

EUWA Wasseraufbereitungsanlagen
Thorsis Technologies GmbH (ehemals ifak system GmbH)
Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB) e.V.
Hochschule Fulda University of Applied Sciences

**Wasser- und Energieeinsparung durch Flexibilisierung der
Wasseraufbereitung in Brauereien durch rechnergestützte
Bedarfsprognose und Anpassung der Ausbringung von
Umkehrosmoseanlagen**

(Flexibilisierung Wasseraufbereitung)



Abschlussbericht über das Kooperationsprojekt, gefördert von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt AZ 32155-01

Wolfgang Winkler, EUWA Wasseraufbereitungsanlagen
Dr. Ralf Tschepetzki, Thorsis
Stefan Reimann, VLB Berlin
Dr.-Ing. Stefan Schildbach, Hochschule Fulda

Dezember 2018

0. KONTAKT

EUWA H.H. Eumann GmbH
Wolfgang Winkler
Daimlerstrasse 2 – 10
71116 Gärtringen;

Thorsis Technologies GmbH
Dr. Paolo Varutti
Oststrasse 18, 39114 Magdeburg

Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB) e.V.
Forschungsinstitut für Biotechnologie und Wasser –
Fachgebiet für Wasserqualität, -Management und -Technologie
Dr. Alfons Ahrens
Seestrasse 13
13353, Berlin

Hochschule Fulda
Fachbereich Lebensmitteltechnologie, Fachgebiet Bioverfahrenstechnik
Dr.-Ing. Stefan Schildbach
Leipziger Straße 123
36037 Fulda

Der Bezug des Abschlussberichts ist über die Hochschule Fulda möglich.

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	32155/01	Referat	23	Fördersumme	290.699 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel **Wasser- und Energieeinsparung durch Flexibilisierung der Wasseraufbereitung in Brauereien durch rechnergestützte Bedarfsprognose und Anpassung der Ausbringung von Umkehrosmoseