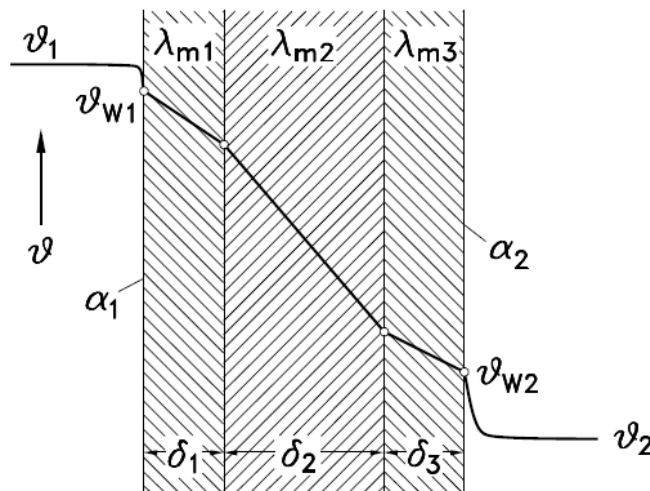


Abbildung 7-4: Temperaturverlauf beim Wärmedurchgang durch eine ebene Wand aus drei Schichten unterschiedlichen Materials [65]

Die für die Berechnung verwendeten U-Werte sind in Tabelle 7-5 angegeben. Für die Außentemperatur wurden die Tagesmittelaußentemperaturen des Jahres 2014 von der Wetterstation Landhaus St.Pölten verwendet, dieser ist der nächst gelegene Messpunkt der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Aufgrund der unterschiedlichen Füllmengen der Lagertanks ist die Innenraumtemperatur rechnerisch sehr schwierig zu bestimmen. Die Innenraumtemperatur wurde mit einem Innenraumthermometer gemessen. Hierbei stellte sich eine Innenraumtemperatur von zwölf °C ein, diese wurde als konstant angenommen. Alle Tage an denen die mittlere Tagesaußentemperatur niedriger als zwölf °C war, sind in der Berechnung mit Null Wärmeeintrag berücksichtigt. Die westliche Wandfläche

des neu errichteten Kühlraumes grenzt an den Altbestand der Brauerei. Der Wärmeeintrag über diese Fläche ist schwer zu bestimmen, die Innenraumtemperatur in der Brauerei unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen. In der Praxis hat sich hier jedoch gezeigt, dass durchschnittlich eine Innentemperatur von 20 °C herrscht. Diese Innenraumtemperatur wurde ebenfalls als konstant angenommen und zum Tagesmitteltemperatur abhängigen Wärmeeintrag über die übrigen Wandflächen addiert.

Aus den tageweise berechneten Wärmelasten wurde folgende Jahresdauerlinie (siehe **Abbildung 7-5**) erstellt. Es ist sehr gut zu erkennen, dass aufgrund des konstant angenommenen Wärmeeintrags über die Wandfläche zur Brauerei, die Grundlast einen konstanten Wert von ca. 200 Wh pro Tag einnimmt.

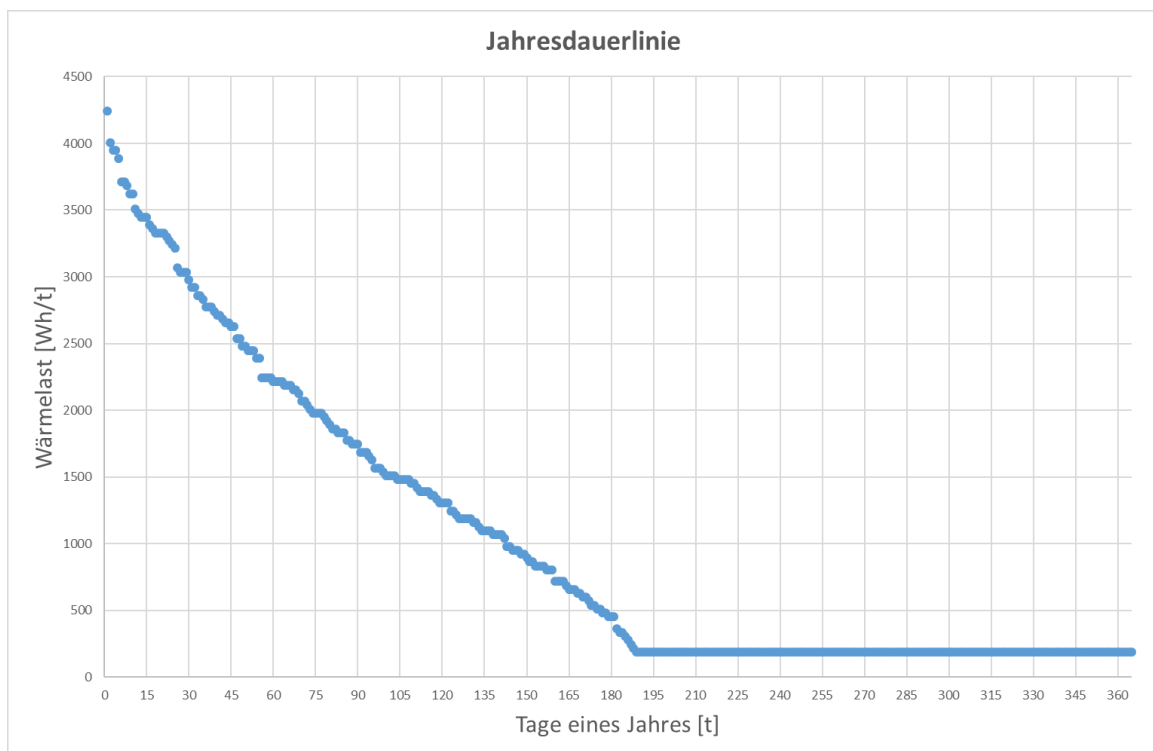


Abbildung 7-5: Jahresdauerlinie Transmissionswärme

Die kumulierte Wärmelast über ein Jahr ergibt einen Wärmeeintrag in den Kühlraum über Transmissionswärme Q_{TW} von 374 kWh.

Wärmeeintrag durch Bierwürze

Wie in Abschnitt 7.1 beschrieben, wird die Würze über einen zwei stufigen Plattenwärmetauscher gekühlt, wobei die zweite Stufe in den Kühlkreislauf eingebunden ist. Die Ausgangstemperatur der Würze aus der ersten Stufe beträgt 18 °C (T_0). Das Kühlsystem muss in weiterer Folge die Würze für den Gärprozess auf die Anstelltemperatur kühlen. In der Brauerei Linko wird die Würze dazu auf sechs °C (T_U) gehalten. Um den jährlichen Wärmeeintrag in das Kühlsystem durch die Bierwürze bestimmen zu können, bedarf es neben den in Tabelle 7-2 dargestellten Parametern zusätzlicher Berechnungsparameter (siehe Tabelle 7-7). Das jährliche Ausschlagsvolumen der automatisierten Brauanlage wurde auf Basis der angestrebten Betriebsweise (Vierfachsud) und 50 Brautagen pro Jahr abgeschätzt. Die Umrechnung der Ausschlagsmenge in Gewichtsmasse erfolgte mithilfe der Dichte der Heißwürze (siehe Abschnitt 7.1).

Tabelle 7-7: Berechnungsparameter Bierwürze

Berechnungsparameter	Wert
Spez. Wärmekapazität der Würze bei 6 °C	$c_{Würze6} = 3,996 \text{ kJ/kg K [61]}$
Jährliches Ausschlagsvolumen	$V_{Aus} = 480 \text{ hl}$

$$Q_{BW} = V_{Aus} \cdot \rho_{Würze75} \cdot (c_{Würze18} \cdot T_0 - c_{Würze6} \cdot T_U) \tag{7.12}$$

$$Q_{BW} = 663 \text{ kWh}$$

Gärwärme

Die Gärwärme bezeichnet jene Wärme, die während des Gärprozesses im Hauptgärbottich bzw. in den Gärtanks entsteht. Während der Gärung entsteht ein stetiger Wärmestrom, der durch das Kühlsystem auf Anstelltemperatur gehalten wird. In der Brauerei Linko wird hauptsächlich untergäriges Bier produziert. Bei untergärigem Bier dauert der Hauptgärprozess zehn Tage bei einer Anstelltemperatur von sechs °C. Der Kältebedarf bei untergärigem Bier beträgt ca. 150 kcal/hl Tag [66].

Um den jährlichen Wärmeeintrag in das Kühlsystem durch Gärwärme bestimmen zu können, bedarf es zusätzlicher Berechnungsparameter (siehe Tabelle 7-8). Die Jährliche Ausschlagsmenge wurde auf Basis der angestrebten Auslastung von 50 Vierfachsuden ausgewählt.

Tabelle 7-8: Berechnungsparameter Gärwärme

Berechnungsparameter	Wert
Kältebedarf	$q = 150 \frac{kcal}{hl\ Tag}$ [66]
Dauer Hauptgärprozess	$t_{Gärprozess} = 10\ Tage$

$$Q_{GW} = q \cdot t_{Gärprozess} \cdot V_{Aus} = 150 \frac{kcal}{hl\ Tag} \cdot 10\ Tage \cdot 480\ hl \quad (7.13)$$

$$Q_{GW} = 720 \cdot 10^3\ kcal = 3,01 \cdot 10^6\ kJ = 837\ kWh$$

Eintrag durch Bierherstellung

Der Wärmeeintrag über die Würze und die Gärwärme kann zusammengefasst werden im Wärmeeintrag durch die Bierherstellung. Auf Basis der angestrebten Ausschlagsmenge mit der optimierten Brauanlage ergeben sich 50 Brautage, mit jeweils 9,6 hl Ausschlagsmenge, im Jahr. Um die Verteilung des Wärmeeintrags in der Jahresdauerlinie zu berücksichtigen, wurde auf Basis eines wöchentlichen Brautages ein Wärmeeintragsprofil erstellt (siehe **Abbildung 7-6**). Das Profil berücksichtigt den Wärmeeintrag durch die Würze bei der Würzekühlung am Brautag und der anschließenden Gärwärme durch den Gärprozess.

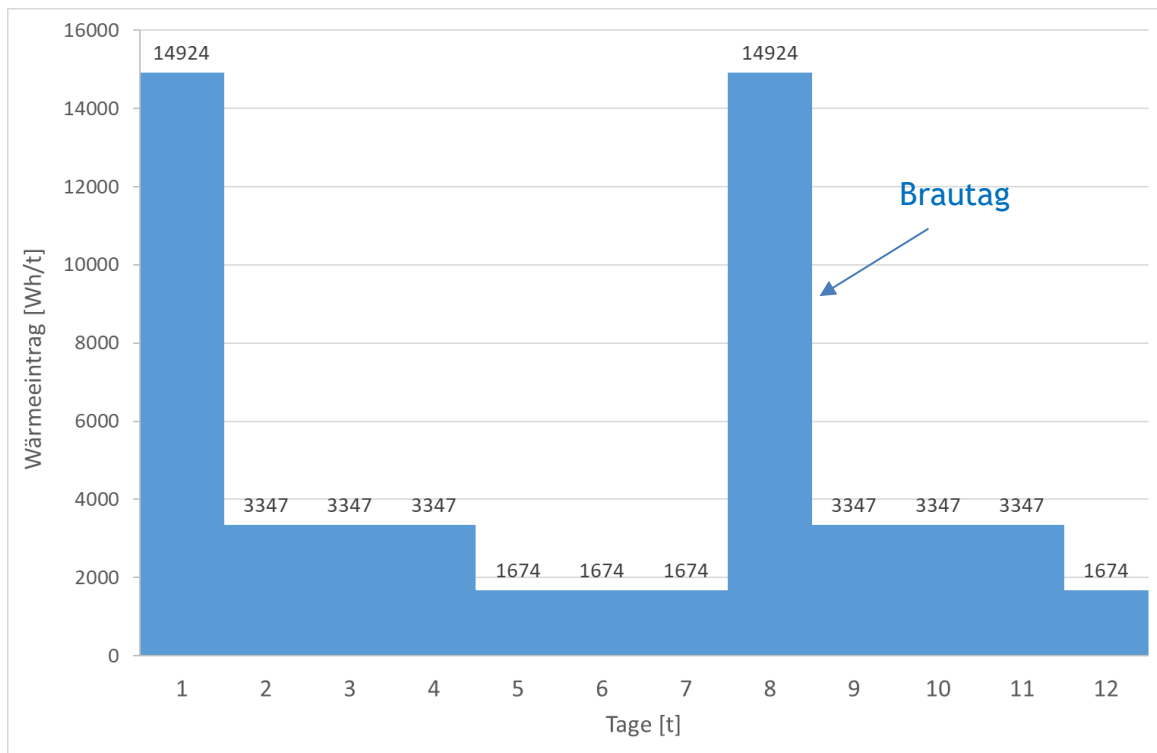


Abbildung 7-6: Wärmeeintragsprofil durch die Bierherstellung

Wärmeeintrag durch Beleuchtung

Für die Beleuchtung des Kühlraums wurden herkömmliche T8 Leuchtstoffröhren installiert. Als Berechnungsbasis für den Wärmeeintrag durch die Kühlraumbeleuchtung dient laut Literatur die installierte elektrische Leistung der Beleuchtung [67]. Die Einschaltzeit der Beleuchtung wurde mit zwei Stunden pro Tag abgeschätzt (siehe Tabelle 7-9).

Tabelle 7-9: Berechnungsparameter Beleuchtung

Berechnungsparameter	Wert
Installierte Beleuchtungsleistung	$P = 464 \text{ W}$
Einschaltzeit pro Tag	$t_{Ein} = 2 \text{ h}$

$$Q_B = P \cdot t_{Ein} \cdot 365 = 464 \text{ W} \cdot 2 \text{ h} \cdot 365 = 339 \text{ kWh} \quad (7.14)$$

Wärmeeintrag durch Belüftung

Infiltration, beziehungsweise Lufteintrag von außen in den Kühlraum, resultiert immer auch in einem Wärmeeintrag. Der klassische Fall dafür ist die Dauer und Häufigkeit der Türöffnung bei einem Kühlraum. Aufgrund des während des Gärprozesses produzierten CO₂, musste für die Baugenehmigung des Kühlraumes zusätzlich eine CO₂ Warnanlage und eine Kühlraumbelüftung integriert werden. Die Steuerung für die Belüftung erfolgt entweder händisch, oder durch die B&R Steuerung bei entsprechendem Alarmsignal der CO₂ Warnanlage. Durch die händische Steuerung, beziehungsweise Unregelmäßigkeit der Belüftung ist es nicht möglich die tatsächliche Luftwechselrate für den Kühlraum zu bestimmen. Üblicherweise liegt bei Kühlräumen der Kältebedarf durch Infiltration bei einem bis zehn % der Gesamtlast [68]. Der Wärmeeintrag durch die Belüftung wurde daher als prozentueller Faktor mit acht % der Gesamtlast berücksichtigt.

7.3.3. Abwärmepotential Kühlsystem

In diesem Abschnitt wird auf Basis des errechneten Kühllastbedarfs und den technischen Daten der neu angeschafften Kältemaschine das Abwärmepotential des Kühlsystems bestimmt. Auf Basis des Wärmeeintrages und der EER der Kältemaschine kann das Nutzwärmepotential der Kältemaschine bestimmt werden. In Tabelle 7-10 sind die einzelnen Wärmelasten, die in Abschnitt 7.3.2 errechnet wurden, dargestellt. Gesamt ergibt sich eine Wärmelast von 2,4 MWh pro Jahr.

Tabelle 7-10: Wärmelasten Kühlsystem Brauerei Linko

Wärmelast	Wärmeeintrag [kWh]
Transmission	374
Bierwürze	663
Beleuchtung	339
Belüftung	192
Gärwärme	837
Summe	2.405

Die Jahresdauerlinie aller Wärmelasten ist in **Abbildung 7-7** dargestellt. Gut erkennbar sind hier die Spitzenlasten die durch den Wärmeeintrag an den Brautagen verursacht werden. Die Grundlast wird hauptsächlich verursacht durch die Gärwärme, Beleuchtung und den Wärmeeintrag über die Wandfläche zum Sudhaus. Durch die Annahme eines wöchentlichen Brautages stellt die Gärwärme einen beinahe konstanten Wärmeeintrag in das Kühlsystem dar.

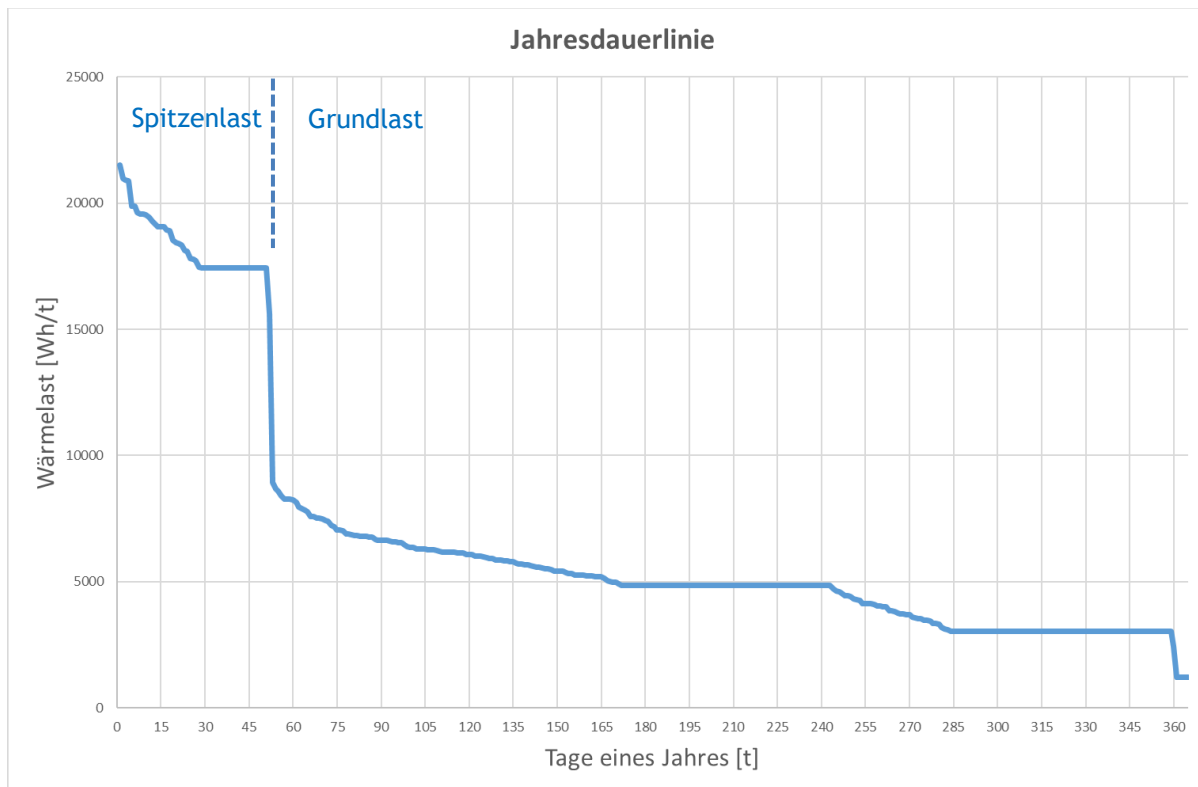


Abbildung 7-7: Jahresdauerlinie Wärmeeintrag

Kältemaschine:

Im Zuge der Erweiterung der Lagerkapazitäten wurde eine neue Kältemaschine angeschafft, um die Kühlung zu gewährleisten. Die angeschaffte Kältemaschine stammt von der Fa. ICS Cool Energy und hat die Bezeichnung Cool Evo 051. In **Abbildung 7-8** sind die verfügbaren technischen Daten der Kältemaschine dargestellt. Aufgrund fehlender Messeinrichtungen konnte die Energy Efficiency Ratio der Kältemaschine nicht bestimmt werden. Auf Basis der Nominalen Kälteleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme ergibt sich nach Formel (7.4) eine Energy Efficiency Ratio (EER) von 1,82. Mit den jährlichen Wärmelasten ergibt sich mit dieser EER ein jährliches Abwärmepotential von ca. 4.400 kWh bei einer Ablufttemperatur von 32 °C. Die nominale Effizienz wird erreicht bei einer Vorlauf- von sieben °C und einer Rücklauftemperatur von zwölf °C (siehe **Abbildung 7-8**). Im zukünftigen Kühlkonzept werden Vorlauftemperaturen von unter sieben °C angestrebt, wodurch die EER der Kälteeinlage im Praxiseinsatz niedriger sein wird und damit das Abwärmepotential höher. Ebenfalls nicht berücksichtigt in der Berechnung des Abwärmepotentials, aufgrund mangelnder Daten, sind Verluste der Kältemaschine.

Technische Daten	
Abmessungen (L x B x H)	1.660 x 670 x 1.500 mm
Gewicht	336 kg
Wasseranschlüsse	1" Camlock
Nominale Kälteleistung	14,4 kW bei 7/12°C und 32°C Umgebungstemp.
Kompressor	1 x Scroll hermetisch
Kühlkreisläufe	1
Kältemittel	R 407C
Nom. Durchfluss	2,47 m ³ /h
Wasserinhalt	115 Liter
Delta T min / max	4 – 10 K
Max. Betriebsüberdruck	6 bar
Elektr. Leistungsaufnahme	7,9 kW
Spannungsversorgung	400 V / 50 Hz / 3 Ph
Startstrom	69 A
Max. Betriebsstrom	14 A*
Elektr. Anschluss	CEE 16 A
Schalldruckpegel	53,1 dB(A) / 10 m Freifeld

Abbildung 7-8: Technische Daten Cool Energy Cool Evo 051

7.4. Zusammenfassung Abwärmepotentiale

In diesem Abschnitt sind die in diesem Kapitel mit den getroffenen Annahmen berechneten Abwärmepotentiale in der Brauerei Linko zusammengefasst. Das größte Abwärmepotential bezeichnet das Kühlsystem für die Lagertanks, wobei hier eine Nutzung, durch das luftgeführte Abwärmesystem der Kältemaschine, nur zur Luftvorwärmung der Belüftungsanlage des Gasthofes, beispielsweise über einen Kreuzstromwärmetauscher, durchführbar ist. Die Problematik zur anderweitigen Nutzung besteht durch eine sinkende Efficiency Ratio bei Vergrößerung des Temperaturniveauabstandes zwischen Abwärme und Kühlung. Eine Einbindung in das wassergeführte Heizsystem ist aufgrund der vergleichsweise hohen Vorlauftemperatur nicht sinnvoll (siehe Abschnitt 7.5.2). Die mögliche Nutzung der Abwärmepotentiale der Würzekühlung und des Pfannendunstes wird im folgenden Abschnitt (7.5) behandelt. In Tabelle 7-11 sind die berechneten Abwärmepotentiale für die angestrebte Ausschlagsmenge von 50 Vierfachsuden pro Jahr dargestellt.

Tabelle 7-11: Zusammenfassung Abwärmepotentiale der Brauerei Linko

Abwärmepotential	[kWh]	Temperaturniveau
Würzekühlung	3.540	38 °C
Pfannendunst Sudpfanne	1.600	~100 °C
Kühlsystem Lagertanks	4.400	32 °C ¹¹
Summe	9640	

¹¹ Temperaturniveau bei nominaler Kälteleistung siehe Abbildung 7-8

7.5. Integration von Wärmerückgewinnungssystemen

Im folgenden Abschnitt wird auf die Realisierbarkeit beziehungsweise die Wirtschaftlichkeit der Integration von Wärmerückgewinnungssystemen in den Brauprozess der Kleinbrauerei Linko eingegangen.

In Großbrauanlagen ist die Integration von Wärmerückgewinnungssystemen im Bereich des Pfannendunstes und der Würzekühlung Stand der Technik (siehe Kapitel 4). Aufgrund kontinuierlicher Produktion und des vergleichsweise großen Ausschlagvolumens, lassen sich in Großbrauanlagen Wärmerückgewinnungssysteme wirtschaftlich darstellen. In Kleinbrauanlagen wie der Brauerei Linko ergeben sich, aufgrund der nichtkontinuierlichen Betriebsweise, einige Problemstellungen.

Die Rückführbarkeit des anfallenden Warmwassers in den Brauprozess ist aus Sicht der Prozessführung nicht direkt gegeben. Die Nutzung der Abwärmepotentiale im Brauprozesses kann nur in Verbindung mit Energiespeicher erfolgen. Die Notwendigkeit der Energiespeicher ist gegeben, da die Abwärme prozessbedingt nur zeitversetzt rückgeführt werden kann. Durch die Doppelsud-Prozessführung (siehe **Abbildung 6-5**) sind im laufenden Betrieb keine Speichermöglichkeiten für eine direkte Nutzung vorhanden. Eine weitere Problemstellung ist die nichtkontinuierliche Produktion in der Kleinbrauerei LINKO, wodurch die rückgewonnene Wärmeenergie lange in den entsprechenden Energiespeicher gespeichert werden müsste.

7.5.1. Direkte Nutzung der Abwärme aus der Würzekühlung

Durch die Automatisierung der Anlage ist es möglich, zwei Brauprozesse hintereinander zu fahren. Durch die geänderte Prozessführung könnte beispielsweise das anfallende Warmwasser beim Würzekühlen des zweiten Sudes, teilweise direkt für den darauffolgenden Brauprozess im Maischvorgang verwendet werden. Die Problemstellung dabei ist, dass einerseits das Temperaturniveau der Abwärme zu gering ist (Anhebung erforderlich) und andererseits sichergestellt werden muss, dass der Wasserkreislauf des Plattenwärmetauschers lebensmittelecht ausgeführt ist. Durch die erforderliche Anhebung ergibt sich ein sehr geringes Einsparpotential durch die direkte Rückführung. Für den darauffolgenden Brauprozess werden nur 150 Liter Warmwasser mit einer Temperatur von 50 °C benötigt. Daraus schließt sich, dass nur ein Bruchteil des anfallenden Warmwassers rückgeführt werden kann (siehe Abschnitt 7.1) und auf die benötigte Temperatur zusätzlich in der Sudpfanne aufgeheizt werden muss. Bei einer Rückführung ergeben sich energietechnische Einsparungen, da die Temperaturdifferenz im Aufheizvorgang reduziert wird. Das

Brauwasser müsste nicht mehr von Grundwassertemperatur aufgeheizt werden. Die Reduzierung der Temperaturdifferenz würde ca. 26 °C betragen, daraus lässt sich mit Formel (7.1) und der mittleren spezifischen Wärmekapazität von Wasser (siehe Tabelle 6-3) das Einsparungspotential abschätzen.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 300 \text{ kg} \cdot 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 26 \text{ K} = 32\,619,6 \text{ KJ} \quad (7.15)$$

Der Wirkungsgrad von elektrischen Heizungen kann als nahezu 100% angenommen werden, wodurch die Einsparung direkt auf elektrische Energie umgelegt werden kann. Bei 50 Brauvorgängen (Vierfachsud) im Jahr ergibt sich somit eine Einsparung von 450 kWh. Die erzielbare Einsparung erscheint im Vergleich zum Gesamtenergieverbrauch relativ gering, könnte jedoch ohne anlagentechnische Umbaumaßnahmen durchgeführt werden.

7.5.2. Wärmerückgewinnungskonzept mit Energiespeicher

Obwohl die Abwärmepotentiale bei der Würzekühlung, des Kühlsystems sowie des Pfannendunstes einige MWh jährlich betragen, sind anlagentechnische Umbauten schwer wirtschaftlich darzustellen (siehe Abschnitt 8.3). Der Hauptgrund dafür ist der absolute Energieverbrauch des Gasthofes, der Brauerei und den damit einhergehenden niedrigen Energiepreisen. Ein weiterer Aspekt sind die niedrigen Temperaturniveaus der Abwärmepotentiale, ausgenommen des Pfannendunstes. Um Wärmerückgewinnungssysteme implementieren zu können, bedarf es in der Brauerei LINKO umfassenden anlagentechnischen Änderungen.

Das Temperaturniveau des anfallenden Warmwassers bei der Würzekühlung lässt sich durch die Änderung des Volumenstroms des Kühlwassers durch den Plattenwärmetauscher anheben. Um eine optimale Einbindung der Wärmespeicher in den Brauprozess zu erreichen, sind die benötigten Prozesstemperaturen im Brauprozess wesentlich. Warmwasser wird bei 50 °C für den Einmischprozess und Heißwasser bei 80 °C für den Läuterprozess benötigt. Sinnvoll wäre daher eine Einbindung von Energiespeichern bei diesen Temperaturniveaus.

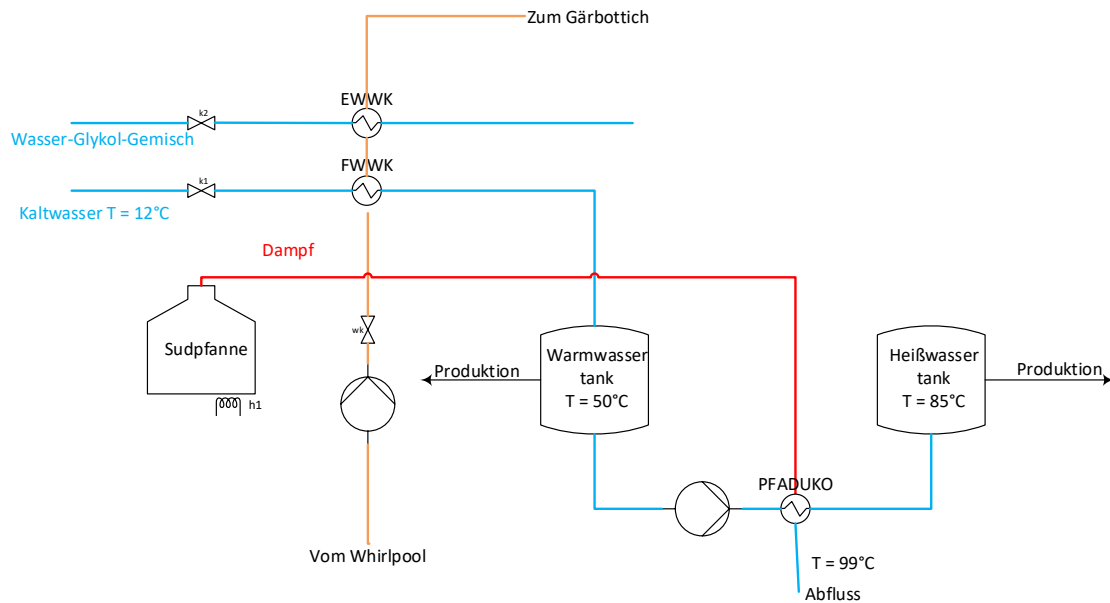


Abbildung 7-9: Wärmerückgewinnungskonzept Energiespeicher

In **Abbildung 7-9** ist ein Konzept für die Wärmerückgewinnung mit Energiespeichern dargestellt. Die Betriebstemperatur im Heißwassertank wurde fünf °C über der erforderlichen Prozesstemperatur gewählt, um eventuelle Rohrleitungsverluste auszugleichen. Diese Anpassung ist beim Warmwassertank nicht erforderlich, da in diesem Prozessschritt das Temperaturniveau mit der Sudpfannenheizung, falls benötigt, angehoben werden kann. Die Nutzung der Abwärme ist in diesem Konzept als direkte Einspeisung des anfallenden Warmwassers in die Energiespeicher dargestellt. Über den sogenannten Pfannendunstkondensator (PFADUKO) könnte eine weitere Temperaturerhöhung für die Heißwasserbereitstellung im Läuterprozess erfolgen.

Für die Auslegung der Energiespeicher sind die anfallenden Wassermengen ausschlaggebend. Auf Basis der Abwärme bei der Würzekühlung und der Ein- und Ausgangstemperatur in der ersten Stufe des Plattenwärmetauschers lässt sich die anfallende Warmwassermenge berechnen. In weiterer Folge lässt sich, auf Basis des Massenstroms der verdampften Brüden und der gewünschten Temperatur im Heißwasserspeicher, die Wassermenge berechnen die bei der Brüdenkondensation im PFADUKO anfällt (siehe Anhang).

Tabelle 7-12: Übersicht Wassermengen Wärmerückgewinnung / prozessbedingter Wasserverbrauch

Bezeichnung	Wassermenge [kg]
Warmwassermenge Würzekühlen (T = 50 °C)	431,612
Heißwassermenge Brüdenkondensation (T = 85 °C)	379,6
Warmwasserbedarf Maischen	300
Heißwasserbedarf Läutern	300
Warmwasserüberschuss	131,6
Heißwasserüberschuss	79,6

Aus Tabelle 7-12 wird ersichtlich, dass bei dieser Auslegung ein Warmwasser- und Heißwasserüberschuss pro Brauprozess in den Energiespeichern anfällt, diese könnten z. B. für Reinigungsarbeiten im Gärraum und für den CIP-Prozess verwendet werden. Die Berechnung erfolgt in kg, da die Steuerung der Zu- und Abflüsse auf Gewichtsmessungen basiert.

Durch die Prozessführung des Brauprozesses und die zeitliche Verteilung der Abwärmepotentiale ist das Konzept mit Energiespeichern zur Wärmerückgewinnung nur bei kontinuierlichem Betrieb, oder bei entsprechender Isolierung sinnvoll. Als Beispiel ist auf Basis des Prozessablaufes in **Abbildung 7-10** der zeitliche Verlauf des Warm- und Heißwassereinsatzes, sowie die Füllstände der konzeptionierten Energiespeicher dargestellt. Im Startpunkt sind beide Energiespeicher leer. Betrachtet man nun eine vollständige Warm- und Heißwasserversorgung des Brauprozesses aus den Energiespeichern, würden sich aufgrund der prozessbedingten Wasserverbräuche negative Füllstände ergeben. D. h. um die Abwärmepotentiale vollständig ausnutzen und die Warm- und Heißwasserbereitstellung sicherstellen zu können, müssen am Beginn des Brauprozesses bereits 500 kg im Warmwasserspeicher und 300 kg im Heißwasserspeicher bereitgestellt sein (siehe **Abbildung 7-11**). Die maximalen Füllstände der Energiespeicher in der Konzeptionierung sind ca. 630 kg im Warmwasserspeicher und ca. 380 kg im Heißwasserspeicher. Die maximalen Füllstände sind für die Dimensionierung der Energiespeicher wesentlich. Die Speicher müssen somit auf die maximalen Füllstände von 640 l im Warmwasserspeicher und 392 l im Heißwasserspeicher dimensioniert werden (Berechnung siehe Anhang).

Auf Basis des Energieeinsatzes und der Wärmerückgewinnungspotentiale (siehe Abschnitt 7) wurde für den Brauprozess mit Wärmerückgewinnungskonzept ein

¹² Berechnungen siehe Anhang

Sankey-Diagramm erstellt (siehe **Abbildung 7-13**). Zum Vergleich ist in **Abbildung 7-12** der Energiefluss nach der aktuellen Prozessführung dargestellt. Im Läuterprozess erhöht sich der Energieeinsatz, aufgrund der Temperaturanhebung des Heißwasserspeichers gegenüber des Elektro-Boilers der bestehenden Prozessführung. Die Berechnung des Sankey-Diagramms ist in im Anhang dargestellt. Aus dem Sankey-Diagramm mit Wärmerückgewinnung wird ersichtlich, dass eine Prozessführung ohne externe Warmwasserbereitstellung möglich wäre. Zusätzlich könnte das Warmwasser für den Reinigungsprozess (CIP) bereitgestellt werden. Aufgrund des nicht kontinuierlichen Betriebes in der Brauerei Linko und den damit verbundenen Wärmehaltungsverlusten, müssen die Energiespeicher isoliert und mit Zusatzheizungen ausgestattet werden.

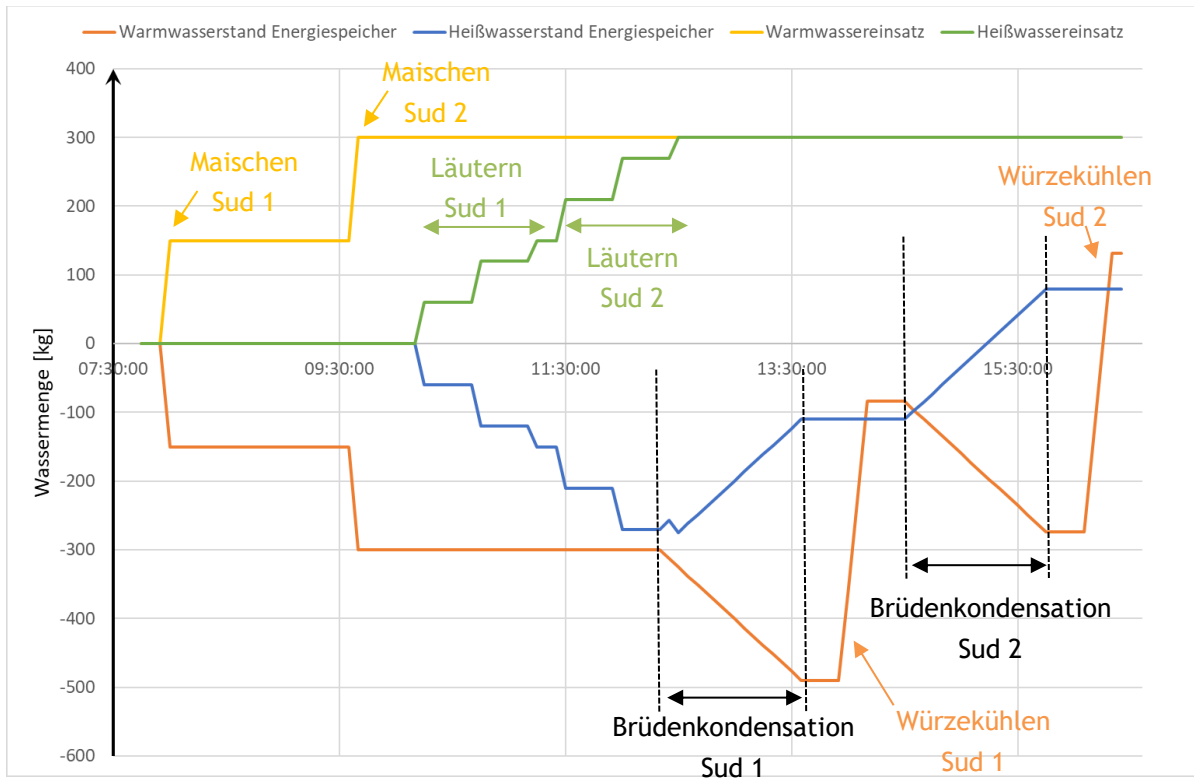


Abbildung 7-10: Zeitlicher Verlauf des Warm- und Heißwassereinsatzes im Brauprozess (Energiespeicher leer)

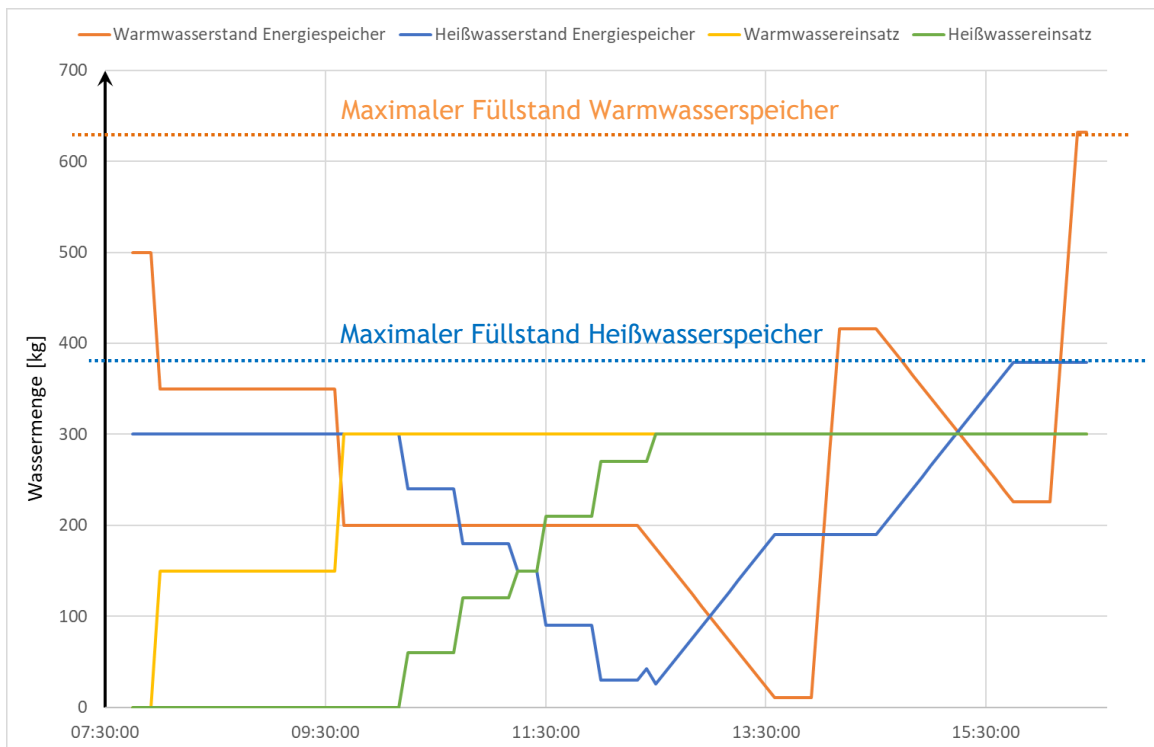


Abbildung 7-11: Zeitlicher Verlauf des Warm- und Heißwassereinsatzes im Brauprozess

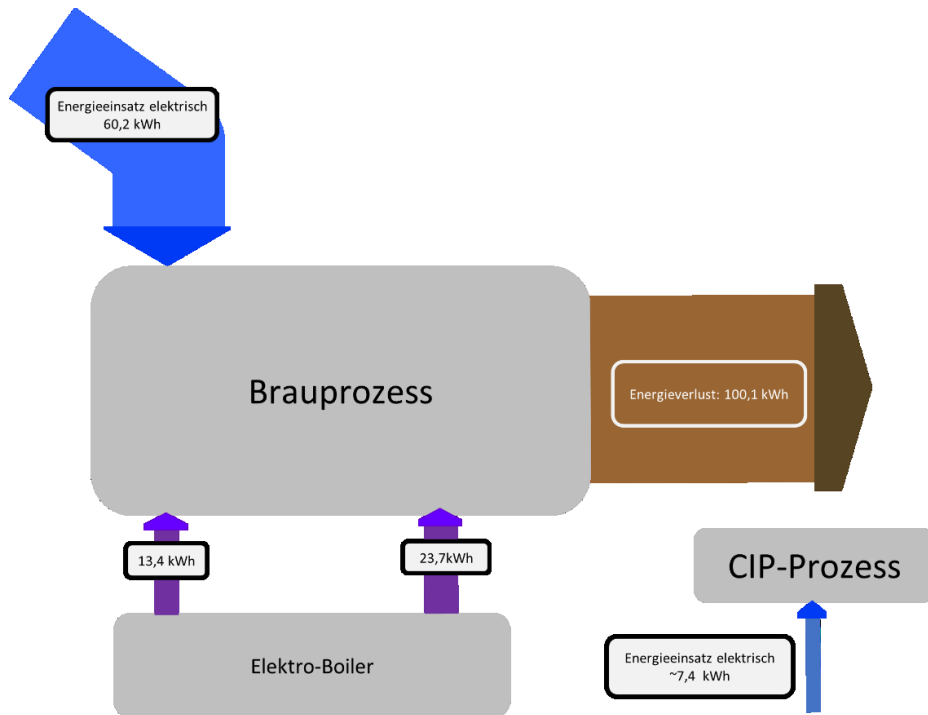


Abbildung 7-12: Sankey Diagramm nach aktueller Prozessführung Brauerei Linko

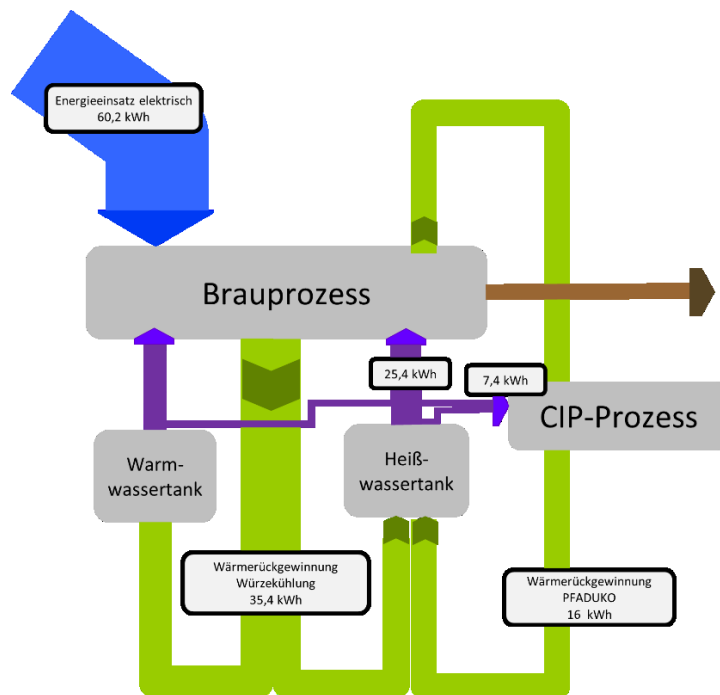


Abbildung 7-13: Sankey-Diagramm mit Wärmerückgewinnung Brauerei LINKO

8. Evaluierung alternative Wärmebereitstellung

Die Wärmebereitstellung in der Brauerei Linko erfolgt ausschließlich elektrisch. Elektrische Wärmebereitstellung für Niedertemperaturanwendungen, wie in der Brauerei Linko, entspricht beinahe einem 100-prozentigen Exergieverlust. Aus energietechnischer Sicht sind daher Überlegungen zu einer alternativen Wärmebereitstellung unter Betrachtung des Energieverbundes Brauprozess-Heizsystem unabdingbar.

Das Heizsystem im Gasthof besteht aus zwei Gaskesseln zu je 16 kW Feuerungswärmeleistung (FWL). Das wassergeführte Wärmeverteilungssystem wurde ohne Pufferspeicher installiert und für die Trinkwarmwasserbereitstellung dienen zwei Boiler zu je 250 l Speichervolumen. Die Verwendung von Gaskesseln zur Wärmebereitstellung im Gasthof bietet sich an, da der Energieträger Gas ebenfalls für die Energieversorgung in der Küche verwendet wird.

Die Wärmebereitstellung für die Brauerei wurde bei der Errichtung im Jahre 2005 durch die Installation des Elektro-Boilers gänzlich vom Heizsystem des Gasthofes getrennt. Energietechnisch wäre ein Verbund aus beiden Systemen jedoch zu bevorzugen. Die Boiler für die Trinkwarmwasserbereitstellung im Gasthof werden in der Heizungssteuerung auf 50 °C gehalten, und damit könnte die Wärmebereitstellung für den Maischvorgang direkt erfolgen.

In diesem Kapitel werden die alternativen Möglichkeiten zur Wärmebereitstellung, in Kombination mit einer wirtschaftlichen Betrachtung dargestellt.

8.1. Energieverbrauch Gasthof & Brauerei Linko

Für die Konzeptionierung alternativer Wärmebereitstellungssysteme sind die jährlichen Energieverbräuche am Standort notwendig, um Anhaltspunkte für die Auslegung der Systeme zu erhalten. Im folgenden Abschnitt werden die jährlichen Energieverbräuche des Gasthofes und der Brauerei dargestellt.

8.1.1. Gasverbrauch

Der jährliche Gasverbrauch im Gasthof betrug laut Gasrechnung der „EVN“ im Jahr 2016 10574 m³. Mit den monatlichen Umrechnungsfaktoren der „EVN“ ergibt sich damit ein jährlicher Energieverbrauch von 110.743 kWh.

Der Gasverbrauch wird verursacht durch die Heizung des Gebäudes, der Warmwasserbereitstellung und der Küche. Im Gasthof Linko ist jedoch nur eine Zählerinrichtung für den Gasverbrauch vorhanden. Die Aufteilung des Gasverbrauches

auf die Verursacher musste daher durch Abschätzungen erfolgen. Um den Gasverbrauch der Warmwasserbereitstellung und der Küche zu identifizieren, wurde die Differenz der Zählerstände für Warmwasserverbrauch und Gasverbrauch über zwei Sommermonate herangezogen. Während der Sommermonate bestand keine Heizlast für die Gaskessel. Auf Basis der Wärmeenergie (latente Wärme) die nötig ist, um Grundwasser auf Warmwassertemperatur aufzuheizen, wurde der Energieverbrauch für die Warmwasserbereitstellung vom Gesamtenergieverbrauch getrennt. In **Abbildung 8-1** ist die prozentuale Aufteilung des jährlichen Verbrauchs auf die Verursacher aufgeteilt dargestellt.

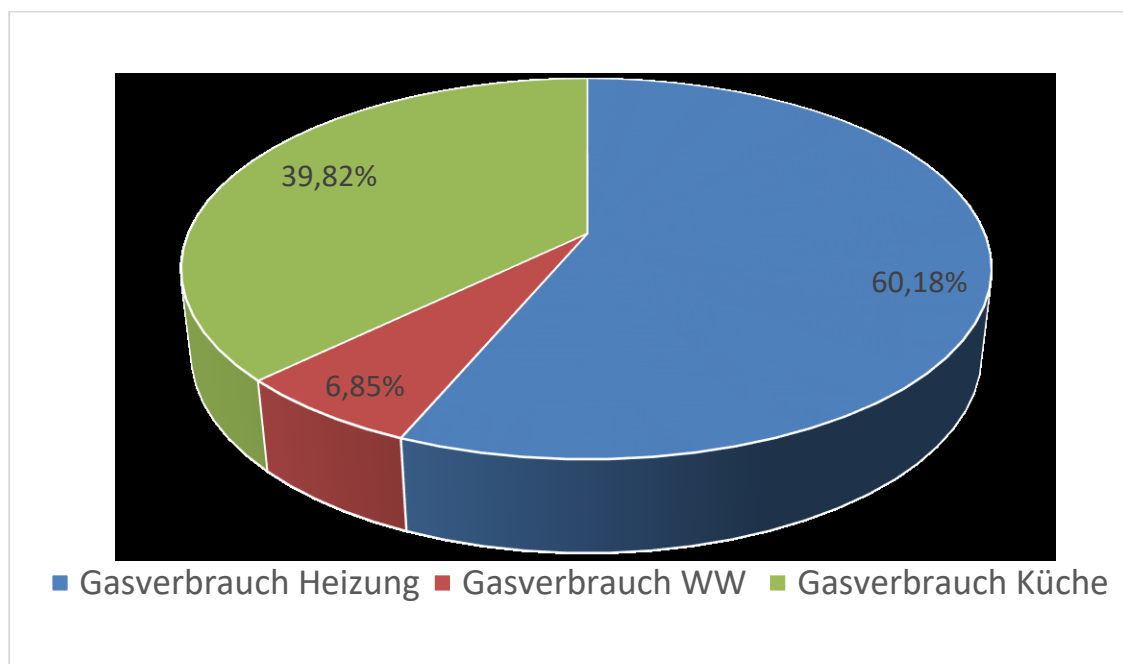


Abbildung 8-1: Aufteilung Gasverbrauch

8.1.2. Stromverbrauch

Der jährliche Stromverbrauch im Gasthof betrug laut Stromrechnung der „EVN“ im Jahr 2016 35.288,60 kWh. Die Aufteilung des Stromverbrauchs in Brauprozess und Gasthof erfolgte auf Basis des in Kapitel 3.4.1.2 ermittelten Energieeinsatzes der Brauanlage und 39 Brauvorgängen im Jahr 2016. Der Energieverbrauch der restlichen Verbraucher in der Brauerei konnte leider nicht exakt identifiziert werden. Für die zukünftige Aufteilung wurde jedoch in der neu gestalteten elektrischen Anspeisung eine eigene Zählleinrichtung für sämtliche der Brauerei zuzuordnenden Verbrauchern installiert [41]. Der Anteil des Brauprozesses am gesamten elektrischen Energieverbrauch beträgt auf Basis der Messdaten und 39 Brauvorgängen ca. 11 %. Auf Basis der Daten in Tabelle 6-1 lässt sich der Stromverbrauch der gesamten

Brauerei (Brauprozess + Peripherie) auf ein Jahr hochrechnen und würde ca. 55 % des gesamten Stromverbrauchs betragen.

8.2. Die Kapitalwertmethode

Die in diesem Kapitel vorgestellten Investitionsrechnungen basieren auf der Kapitalwertmethode. Der Kapitalwert oder net present value dient zur Beurteilung von Investitionsobjekten. Der Kapitalwert entspricht der auf einen Zeitpunkt auf- bzw. abgezinsten Summe der Ein- und Auszahlungen, die durch die Durchführung eines Investitionsobjektes verursacht werden (siehe Formel (8.1)). [69]

$$KW = \sum \frac{E(n) - A(n)}{(1 + i)^n} \quad (8.1)$$

$n = 0, 1, \dots, N$

KW = Kapitalwert

$E(n)$ = Einzahlung zum Zeitpunkt n

$A(n)$ = Auszahlung zum Zeitpunkt n

n = Periodenindex

N = Nutzungsdauer

Für die Kalkulation der Kapitalwerte wurden Energiepreiserhöhungen, Wartungs- und Versicherungskosten der Investitionsobjekte, sowie die Inflationsrate berücksichtigt. Die Erlöse durch Energieeinsparungen wurden auf Basis der angefallenen Energiekosten im Jahr 2016 im Gasthof und der Brauerei errechnet. Mögliche Energieeinsparungen durch die Investitionsobjekte wurden auf Basis der verbrauchsbezogenen Kosten bewertet.

8.3. Energieverbund Brauerei-Heizsystem

Wie bereits erwähnt, wäre ein Energieverbund aus beiden Wärmebereitstellungssystemen zu bevorzugen. Der Energieverbund würde sich energietechnisch anbieten, da eine Verlagerung der bereitgestellten Endenergie hin zum Energieträger Gas erzielt würde. Ein Energieverbund beider Systeme könnte kostengünstig umgesetzt werden. Beispielsweise könnte der für die Wärmebereitstellung in der Brauerei verwendete Elektro-Boiler mit Trinkwarmwasser gespeist werden, anstatt mit Grundwasser. Somit würde die Elektrische Energiebereitstellung auf die Temperaturanhebung der Prozesserforderlichen 80 °C reduziert werden. Damit könnte die Exergievernichtung durch elektrische Heizprozesse vermindert werden.

Bei einer Umsetzung, beziehungsweise einer Investition in ein Verbundsystem, empfiehlt sich eine Vergrößerung der Warmwasserbereitschaftsspeicher (Warmwasserboiler) und einer zusätzlichen Einbindung der Abwärme aus der Würzekühlung und des Pfannendunstes (siehe Abschnitt 7.1 und 7.2). In Abschnitt 7.5.2 wurde bereits ein Wärmerückgewinnungskonzept für die Brauerei Linko behandelt. Dieses Konzept könnte für den Wärmeverbund Brauerei-Gasthaus übernommen werden, wobei im Energieverbund der Warmwasserspeicher dem Warmwasserbereitschaftsspeicher entsprechen würde. Der Heißwasserspeicher wird in weiterer Folge vom WW-Bereitschaftsspeicher gespeist, optional mit Nutzung der Abwärme aus einem Pfannendunstkondensator. Die optimale Nutzung der Abwärme aus dem Würzekühlungsprozess, bedingt eine Ausführung des WW-Bereitschaftsspeichers als Schichtladespeicher (siehe **Abbildung 8-2**).

Die Auslegung des WW-Bereitschaftsspeichers muss auf Basis der Warmwasserbereitstellung für den Brauprozess, dem Abwärmepotential der Würzekühlung und dem Warmwasserverbrauch im Gasthaus erfolgen. Um den Speicher für den Energieverbund bestmöglich auszulegen sind Lastprofilmessungen des Warmwasserbedarfs im Gasthaus erforderlich. Auf Basis der aktuellen Datenlage ist keine Auslegung des WW-Bereitschaftsspeichers möglich.

Auf Basis der angestrebten Auslastung von 50 Vierfachsuden pro Jahr und einer vollständigen Nutzung der Abwärmepotentiale ergibt sich im Vergleich zur aktuellen Prozessführung eine deutliche Einsparung beim Energieträger Strom, dargestellt in Tabelle 8-1 (Berechnung siehe Anhang). Der Gasverbrauch für die Warmwasserbereitung wird durch die Wärmerückgewinnung bei der Würzekühlung nicht erhöht. Der Einfluss des Warmwasserüberschusses (siehe Abschnitt 7.5.2) durch

den Brauprozess wurde nicht als Einsparungspotential betrachtet, da dieser bei Einbeziehung des CIP-Prozesses sehr gering ist.

Tabelle 8-1: *Einsparungspotentiale Energieverbund Gasthof-Brauprozess*

Energieträger	Einsparung [kWh]
Strom	4450

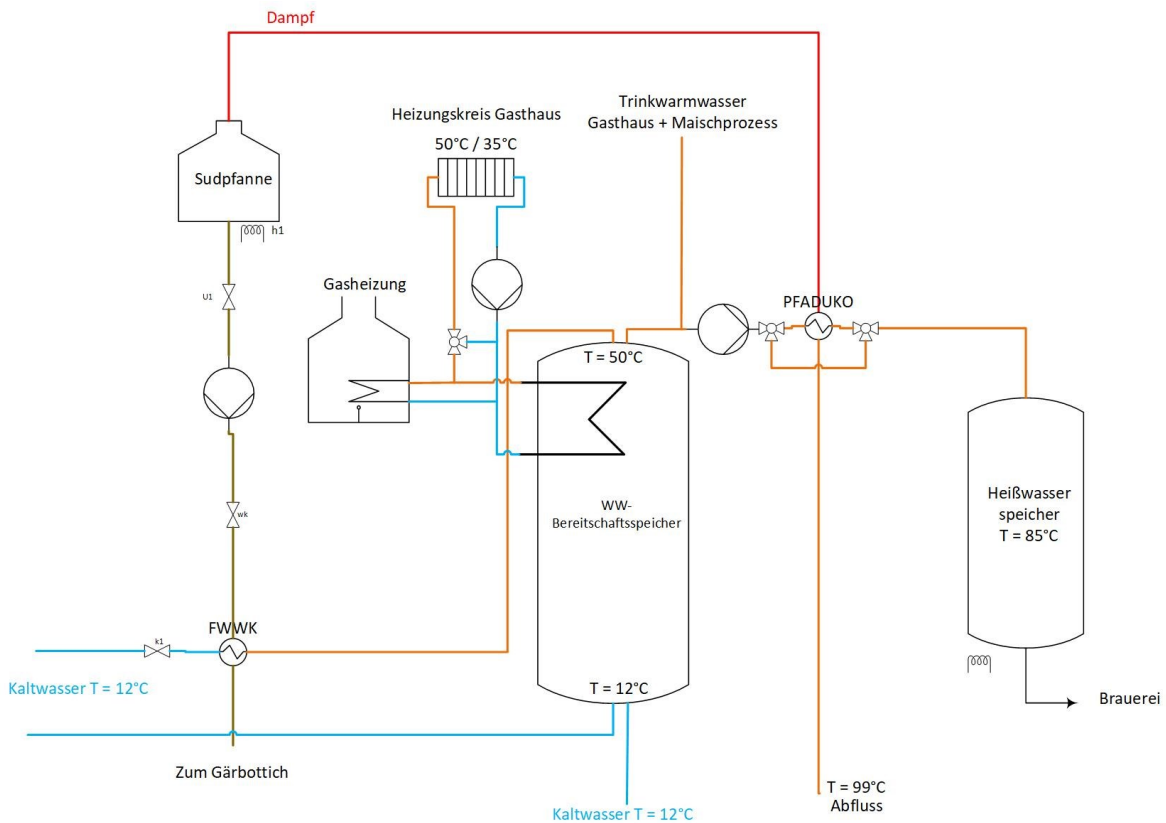


Abbildung 8-2: *Konzept Energieverbund Brauerei+Gasthaus*

8.3.1. Wirtschaftliche Betrachtung

Im folgenden Abschnitt wird die Einbindung der Abwärmepotentiale und die damit im Zuge des Energieverbundes verbundene Einsparung wirtschaftlich betrachtet. Da keine genaue Auslegung des WW-Bereitschaftsspeichers und somit keine Kostenbestimmung möglich ist, wurden die Investitionskosten für die Kapitalwertberechnung ausgewählt, dass das Investitionsobjekt nach einer Nutzungsdauer von 20 Jahren auf Basis der Kosteneinsparungen beim Stromverbrauch als absolut vorteilhaft dargestellt wird. Die dabei evaluierten maximalen wirtschaftlichen Investitionskosten für den Energieverbund und den anlagentechnischen Änderungen für die Abwärmenutzung betragen 7.500 € (siehe

Abbildung 8-3). Die Kosten für die Wärmespeicher sind damit bei handelsüblichen Preisen gedeckt [70]. Der Knackpunkt für die Wirtschaftlichkeit des Systems kann hierbei der Pfannendunstkondensator sein, dieser wird üblicherweise in Edelstahl ausgeführt und ist somit kostenintensiv. Während der Recherche konnten keine Kosten für einen Pfannendunstkondensator mit Auslegung auf Basis der auftretenden Massenströme in der Brauerei Linko evaluiert werden.

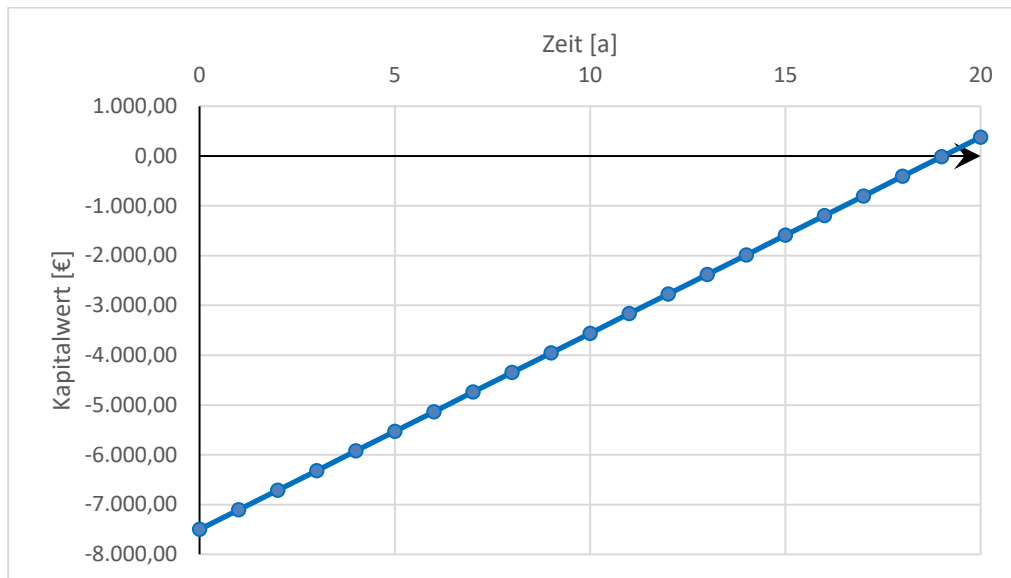


Abbildung 8-3 Kapitalwerteverlauf Energieverbund / Abwärmepotentiale

8.4. Biomasseheizwerk Traisen

Am Standort Traisen wurde im Jahr 2013 ein Biomasseheizwerk der „BioEnergie Köflach GmbH“, für die Versorgung der Stadt Traisen mit Wärmeenergie errichtet. Die Energiezentrale ist mit einem Biomassekessel nach Stand der Technik und einem Stand-by Gaskessel als Ausfallsreserve ausgerüstet. Im Zuge eines Netzausbaues im Sommer 2016 wurde im Rahmen dieses Projektes ein Anschluss des Gasthofes und der Brauerei Linko an das Nahwärmenetz evaluiert. Wesentliche Vorteile der Nahwärmeversorgung aus Biomasse sind die Wärmebereitstellung über den erneuerbaren Energieträger Holz und der Verbleib der Wertschöpfung in der Region. Dadurch können in weiterer Folge heimische Arbeitsplätze gesichert werden.

Energetische Vorteile für die Wärmebereitstellung der Brauerei ergeben sich durch die Vorlauftemperatur im Nahwärmenetz, diese beträgt in der Primärauslegung 90 °C, damit könnten die benötigten Prozesstemperaturen in der Brauerei direkt bereitgestellt werden.

8.4.1. Wirtschaftliche Betrachtung

Im folgenden Abschnitt wird der Ersatz der bestehenden Gaskessel sowie des Elektroboilers, durch eine Wärmeübergabestation des Nahwärmenetzes für die Wärmebereitstellung auf Basis wirtschaftlicher Gesichtspunkte evaluiert. Die Problematik die beim Ersatz der Gaskessel besteht, ist dass der Energieträger Gas ebenfalls in der Küche eingesetzt wird und somit der Gasanschluss beibehalten werden muss. Auf Basis der Aufteilung der Gasverbräuche in Abschnitt 8.1.1 wurde eine Investitionskostenrechnung auf Basis der Kapitalwertmethode (siehe Abschnitt 8.2) für den Anschluss an das Nahwärmenetz durchgeführt. In der Kapitalwertberechnung wurden die Investitionskosten für den Anschluss, sowie die jährlichen Kostenveränderungen in Bezug auf elektrische Energie und dem Energieträger Gas hin zum Energieträger Biomasse für die Warmwasser- und Wärmebereitstellung berücksichtigt. Wie in Abbildung 8-4 zu sehen, sind die Ausgaben für die erneuerbare Wärmebereitstellung höher als die Einnahmen durch verminderte Gas- und Stromverbräuche. Der Kapitalwert wird daher immer negativer und die Investition ist daher nicht vorteilhaft. Ein Anschluss an das Nahwärmenetz ist daher bei derzeitigem Stand auf Grund der notwendigen Beibehaltung des Gasanschlusses nicht wirtschaftlich darstellbar.

Berücksichtigt man jedoch eine Investition in eine Erneuerung der bestehenden Gaskessel und eine Nutzungsdauer dieser von ca. 25 Jahren wäre ein Anschluss an das Nahwärmenetz in Betracht zu ziehen. Da bei einer Erneuerung der Wärmeübergabestationen am Ende der Nutzungsdauer, nach Auskunft keine weiteren Kosten aus Sicht des Wärmekunden anfallen. Im Falle einer Modernisierung der aktuellen Gaskessel bedarf es weiterer Betrachtungen, ob ein Umstieg auf das Fernwärmenetz wirtschaftlich darstellbar ist. Die genaue Berechnung des Kapitalwertverlaufes ist im Anhang dargestellt.

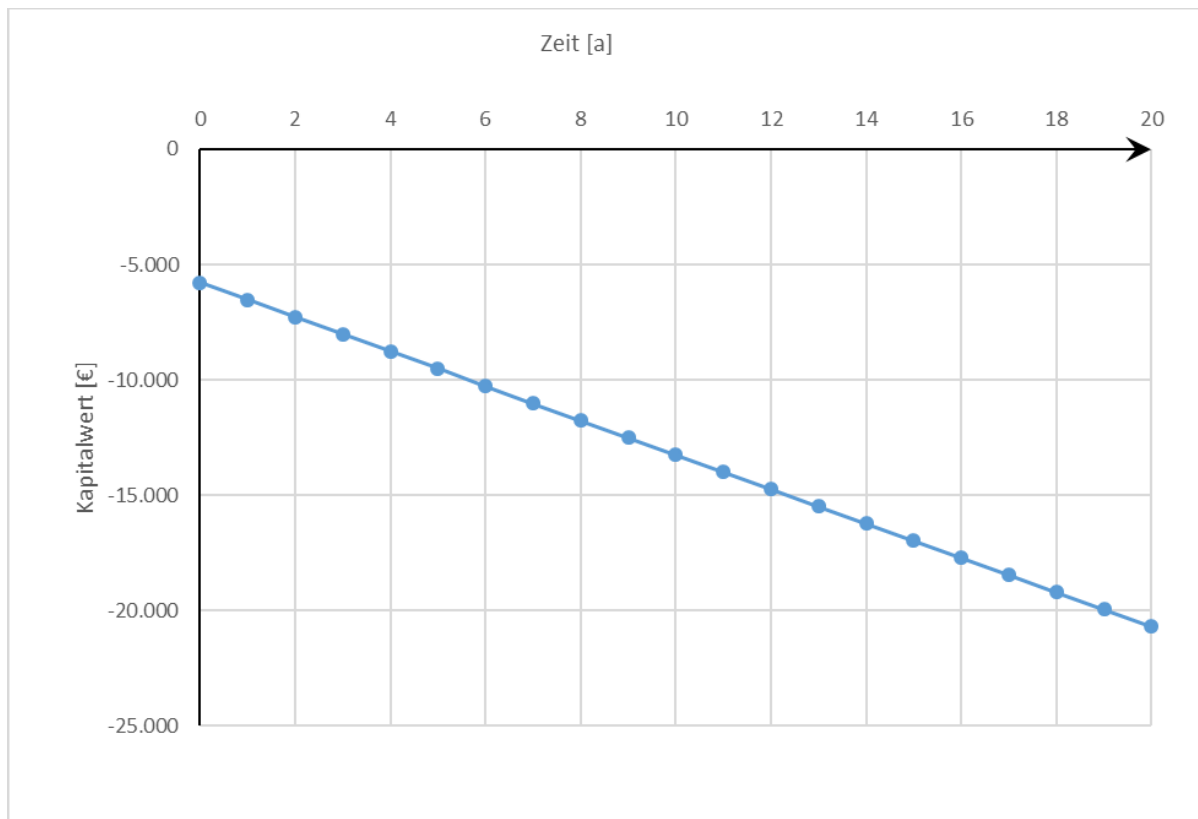


Abbildung 8-4: Kapitalwerteverlauf Nahwärmeanschluss BioEnergy Traisen

8.5. Wärmebereitstellung über Solarthermie

Solarthermische Anlagen eignen sich für die Einbindung in die Wärmebereitstellung des Brauprozesses. Die Pilotprojekte in Großbrauanlagen haben gezeigt, dass über Solarthermie beachtliche Einsparungen beim Energieeinsatz erzielt werden können. Im folgenden Abschnitt wurde eine Einbindung einer Solaranlage für die Warmwasserbereitstellung in der Brauerei sowie dem Gasthof Linko evaluiert und eine wirtschaftliche Umsetzung betrachtet.

Da Solaranlagen bei niedrigen Temperaturniveaus effizienter arbeiten, ist die Einbindung bei einer Vorlauftemperatur von 50 °C sinnvoll. Die Wärmebereitstellung für das Heizsystem des Gasthauses und für den Maischprozess wird auf diesem Temperaturniveau bewerkstelligt. Energietechnisches Optimum wäre eine Integration in das bestehende Heizungssystem und Schaffung eines Energieverbundes Gasthof-Brauerei, um sowohl eine solare Warmwasserbereitstellung (Gasthaus + Brauerei) als auch eine Heizungsunterstützung zu erreichen. Um das Potential der Solaranlage voll ausschöpfen zu können, empfiehlt sich die Einbindung eines Pufferspeichers in das Heizsystem, sowie eine Vergrößerung des Bereitschaftsspeichers für die Warmwasserbereitstellung. Ein mögliches

Einbindungskonzept ist in **Abbildung 8-5** dargestellt. Für den Läuterprozess muss Warmwasser bei 80 °C bereitgestellt werden. Im Einbindungskonzept dient der bisherige Elektro-Boiler (Heißwasserbereitstellung Brauerei) für die Temperaturanhebung des Trinkwarmwassers auf 80 °C, somit muss elektrisch nicht mehr von Grundwassertemperaturniveau aufgeheizt werden. Im Konzept ist der Elektro-Boiler nicht eingezeichnet, die benötigte Wassermenge wurde jedoch im tagesdurchschnittlichen Verbrauch (repräsentiert durch den Duschkopf) berücksichtigt. Die Berechnung der tagesdurchschnittlichen Wassermenge ist im Anhang dargestellt.

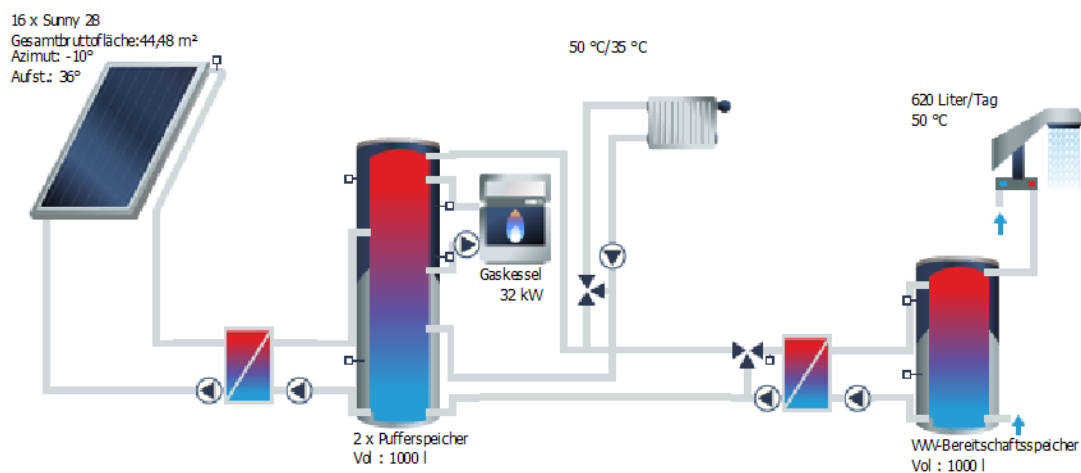


Abbildung 8-5: Konzept Solarthermische Einbindung Gasthof Linko

8.5.1. Simulation

Die Konzeptvariante aus **Abbildung 8-5** wurde in der Software T*SOL 2017 auf Basis der in Tabelle 8-2 dargestellten Parameter simuliert.

Tabelle 8-2: Simulationsparameter T*SOL 2017

Parameter	Wert
Installierte Kollektorleistung	31,14 kW
Installierte Kollektorfläche	44,48 m ²
Vorlaufsoltemperatur	50 °C
Aufstellwinkel	36,4 °
Ausrichtung	170 °
Azimutwinkel	-10°
WW-Bereitstellungsspeicher	1 m ³
Pufferspeicher	2 m ³

Die Dachfläche des Gasthof Linko ist leicht südöstlich ausgerichtet mit einem Steigungswinkel von $36,4^\circ$, für die Simulation wurde ein Azimutwinkel von minus 10 Grad gewählt. Die installierte Kollektorfläche wurde auf Basis der Simulationsergebnisse und der verwendeten Module dimensioniert, um Stagnationszeiten während der Sommermonate zu minimieren (siehe **Abbildung 8-7**). Die der Simulation zu Grunde liegenden Klimadaten stammen vom nächstgelegenen Klimadatensatz Lilienfeld. Der Simulation wurde der in Abschnitt 8.1.1 evaluierte Gesamtenergieverbrauch für Heizungszwecke zu Grunde gelegt, und als Lastgangprofil das in der Software vordefinierte Standardlastprofil „Hotel“ gewählt. Die Software verlangt für erfolgreiche Simulation einen täglichen Warmwasserbedarf. Dieser wurde auf Basis des Energieverbundes, der Zählerstände für Trinkwarmwasser und dem erwarteten Wasserverbrauch für 50 Brauvorgänge (mit vierfach Sud) pro Jahr bestimmt. Der ermittelte Tagesdurchschnittliche Warmwasserverbrauch beträgt 620 l. Die Ergebnisse der Simulation in Bezug auf die gelieferte Energie aus Solarthermie und Anlagennutzungsgrad sind in **Abbildung 8-6** und **Abbildung 8-7** dargestellt.

Einstrahlung Kollektorfläche (Bezug):	50.976,27 kWh	1.284,68 kWh/m ²
Abgegebene Energie Kollektoren:	14.659,75 kWh	369,45 kWh/m ²
Abgegebene Energie Kollektorkreis:	14.237,37 kWh	358,81 kWh/m ²
Energielieferung Trinkwarmwassererwärmung:		10.840,37 kWh
Energielieferung Heizwärme:		66.650,29 kWh
Energie Solarsystem:		13.217,20 kWh
Zugeführte Energie Zusatzheizung:		66.764,2 kWh
Einsparung Erdgas H:		1.790,0 m³
Vermiedene CO₂-Emissionen:		3.785,11 kg
Deckungsanteil gesamt:		16,5 %
Relative Zusatzenergie-Einsparung (DIN EN 12977):		14,8 %
Systemnutzungsgrad:		25,9 %

Abbildung 8-6: Ergebnisse der Jahressimulation (T*SOL 2017)

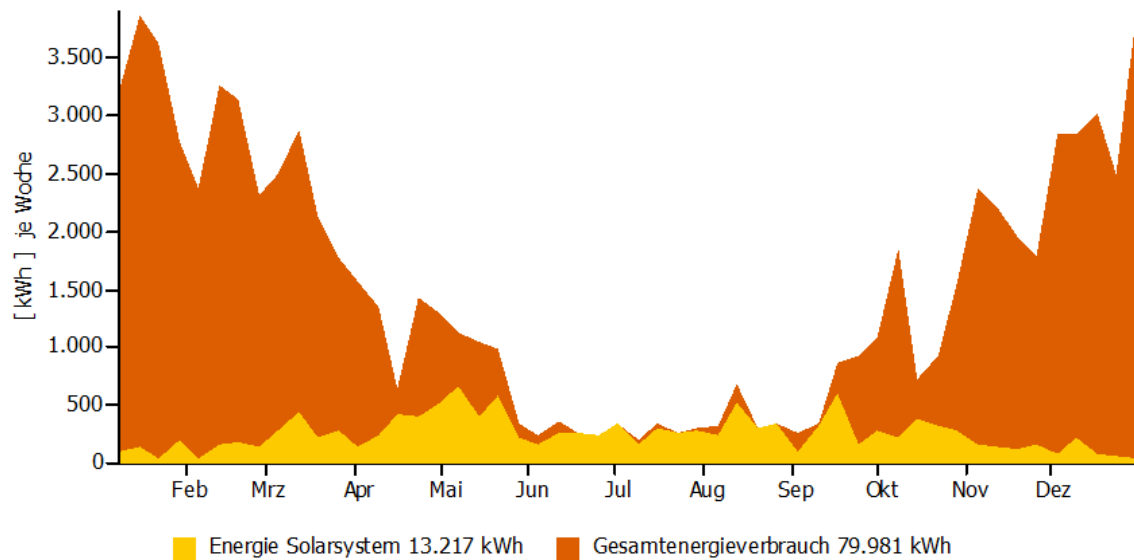


Abbildung 8-7: Anteil der Solarenergie am Energieverbrauch

8.5.2. Wirtschaftliche Betrachtung

Auf Basis der in Abschnitt 8.5.1 simulierten Konzeptvariante, wurde bei einem örtlichen Installateur ein Angebot über die Investitionskosten der Konzeptanlage eingeholt. Auf Basis dieses Angebotes wurde für die Solaranlage eine dynamische Investitionsrechnung auf Basis der Kapitalwertmethode durchgeführt (siehe **Abbildung 8-8**). Der Kapitalwertverlauf zeigt, dass die Investitionskosten (35.000€) der Konzeptanlage zu hoch sind, um die Investition in eine Solarthermische Heizungsunterstützung und Warmwasserbereitstellung wirtschaftlich darzustellen zu können. In der betrachteten Nutzungsdauer von 20 Jahren ist die Investition somit nicht vorteilhaft. Die genaue Berechnung des Kapitalwerteverlaufs mit Berechnungsparametern ist im Anhang dargestellt.

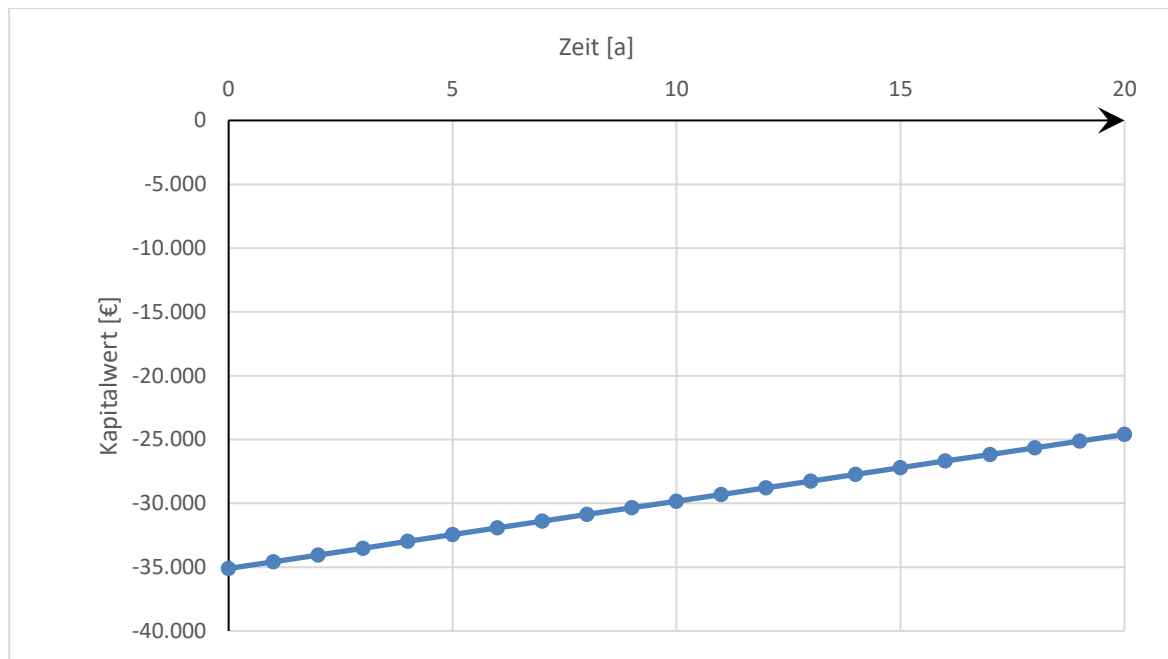


Abbildung 8-8: Kapitalwertverlauf Integration Solarthermie

8.6. Strombereitstellung über eine Photovoltaik-Anlage (PV)

Aufgrund der elektrischen Wärmebereitstellung in der Brauerei Linko und dem damit einhergehenden Stromverbrauch, wurde in diesem Abschnitt die Investition in eine Photovoltaik Anlage evaluiert. Dazu wurde in der Software PV*Sol 2017 eine Photovoltaikanlage konzeptioniert und in Bezug auf Energieproduktion über ein Jahr simuliert. Aufgrund des relativ hohen jährlichen elektrischen Energieverbrauches von 35 MWh, wurde die Konzeptanlage auf Basis der verfügbaren Dachfläche dimensioniert. Als Anlagenkonzept wurde eine netzgekoppelte PV-Anlage mit Batteriesystem ausgewählt. In der Software können aktuell am Markt angebotene Kollektoren, Wechselrichter und Batteriesysteme ausgewählt werden. Die für die Konzeptanlage ausgewählten Produkte sind in **Abbildung 8-9** dargestellt.

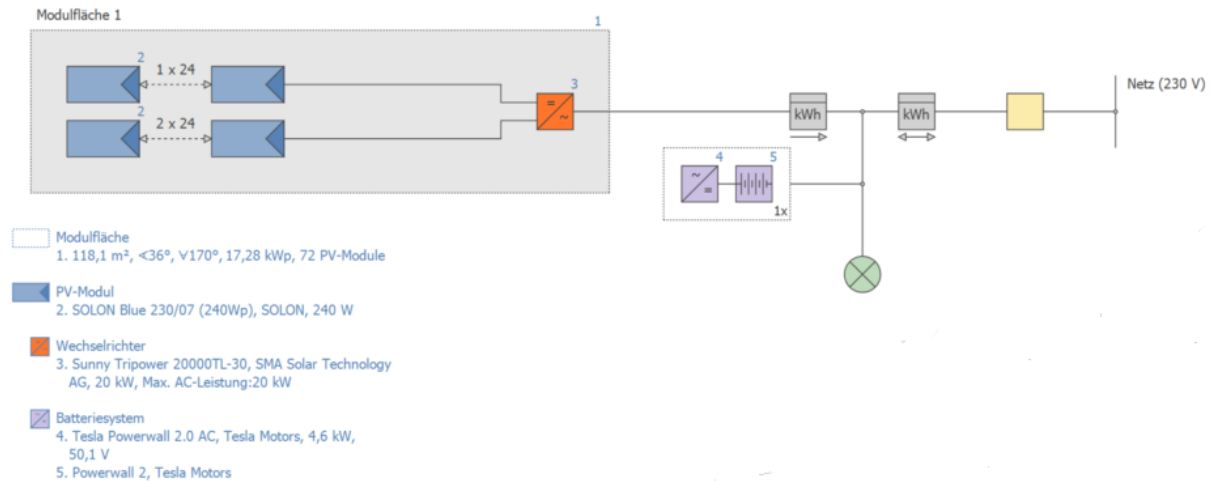


Abbildung 8-9: Konzeptanlage Gasthof Linko

8.6.1. Simulation

Die Simulation wurde auf Basis der Aufstellungsparameter und Klimadaten, wie sie ebenfalls in Abschnitt 8.5.1 für die solarthermische Konzeptanlage verwendet wurden, durchgeführt. Aufgrund des relativ hohen jährlichen elektrischen Energieverbrauches von 35 MWh, wurde die Konzeptanlage auf Basis der verfügbaren Dachfläche dimensioniert. Mit den ausgewählten Kollektoren ergibt sich so eine Fläche von 118,1 m². Das Verbrauchsprofil kann in der Software PV*Sol 2017 konfiguriert werden, zur Auswahl stehen beispielsweise sämtliche Standardlastprofile des BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft). Aufgrund fehlender Lastprofilaten für den Gasthof und die Brauerei Linko wurde für die Simulation das BDEW-Lastprofil Gewerbe (G1) ausgewählt und auf den jährlichen Stromverbrauch (siehe Abschnitt 8.1.2) skaliert. Die in der Simulation verwendeten Anlagenparameter sind in Tabelle 8-3 dargestellt.

Tabelle 8-3: Simulationsparameter PV-Anlage

Parameter	Wert
Installierte Kollektorleistung	17,28 kWp
Installierte Kollektorfläche	118,1 m ²
Aufstellwinkel	36,4°
Ausrichtung	170°
Azimutwinkel	-10°

Die Ergebnisse der Simulation sind in Tabelle 8-4 dargestellt. Auf Basis der Simulationsergebnisse kann ca. der halbe Stromverbrauch des Gasthauses und der Brauerei durch die PV-Anlage gedeckt werden. Die Ergebnisse der Simulation zeigen auf Basis des Standardlastprofils G1 einen Eigenverbrauchsanteil von 81,5 %. Durch die Automatisierung ist die Brauerei Linko nicht an bestimmte Brautage gebunden. Beispielsweise könnte der Eigenverbrauchsanteil noch weiter erhöht werden, wenn die Brautage an Tage gelegt werden an denen hohe Einstrahlungen auf die PV-Anlage vorherrschen.

Tabelle 8-4: Simulationsergebnisse PV-Konzeptanlage

Parameter	Wert
PV-Generatorenergie (AC-Netz)	18.949 kWh
Eigenverbrauch	15.439 kWh
Netzeinspeisung	3.511 kWh
Spez. Jahresertrag	1.084,44 kWh/kWp
Eigenverbrauchsanteil	81,5 %

8.6.2. Wirtschaftliche Betrachtung

Auf Basis der ausgewählten Hardware in der Simulationssoftware berechnet diese, die Investitionskosten für die konzeptionierte Anlage. Für die Konzeptanlage aus Abschnitt 8.6.1 betragen die Investitionskosten 25.920 €. Der Vorteil einer PV-Anlage aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist, dass in Österreich für PV-Anlagen größer fünf kWp Fördergelder bereitgestellt werden. Die Förderung besteht aus einem Investitionskostenzuschuss und einem geförderten Einspeisetarif. Voraussetzung für eine Förderung der Anlage ist ein positiver Anerkennungsbescheid nach dem Ökostromgesetz. Als Investitionskostenzuschuss für die Errichtung werden nach Stand 2016, 40% der Errichtungskosten, höchstens jedoch ein Betrag in Höhe von 375 Euro/kWp gewährt [71]. Der Tarif für die Abnahme elektrischer Energie aus Photovoltaikanlagen bei Antragstellung und Vertragsabschluss im Jahr 2017 beträgt 7,91 Cent/kWh für eine Laufzeit von 13 Jahren [72]. Der in **Abbildung 8-10** dargestellte Kapitalwertverlauf wurde auf Basis der Kapitalwertmethode (siehe Abschnitt 8.2) und der obengenannten Informationen bei positivem Anerkennungsbescheid erstellt. Der Kapitalwertverlauf zeigt, dass die Photovoltaikanlage bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren absolut vorteilhaft ist, unter Annahme eines positiven Förderbescheids. Laut Online Auskunft der ÖMAG (Abwicklungsstelle für Ökostrom) ist das Förderkontingent für das Jahr 2017 bereits aufgebraucht. Bei Umsetzung der Konzeptanlage müsste um eine Ökostromförderung

zu erhalten, die Antragstellung 2018 erfolgen und für die zukünftig geltenden Förderbedingungen evaluiert werden.

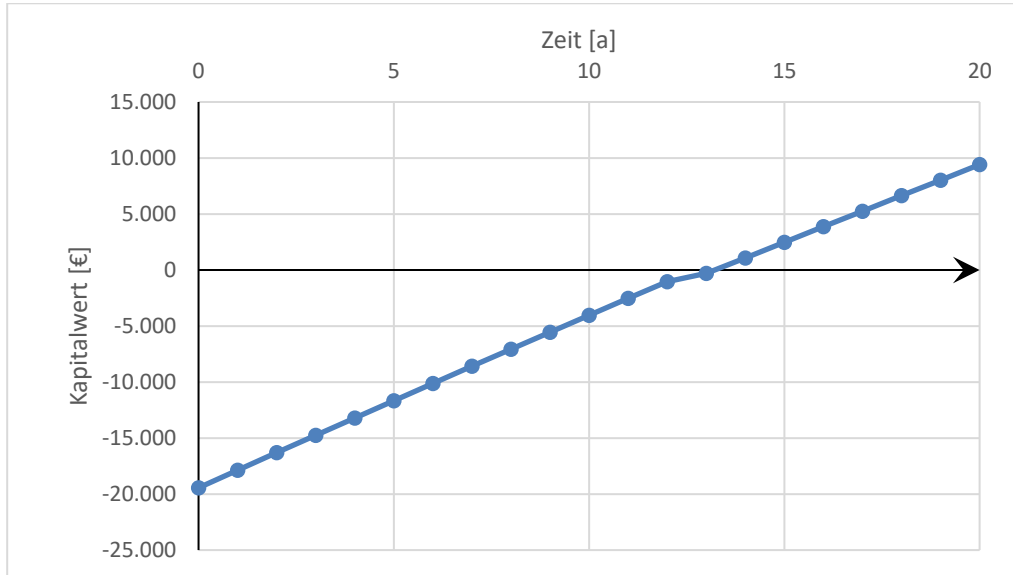


Abbildung 8-10: Kapitalwerteverlauf Photovoltaikanlage

9. Zusammenfassung und Ausblick

Im Bereich der Kleinbrauereien ist in den letzten Jahren ein regelrechter Boom ausgebrochen. Immer mehr Menschen beschäftigen sich mit der Kunst des Bier Brauens. Die Brauerei Linko begann bereits 2005 der Herstellung eines eigenen Bieres für das Gasthaus. Im Laufe der Jahre wurde die Kapazitätsgrenze durch Belieferung umliegender Gasthäuser und Veranstaltungen erreicht und so wurde die Idee zur Automatisierung des Brauprozesses geboren. Die bestehende Brauanlage der Fa. Buchrucker Labu wurde im Zuge des Projektes beinahe vollständig umgebaut. In der Automatisierung der Prozessschritte wurde durch die Masterarbeiten von Herrn Moritz Hübl und dieser, wertvolle Entwicklungsarbeit geleistet, welche der Brauerei in der zukünftigen Prozessführung zu Gute kommen wird.

In Bezug auf die Automatisierung wurden viele Erkenntnisse hinsichtlich der Durchführung eines solchen Projektes gewonnen. Die Verfahrensentwicklung und die Frage wie die Prozessschritte automatisiert werden können, sind in der Planungsphase detailliert geplant worden, trotzdem traten in der Umsetzung teilweise Komplikationen auf, mit denen nicht gerechnet wurde. In der aktuellen Ausbaustufe laufen die meisten, der zuvor händisch erledigten Arbeiten bereits automatisch. Vom ursprünglichen Lastenheft, wurden eine automatische Schrottförderanlage vom Malzlager zur Sudpfanne, sowie die automatische Hopfengabe im Kochprozess zum jetzigen Zeitpunkt nicht umgesetzt. Trotzdem ist aktuell bereits eine Prozessführung mit zwei aufeinanderfolgenden Brauprozessen und dadurch eine erhöhte Produktionskapazität möglich. Durch die ebenfalls vergrößerten Lagerkapazitäten wurde die Produktion von Spezialsorten, die in den letzten Jahren aufgrund fehlender Kapazitäten schlichtweg nicht möglich war, wiederaufgenommen. Darüber hinaus wurde im Sommer 2017 mit der Abfüllung von Flaschen begonnen, welche sich bereits jetzt größter Beliebtheit erfreuen.

In Bezug auf die Energiebereitstellung sind die evaluierten Alternativen im Bereich der Energiespeicherung und Wärmebereitstellung größtenteils nicht wirtschaftlich darstellbar. Die Problematik bei der Wärmebereitstellung besteht hauptsächlich in der notwendigen Beibehaltung des Gasanschlusses für die Küche. Die Energiespeicherung bietet grundsätzlich großes Potential, aus aktueller Sicht muss jedoch die Auslastung des Sudhauses erhöht werden, um eine Investition in ein Wärmerückgewinnungskonzept realisieren zu können. Das größte Potential, den Energieverbrauch in Richtung erneuerbarer Energieträger zu verlagern, bietet eine Photovoltaikanlage. Hier ist ausreichend Dachfläche und potentieller Ertrag vorhanden, um eine Investition beim derzeitigen Fördermodell absolut vorteilhaft darstellen zu können.

10. Literaturangaben

- [1] Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik u. Schmitt, B.: Pilotanlage zur Bereitstellung solarer Prozesswärme bei der Hütt-Brauerei. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek 2011
- [2] Kunze, W. u. Manger, H.-J.: Technologie Brauer & Mälzer. Berlin: VLB 2011
- [3] Kling, K.: Bier selbst gebraut. [mit Rezepten für 100 Sorten]. Göttingen: Verl. Die Werkstatt 2002
- [4] Narziss, L.: Abriss der Bierbrauerei. Newark: John Wiley & Sons Incorporated 2017
- [5] Deutscher Brauer Bund: Brauprozess. <http://www.brauer-bund.de/bier-ist-rein/so-wird-bier-gebraut/der-brauprozess.html>, abgerufen am: 27.11.2017
- [6] Narziss, L. u. Back, W.: Die Bierbrauerei. Band 2: Die Technologie der Würzebereitung. Hoboken: Wiley-VCH 2009
- [7] Forschungsstelle für Energiewirtschaft: Ermittlung von Energiekennzahlen für Anlagen, Herstellungsverfahren und Erzeugnisse. Zielsetzung, Durchführung, Methodik, Kennzahlen, München 1999.
<https://www.ffe.de/download/langberichte/Kennzahlen.pdf>, abgerufen am: 15.11.2017
- [8] Sattler energie consulting: Branchenkonzept Energiekennzahlen und Sparpotenziale für Brauereien, Linz 2000.
<https://www.yumpu.com/de/document/view/7073455/energiekennzahlen-und-sparpotenziale-in-brauereien-1-win>, abgerufen am: 15.11.2017
- [9] Brauunion Österreich: CO2 Neutrale - Energiebereitstellung. Wien 2013
- [10] Brauunion Österreich: UNSERE BRAUEREIEN.
<http://nachhaltigkeit.brauunion.at/unsere-brauereien/>, abgerufen am: 20.11.2017
- [11] Bohak, I., Dickel, T., Franz, O., Gastl, M., Hanke, S., Hartmann, K., Herrmann, M., Kaltner, D. u. Kreis, S.: Ausgewählte Kapitel der Brauereitechnologie. BRAUWELT WISSEN. Nürnberg: Fachverlag Hans Carl 2016
- [12] Mezger, R.: Betrachtung moderner Würzekochsysteme bezüglich ihres Einflusses auf technologisch und physiologisch bedeutende Würzeinhaltsstoffe, Technische Universität München Dissertation. München 2006
- [13] Mezger, R., Krottenthaler, M. u. Back, W.: Moderne Würzekochsysteme - ein Überblick. In: Brauwelt (2003), S. 93-99
- [14] Krottenthaler Martin: Entwicklung moderner Technologien zur Optimierung der Würze- und Bierqualität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt Habilitation 2007

- [15] Gahbauer Helmut et. al.: Green Brewery. Null CO2 Emission in der Brauindustrie. Entwicklung einer methodischen Vorgangsweise für, Wien. <https://www.klimafonds.gv.at/assets/Uploads/Blue-Globe-Reports/Energieeffizienz/2008-2011/BGR12009KB07EZ1F44275EEFFGreen-Brewery.pdf>, abgerufen am: 20.11.2017
- [16] Schönbacher, A.: Thermische Verfahrenstechnik. Grundlagen und Berechnungsmethoden für Ausrüstungen und Prozesse. Berlin, Heidelberg: Springer 2002
- [17] Schwill-Miedaner, A.: Verfahrenstechnik im brauprozess. [Place of publication not identified]: Fachverlag Hans Carl
- [18] Mersmann, A.: Thermische Verfahrenstechnik. Grundlagen und Methoden. Berlin, Heidelberg: Springer 1980
- [19] Narziß, L., Back, W. u. Gastl, M.: Die Technologie der Malzbereitung. Die Bierbrauerei, / Ludwig Narziß; Werner Back ; Bd. 1. Weinheim: Wiley-VCH 2012
- [20] Gnielinski, V., Mersmann, A. u. Thurner, F.: Verdampfung, Kristallisation, Trocknung. Springer Berlin Heidelberg 2013
- [21] KRONES AG: STEINECKER Stromboli. Energiesparendes Würzekochsystem. Broschüre. https://www.krones.com/media/downloads/stromboli_de_neu.pdf, abgerufen am: 05.12.2017
- [22] HACKENSELLNER, T.: Würzebereitung mit dynamischer Niederdruckkochung: Energie- und Anlagentechnik -Teil 1. In: Brauindustrie, S. 14-16
- [23] ESAU & HUEBER GmbH: Würzekochung. SYSTEM NERB VARIOBOIL. Energiesparende Würzekochung durch Vakuumverdampfung. http://www.esau-hueber.de/export/sites/www.esau-hueber.de/documents/Produktblaetter_de/System-Nerb-Varioboil.pdf, abgerufen am: 19.11.2017
- [24] KASPAR SCHULZ Brauereimaschinenfabrik & Apparatebauanstalt KG: Die SCHULZ Sudhaustechnologie. http://www.kaspar-schulz.de//files/schulz_sudhaustechnologie_1.pdf, abgerufen am: 05.12.2017
- [25] Wasmuht K., Weinzierl M. u. Vasel B.: Neue Ergebnisse zum Kochsystem Merlin. In: Brauwelt (2003), S. 1057-1059
- [26] Weinzierl, M.: Ein neuartiges Kochsystem auf Basis der Dünnschicht-Verdampfung, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan Dissertation 2005
- [27] Meura S.A. - Rond-Point J.-B. Meura: ECOSTRIPPER. Ecological and economical wort stripping technology. <http://www.meura.com/uploads/pdf/Ecostripper%20-%20Technical%20leaflet.pdf>, abgerufen am: 20.11.2017

- [28] Brunner Christoph: SolarBrew. Solar Brewing the Future. Von der Machbarkeitsstudie zum europäischen Leuchtturmprojekt
- [29] Schmitt, B., Lauterbach, C., Jordan, U. u. Vajen, K.: Sustainable Beer Production by Combining Solar Process Heat and Energy Efficiency - Holistic System Concept and Preliminary Operational Experiences. EuroSun 2010, S. 1-8
- [30] Herfellner Thomas: Anaerobe Hydrolyse und Methanisierung fester, flüssiger und pastöser organischer Produktionsrückstände aus Brauereien, Technische Universität München Dissertation. München 2010
- [31] Erster Steirischer Trebervertrieb: Was sind Biertreber.
<http://www.biertreber.at/was-sind-biertreber.html>, abgerufen am: 29.11.2017
- [32] Böchzelt, H. G., Graf, N., Habel, R. W., Lomsek, J., Wagner, S. u. Schniter, H.: Möglichkeiten der Wertschöpfungssteigerung durch Abfallvermeidung (biogener Reststoffe) und Nebenproduktnutzung - Feasibilitystudy. Endbericht, 2002.
http://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10029679_46555/460e37e4/011-Endbericht.pdf, abgerufen am: 29.11.2017
- [33] Rieger, H.: Optimierung des Biomassekessels der Brauerei Göss, Montanuniversität Diplomarbeit. Leoben 2007
- [34] Bärnthaler, J., Bergmann, H., Drosch, B., Hornbachner, D., Kirchmayr, R., Konrad, G. u. Resch, C.: Technologie, Logistik und Wirtschaftlichkeit von Biogas-Großanlagen auf Basis industrieller biogener Abfälle. Endbericht, Wien 2008. http://www.biogas-netzeinspeisung.at/downloads/200811_biogas-grossanlagen.pdf, abgerufen am: 29.11.2017
- [35] Offenbacher, E.: Die Grüne Brauerei. Energiegewinnung aus Biertreber. In: Brauindustrie, S. 20-22
- [36] Madigan, M. T., Brock, T. D. u. Sahn, K.: Mikrobiologie. Always learning. Harlow: Pearson 2015
- [37] Labu Buchrucker GmbH: Brauanlagen. Katalog.
<http://www.labu.at/fileadmin/katalog/LABU%20Brauanlagen%20Katalog%20DE.pdf>, abgerufen am: 05.12.2017
- [38] Sios GmbH: Lager- und Ausschanktanks. Kategorie: Gär- und Reifetanks.
<https://www.sios.ch/Lager-und-Ausschanktanks>, abgerufen am: 05.12.2017
- [39] Labu Buchrucker GmbH: Zweistufiger Plattenwärmetauscher.
<http://www.labu.at/brauanlagen/zubehoer/plattenwaermetauscher/>, abgerufen am: 05.12.2017
- [40] Hanghofer, H.: Bier brauen nach eigenem Geschmack. München: BLV 1999

- [41] Kernstock Florian: Entwicklung der elektrischen Peripherie für die Automatisierung einer Kleinbrauanlage, Montanuniversität Projektarbeit. Leoben 2017
- [42] Hübl, M.: Fördertechnische Optimierung einer Brauanlage, Montanuniversität Masterarbeit. Leoben 2017
- [43] DIN 19227; Oktober 1993. *Graphische Symbole und Kennbuchstaben für die Prozeßleittechnik*
- [44] B&R Industrial Automation GmbH: Power Panel C70. Anwenderhandbuch. Version 1.10 (November 2015)
- [45] B&R Industrial Automation GmbH: X20 System. Anwenderhandbuch. Version 3.40 (Oktober 2017)
- [46] B&R Industrial Automation GmbH: Datenblatt X20BC0083. Version 2.34
- [47] B&R Industrial Automation GmbH: Datenblatt X20AO2622. Version 3.05
- [48] B&R Industrial Automation GmbH: Datenblatt X20DO9322. Version 3.12
- [49] B&R Industrial Automation GmbH: Datenblatt X20DIF371. Version 2.12
- [50] B&R Industrial Automation GmbH: Datenblatt X20AI1744. Version 4.10
- [51] B&R Industrial Automation GmbH: Datenblatt X20AI4622. Version 3.10
- [52] B&R Industrial Automation GmbH: Datenblatt X20AT4222. Version 3.10
- [53] B&R Industrial Automation GmbH: Datenblatt X20SM1436. Version 1.32
- [54] B&R Industrial Automation GmbH: Datenblatt X20BT9400. Version 3.02
- [55] B&R Industrial Automation GmbH: ACOPOSinverter P74. Anwenderhandbuch. Version 1.291
- [56] B&R Industrial Automation GmbH: Kapitel 5. XV Module. Version 1.22. Compact I/O System Anwenderhandbuch
- [57] POWERLINK-OFFICE of EPSG: How Powerlink works. <http://www.ethernet-powerlink.org/en/powerlink/technology/how-powerlink-works/>, abgerufen am: 08.11.2017
- [58] B&R Industrial Automation GmbH: mapp Technology. Die Revolution der Automation Software mit B&R mapp Technology. <https://www.br-automation.com/de-at/technologie/mapp-technology/>, abgerufen am: 05.12.2017
- [59] B&R Industrial Automation GmbH: Antriebstechnik Grundfunktionen. Trainingsmodul 440. Version 4.2
- [60] Neunteufel Roman, Laurent Richard u. Perfler Reinhard: Studie Wasserverbrauch und Wasserbedarf. Teil 1: Literaturstudie zum Wasserverbrauch - Einflussfaktoren, Entwicklung und Prognosen, Wien 2010. <http://www.wasseraktiv.at/resources/files/2015/2/23/7104/wasserverbrauch-wasserbedarf-literaturstudie.pdf>, abgerufen am: 14.11.2017

- [61] WASMUND, R.: Überarbeitete und erweiterte Reihen der mechanischen und thermischen Stoffwerte von Würze und Bier im Temperaturbereich zwischen 0 und 75°C. In: Monatschrift für Brauwissenschaft, S. 294-296
- [62] Kienberger Thomas: Thermische Energietechnik. Vorlesungsskript Teil 4
- [63] Dohmann, J.: Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen. Grundlagen und Anwendungen der Kältetechnik. Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2016
- [64] BRUCHA GesmbH: BRUCHAPaneel. PU Wand - WP. Sichtbare Befestigung. http://www.brucha.at/dokumente/de_WP.pdf, abgerufen am: 22.11.2017
- [65] Baehr, H. D. u. Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Mit zahlreichen Tabellen sowie 62 Beispielen und 94 Aufgaben. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- [66] treffpunkt-kaelte: Brauereien. http://www.treffpunkt-kaelte.de/kaelte/de/de_start.html?/kaelte/de/html/anwendungen/bier/bier1.html, abgerufen am: 20.08.2017
- [67] Kapfer T.: Kühllastberechnung. <http://www.htk-doebeln.de/images/pdf/003.pdf>, abgerufen am: 05.12.2017
- [68] Bachmann, S.: Das 1 x 1 der Kältetechnik. Der Kühlraum. In: KKA
- [69] Rautenberg, H. G. u. Vormbaum, H.: Finanzierung und Investition. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer 1993
- [70] energie-experten.org: Schichtladespeicher: Funktion, Aufbau und Varianten, 2016. <http://www.energie-experten.org/heizung/heizungstechnik/warmwasserspeicher/schichtladespeicher.html>, abgerufen am: 01.12.2017
- [71] Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft: Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2016. ÖSET-VO-2016. 2015
- [72] Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft: Änderung der Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2016. 2016

Anhang

- Berechnung Warmwassermenge aus Würzekühlung $TAUS = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Berechnung Heißwassermenge bei Brüdenkondensation
- Berechnung tatsächliche Wassermengen aus Wärmerückgewinnung
- Berechnung Volumina maximale Füllstände in den Energiespeichern
- Berechnung Sankeydiagramm mit Wärmerückgewinnung
- Berechnung Einsparungspotential Energieverbund
- Berechnung Kapitalwertverlauf Energieverbund Gasthaus+Brauerei
- Berechnung Kapitalwertverlauf Biomasseheizwerk Traisen
- Berechnung Kapitalwertverlauf Solarthermie
- Berechnung Kapitalwertverlauf Photovoltaik
- Programmablaufplan Brauprozess
- Reinigungsablauf CIP-Prozess

Berechnung Warmwassermenge aus Würzekühlung $T_{AUS} = 50 \text{ °C}$:

Übertragene Wärmemenge im Plattenwärmetauscher:

$$Q_{\text{übertragen}} = 63505 \text{ kJ} = 17,7 \text{ kWh}$$

Berechnungsparameter bei optimierter Prozessführung:

Parameter	Wert
Eingangstemperatur Kühlwasser T_{Ein}	$12 \text{ °C} = 285,15 \text{ K}$
Ausgangstemperatur Kühlwasser T_{Aus}	$50 \text{ °C} = 323,15 \text{ K}$
Wärmeinhalt Wasser bei 12 °C cp_{12}	$4,189 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
Wärmeinhalt Wasser bei 50 °C cp_{50}	$4,181 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

Berechnung Wassermenge pro Sud:

$$Q_{\text{übertragen}} = Q_{Aus} - Q_{Ein}$$

$$Q_{\text{übertragen}} = m * cp_{50} * T_{Aus} - m * cp_{12} * T_{Ein}$$

$$m = \frac{Q_{\text{übertragen}}}{cp_{50} * T_{Aus} - cp_{12} * T_{Ein}}$$

$$m = \frac{63.505 \text{ kJ}}{4,181 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 323,15 \text{ K} - 4,189 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 285,15 \text{ K}} = 405,5 \text{ kg}$$

Wassermenge pro Doppelsud:

$$m_{GES} = 811 \text{ kg}$$

Berechnung Heißwassermenge aus Brüdenkondensation:

Abwärmepotential aus Brüdenkondensation:

$$Q = 28777 \text{ kJ}$$

Berechnungsparameter:

Parameter	Wert
Eingangstemperatur Kühlwasser T_{Ein}	$50^\circ\text{C} = 323,15 \text{ K}$
Ausgangstemperatur Kühlwasser T_{Aus}	$85^\circ\text{C} = 358,15 \text{ K}$
Wärmeinhalt Wasser bei 50°C cp_{50}	$4,181 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
Wärmeinhalt Wasser bei 85°C cp_{85}	$4,196 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

Berechnung Wassermenge pro Sud:

$$Q = Q_{Aus} - Q_{Ein}$$

$$Q = Q_{Aus} - Q_{Ein}$$

$$Q_{\text{übertragen}} = m * cp_{85} * T_{Aus} - m * cp_{50} * T_{Ein}$$

$$m = \frac{Q}{cp_{85} * T_{Aus} - cp_{50} * T_{Ein}}$$

$$m = \frac{28777 \text{ kJ}}{4,196 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 358,15 \text{ K} - 4,181 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 323,15 \text{ K}} = 189,7 \text{ kg}$$

Wassermenge pro Doppelsud:

$$m = 379,4 \text{ kg}$$

Berechnung tatsächliche Wassermengen aus Wärmerückgewinnung:

Wassermengen pro Doppelsud:

Würzekühlung:

$$m_{GES} = 811 \text{ kg}$$

Brüdenkondensation:

$$m_{HW} = 379,4 \text{ kg}$$

Im Wärmerückgewinnungskonzept wird bei der Brüdenkondensation das Wasser aus dem Warmwasserspeicher abgezogen, daher ergeben sich folgende Wassermengen.

Warmwassermenge:

$$m_{WW} = 811 \text{ kg} - 379,4 \text{ kg} = 431,6 \text{ kg}$$

Heißwassermenge:

$$m_{HW} = 379,4 \text{ kg}$$

Umrechnung auf Volumina:

Dichte	Wert
Dichte von Wasser bei 50 °C ρ_{50}	988,03 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Dichte von Wasser bei 85 °C ρ_{85}	968,61 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Warmwasser:

$$V_{WW} = \frac{m_{WW}}{\rho_{50}} = \frac{431,6 \text{ kg}}{988,03 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,437 \text{ m}^3 = 437 \text{ l}$$

Heißwasser:

$$V_{HW} = \frac{m_{HW}}{\rho_{85}} = \frac{379,4 \text{ kg}}{968,61 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,392 \text{ m}^3 = 392 \text{ l}$$

Berechnung Volumina maximale Füllstände in den Energiespeichern:

Dichte	Wert
Dichte von Wasser bei 50 °C ρ_{50}	988,03 $\frac{kg}{m^3}$
Dichte von Wasser bei 85 °C ρ_{85}	968,61 $\frac{kg}{m^3}$

Warmwasser:

$$V_{WWmax} = \frac{m_{WW}}{\rho_{50}} = \frac{631,6 \text{ kg}}{988,03 \frac{kg}{m^3}} = 0,639 \text{ m}^3 = 639 \text{ l}$$

Heißwasser:

$$V_{HWmax} = \frac{m_{HW}}{\rho_{85}} = \frac{379,4 \text{ kg}}{968,61 \frac{kg}{m^3}} = 0,392 \text{ m}^3 = 392 \text{ l}$$

Berechnung Sankeydiagramm mit Wärmerückgewinnung

Abwärmepotentiale / Wärmebedarf pro Brauvorgang:

Parameter	Wert
Abwärmepotential Würzekühlung Q_{WK}	35,4 kWh
Abwärmepotential Pfannendunst Q_{PD}	16 kWh
Wärmebedarf Warmwasser bei 50 °C Q_{WW}	13,4 kWh
Wärmebedarf Heißwasser bei 85 °C Q_{HW}	25,4 kWh ¹³

Um die Deckung der Abwärmepotentiale auf den Wärmebedarf umzulegen, muss die Abwärme aus der Würzekühlung entsprechend der Wassermengen aufgeteilt werden.

Aufteilung Abwärmepotential Würzekühlung:

Wärmeenergie bei 50 °C = Gesamte rückgewonnene Wärmeenergie bei 50 °C:

$$Q_{50} = \frac{Q_{WK}}{m_{GES}} * m_{WW} = \frac{35,4 \text{ kWh}}{811} - 431,6 \text{ kg} = 18,8 \text{ kWh}$$

Wärmeenergie bei 85 °C:

$$Q_{WW85} = \frac{Q_{WK}}{m_{GES}} * m_{HW} = \frac{35,4 \text{ kWh}}{811} - 379,4 \text{ kg} = 16,6 \text{ kWh}$$

Gesamte rückgewonnene Wärmeenergie bei 85 °C

$$Q_{85} = Q_{WW85} + Q_{HW} = 16,6 \text{ kWh} + 16 \text{ kWh} = 32,6 \text{ kWh}$$

¹³ 300 kg Heißwasser bei 85 °C bei Bezugstemperatur von 12 °C

Rückgewonnene Wärmeenergie / Wärmebedarf für 50 Brauvorgänge mit Doppelsud:

Parameter	Wert
Rückgewonnene Wärmeenergie bei 50 °C Q_{50}	18,8 kWh
Rückgewonnene Wärmeenergie bei 85 °C Q_{85}	32,6 kWh
Wärmebedarf Warmwasser bei 50 °C Q_{WW}	13,4 kWh
Wärmebedarf Heißwasser bei 85 °C Q_{HW}	25,4 kWh

Überschuss Wärmeenergie durch Wärmerückgewinnung:

Bei 50 °C:

$$Q_{\ddot{U}W50} = Q_{50} - Q_{WW} = 18,8 \text{ kWh} - 13,4 \text{ kWh} = 5,4 \text{ kWh}$$

Bei 85 °C:

$$Q_{\ddot{U}W85} = Q_{85} - Q_{HW} = 32,6 \text{ kWh} - 25,4 \text{ kWh} = 7,2 \text{ kWh}$$

Wärmebereitstellung CIP:

Im CIP-Prozess werden 120 kg Wasser bei 65 °C benötigt.

Parameter	Wert
Wärmeinhalt Wasser bei 65 °C cp_{65}	4,184 $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
Wärmeinhalt Wasser bei 50 °C cp_{50}	4,181 $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
Wärmeinhalt Wasser bei 85 °C cp_{85}	4,196 $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
Mittlerer Wärmeinhalt Wasser cp_m	4,182 $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

Wärmeinhalt:

$$Q_{CIP} = m * cp_{65} * (273,15 + 65)K = 169778 \text{ kJ}$$

Mischungsrechnung Heißwasser und Warmwasser:

$$Q_{CIP} = Q_{CIP85} + Q_{CIP50}$$

$$169778 \text{ kJ} = m_{CIP85} * cp_{85} * 358,15 \text{ K} + m_{CIP50} * cp_{50} * 323,15 \text{ K}$$

→

$$m_{CIP85} = 50,4 \text{ kg}$$

$$m_{CIP50} = 69,6 \text{ kg}$$

Wärmebedarf aus Energiespeichern mit Umgebungstemperatur $T_U = 12^\circ\text{C}$

$$Q_{HWCIP} = m_{CIP85} * c_{p_m} * (85^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C}) = 15386 \text{ kJ} = 4,3 \text{ kWh}$$

$$Q_{WWCIP} = m_{CIP50} * c_{p_m} * (50^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C}) = 11060 = 3,1 \text{ kWh}$$

Berechnung Einsparungspotential Energieverbund:

Strombedarf pro Doppelsud:

$$W_{\text{Prozess}} = 97,3 \text{ kWh}$$

Strombedarf CIP = Wärmebedarf:

$$W_{\text{CIP}} = 7,4 \text{ kWh}$$

Gesamter Strombedarf für Vierfachsud:

$$W_{\text{Vierfach}} = 2 * W_{\text{Prozess}} + 2 * W_{\text{CIP}}$$

$$W_{\text{Vierfach}} = 209,4 \text{ kWh}$$

Strombedarf Vierfachsud mit Wärmerückgewinnung:

$$W_{\text{VierfachWRG}} = 2 * 60,2 \text{ kWh} = 120,4 \text{ kWh}$$

Einsparungspotential pro Vierfachsud:

$$W_{\text{EinsparungVierfach}} = 209,4 \text{ kWh} - 120,4 \text{ kWh} = 89 \text{ kWh}$$

Einsparung bei angestrebter Betriebsweise (50 mal Vierfachsud pro Jahr):

$$W_{\text{EinsparungJahr}} = 89 \text{ kWh} * 50 = 4450 \text{ kWh} = 4,45 \text{ MWh}$$

Berechnung Kapitalwertverlauf Energieverbund Gasthaus+Brauerei:

Parameter	Wert
Kalkulatorischer Zinssatz	2 %
Energiepreissteigerung	2 %
Investitionskosten	7500 €
Stromkosten 2016 ¹⁴	9,03 Cent/kWh
Einsparung Strom /Jahr	4450 kWh

¹⁴ Summe aller Kosten (Arbeitspreis, Netznutzung etc.)

Anhang

Jahr	Einsp. Strom [kWh]	Kosten Strom [Cent/kWh]	Energieerlös [€]	Auszahlungen [€]	Cashflow [€]	Kapitalwert [€]
0				7500,00	-7.500,00	-7.500,00
1	4450	9,03	401,79		401,79	-7.106,08
2	4450	9,21	409,83		409,83	-6.712,17
3	4450	9,39	418,03		418,03	-6.318,25
4	4450	9,58	426,39		426,39	-5.924,34
5	4450	9,77	434,91		434,91	-5.530,42
6	4450	9,97	443,61		443,61	-5.136,51
7	4450	10,17	452,49		452,49	-4.742,59
8	4450	10,37	461,53		461,53	-4.348,68
9	4450	10,58	470,77		470,77	-3.954,76
10	4450	10,79	480,18		480,18	-3.560,84
11	4450	11,01	489,78		489,78	-3.166,93
12	4450	11,23	499,58		499,58	-2.773,01
13	4450	11,45	509,57		509,57	-2.379,10
14	4450	11,68	519,76		519,76	-1.985,18
15	4450	11,91	530,16		530,16	-1.591,27
16	4450	12,15	540,76		540,76	-1.197,35
17	4450	12,39	551,58		551,58	-803,44
18	4450	12,64	562,61		562,61	-409,52
19	4450	12,90	573,86		573,86	-15,60
20	4450	13,15	585,34		585,34	378,31

Berechnung Kapitalwertverlauf Biomasseheizwerk Traisen:

Parameter	Wert
Kalkulatorischer Zinssatz	2 %
Energiepreissteigerung	2 %
Investitionskosten	5792 €
Stromkosten 2016	9,03 Cent/kWh
Gaskosten 2016 15	5,44 Cent/kWh
Gasverbrauch Heizung + WW	66649,37 kWh
Stromverbrauch Boiler 50 mal Vierfachsud16	3820 kWh

Angebot Bio Energie:

Parameter	Wert
Leistungspreis	20,32 €/KW
Arbeitspreis	59,50 €/MWh
Mess- und Servicepreis	9,57 €/Monat
Anschlussleistung	32 KW

¹⁵ gemittelter Wert aller Kosten (Energiekosten+Netzkosten) ohne Umsatzsteuer

¹⁶ Berechnet auf Basis des Wärmebedarfs pro Brauvorgang (aufheizen um 70 °C)

Jahr	Gasverbrauch [kWh]	Stromverbrauch [€]	Kosten Gas [€]	Kosten Strom [€]	Kosten Fernwärme [€]	Erlös [€]	Ausgaben [€]	Cash Flow [€]	Kapitalwert [€]
0						0	5.792	-5.792	-5.792
1	66.649	3.820	3.626	345	4.731	-760	0	-760	-6.537
2	66.649	3.820	3.698	352	4.825	-775	0	-775	-7.282
3	66.649	3.820	3.772	359	4.922	-791	0	-791	-8.027
4	66.649	3.820	3.848	366	5.020	-807	0	-807	-8.773
5	66.649	3.820	3.925	373	5.121	-823	0	-823	-9.518
6	66.649	3.820	4.003	381	5.223	-839	0	-839	-10.263
7	66.649	3.820	4.083	388	5.328	-856	0	-856	-11.008
8	66.649	3.820	4.165	396	5.434	-873	0	-873	-11.753
9	66.649	3.820	4.248	404	5.543	-891	0	-891	-12.498
10	66.649	3.820	4.333	412	5.654	-908	0	-908	-13.243
11	66.649	3.820	4.420	420	5.767	-926	0	-926	-13.989
12	66.649	3.820	4.508	429	5.882	-945	0	-945	-14.734
13	66.649	3.820	4.598	437	6.000	-964	0	-964	-15.479
14	66.649	3.820	4.690	446	6.120	-983	0	-983	-16.224
15	66.649	3.820	4.784	455	6.242	-1.003	0	-1.003	-16.969
16	66.649	3.820	4.880	464	6.367	-1.023	0	-1.023	-17.714
17	66.649	3.820	4.977	474	6.494	-1.043	0	-1.043	-18.459
18	66.649	3.820	5.077	483	6.624	-1.064	0	-1.064	-19.205
19	66.649	3.820	5.178	493	6.757	-1.086	0	-1.086	-19.950
20	66.649	3.820	5.282	503	6.892	-1.107	0	-1.107	-20.695

Berechnung Kapitalwertverlauf Solarthermie:

Parameter	Wert
Kalkulatorischer Zinssatz	2 %
Energiepreissteigerung	2 %
Inflationsrate	2 %
Ertragsminderung (Degradation) pro Jahr	0,1 %
Investitionskosten	35101,14€
Gaskosten 2016 17	5,44 Cent/kWh
Wartungs; Versicherungskosten	0,1 %

¹⁷ gemittelter Wert aller Kosten (Energiekosten+Netzkosten) ohne Umsatzsteuer

Tagesdurchschnittlicher Wasserverbrauch:

Zählerstand	Datum
3005 m ³	13.09.2016
3177 m ³	01.09.2017

Verbrauch:

$$\text{Warmwasserverbrauch Gasthaus} = 172 \frac{\text{m}^3}{353} \text{Tage} = \sim 490 \text{ l/Tag}$$

Verbrauch 50 Vierfachsude:

$$\text{Warmwasserverbrauch Brauerei} = 100 * 470 = 47000 \text{ l} = \sim 130 \text{ l/Tag}$$

Jahr	Energie		Einzahlungen [€]	Auszahlungen [€]	Cashflow [€]	Kapitalwert [€]
	Solarsystem [kWh]	Gaspreis [Cent/kWh]				
0			0	35.101	-35.101	-35.101
1	13.045	4,42	576	36	541	-34.571
2	13.032	4,51	587	37	551	-34.042
3	13.019	4,60	598	37	561	-33.513
4	13.006	4,69	610	38	572	-32.985
5	12.993	4,78	621	39	583	-32.457
6	12.980	4,88	633	40	594	-31.930
7	12.967	4,98	645	40	605	-31.403
8	12.954	5,08	657	41	616	-30.877
9	12.941	5,18	670	42	628	-30.352
10	12.928	5,28	683	43	640	-29.827
11	12.915	5,39	696	44	652	-29.303
12	12.902	5,49	709	45	664	-28.779
13	12.889	5,60	722	45	677	-28.256
14	12.876	5,72	736	46	690	-27.733
15	12.864	5,83	750	47	703	-27.211
16	12.851	5,95	764	48	716	-26.689
17	12.838	6,07	779	49	729	-26.168
18	12.825	6,19	793	50	743	-25.648
19	12.812	6,31	808	51	757	-25.128
20	12.799	6,44	824	52	772	-24.609

Berechnung Kapitalwertverlauf Photovoltaik:

Parameter	Wert
Kalkulatorischer Zinssatz	2 %
Energiepreissteigerung	2 %
Inflationsrate	2 %
Ertragsminderung (Degradation) pro Jahr	0,1 %
Investitionskosten	25920 €
Wechselrichtertausch im 13. Jahr	1000 €
Wartungs; Versicherungskosten	0,5 %
Tarif Ökostromförderung 201718	7,91 Cent/kWh
Tarif ohne Förderung 3. Quartal 201719	3,24 Cent/kWh
Tarif ohne Förderung in Jahr 14	4,27 Cent/kWh
Stromkosten 2016	9,03 Cent/kWh

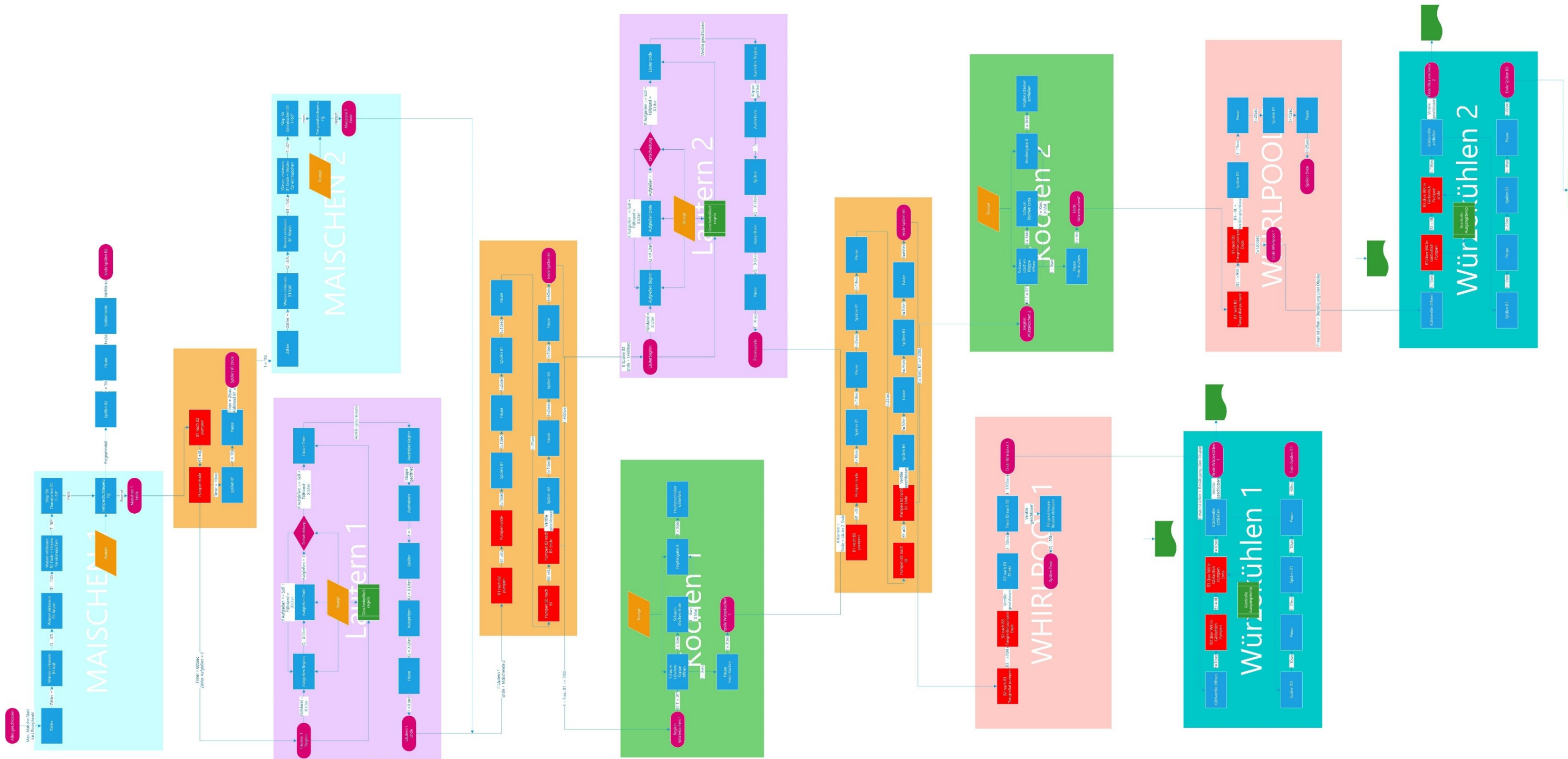
¹⁸ Laufzeit 13 Jahre

¹⁹ Quelle: OEMAG

Anhang

Jahr	Energie [kWh]	PV	Eigenverbrauch [kWh]	Einspeisung [kWh]	Einsparung [Cent/kWh]	Vergütung [Cent/kWh]	Energieerlös [€]	Auszahlungen [€]	Cashflow [€]	Kapitalwert [€]
0					9,03			19.440	-19.440	-19.440
1	18.949		15.439	3.511	9,21	7,91	1.700	97	1.602	-17.869
2	18.930		15.424	3.507	9,39	7,91	1.726	99	1.627	-16.305
3	18.911		15.408	3.504	9,58	7,91	1.754	101	1.652	-14.748
4	18.892		15.393	3.500	9,77	7,91	1.781	103	1.678	-13.198
5	18.873		15.377	3.497	9,97	7,91	1.810	105	1.704	-11.654
6	18.854		15.362	3.493	10,17	7,91	1.838	107	1.731	-10.117
7	18.836		15.347	3.490	10,37	7,91	1.868	109	1.758	-8.586
8	18.817		15.331	3.486	10,58	7,91	1.898	112	1.786	-7.062
9	18.798		15.316	3.483	10,79	7,91	1.928	114	1.814	-5.544
10	18.779		15.301	3.480	11,01	7,91	1.959	116	1.843	-4.032
11	18.760		15.285	3.476	11,23	7,91	1.991	118	1.872	-2.526
12	18.742		15.270	3.473	11,45	7,91	2.023	121	1.902	-1.026
13	18.723		15.255	3.469	11,68	7,91	2.056	1.123	933	-305
14	18.704		15.239	3.466	11,91	4,27	1.964	126	1.838	1.088
15	18.685		15.224	3.462	12,15	4,36	2.001	128	1.873	2.480
16	18.667		15.209	3.459	12,39	4,45	2.039	131	1.908	3.870
17	18.648		15.194	3.455	12,64	4,54	2.078	133	1.944	5.258
18	18.629		15.179	3.452	12,90	4,63	2.117	136	1.981	6.645
19	18.611		15.163	3.448	13,15	4,72	2.157	139	2.018	8.031
20	18.592		15.148	3.445	13,42	4,81	2.198	142	2.057	9.415

Programmablaufplan Brauprozess:



Reinigungsablauf CIP-Prozess:

Prozessbeschreibungen:

Prozess	Ventile	Spalte1	Spalte2	Spalte3	Pumpe	hz
Spülen B1	kw oder ww	S1	u1	a	-	
Spülen B2	kw oder ww	S2 und S5	u2	a	-	
Spülen B3	kw oder ww	S3	u3	a	-	
Kreisumpen B1	u1	re	S1		positiv	35
Kreisumpen B2	u2	re	S2 und S5		positiv	35
Kreisumpen B3	u3	re	S3		positiv	35
Pumpen B1 B2	u1	e2			positiv	35
Pumpen B1 B3	u1	t3			positiv	35
Pumpen B1 B4	e1	u4			negativ	35
Pumpen B2 B1	u2	e1			positiv	35
Pumpen B2 B3	u2	t3			positiv	35
Pumpen B3 B1	u3	e1			positiv	35
Pumpen B3 B2	u3	e2			positiv	35
Läutern B2 B3	Gemü (0-100%) Austrebermotor (positiv 1-2hz)				-	
Würzekühlen B3 WK	u3	wk	k1		positiv	20
WK rückspülen	wk	a			negativ	20
Lauge ansaugen B4 B1	u4	e1	man1		positiv	35
Lauge aus B1 über WK in Laugetank	u1	wk			positiv	35
Lauge aus Laugetank über WK in B1	u1	wk			negativ	35
Spülen WK1	kw	wk	s6		positiv	35
Filter Rückspülen	kw	re	a		negativ	35
Leitung Spülen B1	kw	s6	e1		positiv	35
Leitung Spülen B2	kw	s6	e2		positiv	35
Leitung Spülen B3	kw	s6	t3		positiv	35
Spülen S6	kw	s6	a			
Spülen WK2	a	wk			negativ	35

Prozessschritte CIP:

Nr	Reinigen Prozessschritt
1	MsgBox: min.100l Lauge in B1, Laugetank mit U4 und WK verbunden?
2	Heizen auf 65°C
3	KW Spülen B2
4	KW Spülen B3
5	Kreisumpen B1 (20min)
6	Pumpen B1 B2
7	KW Spülen B1
8	Kreisumpen B2 (20min)
9	CIP Lauge über Gemü ablassen (Gemü 100)
10	Kreisumpen B3 (20min)
11	Keisumpen B3 T3 (5min)
12	Pumpen B3 B1
13	Lauge aus B1 über WK in Laugetank
14	Lauge aus Laugetank über WK in B1
15	Lauge aus B1 über WK in Laugetank
16	U1,U2,U3,A (Alles Auslassen)
17	KW Spülen B1
18	KW Spülen B2
19	KW Spülen B3
20	Spülen S6
21	Filter Rückspülen
22	Spülen WK
23	Leitung Spülen B1
24	Leitung Spülen B2
25	Leitung Spülen B3
26	KW Spülen B1
27	KW Spülen B2
28	KW Spülen B3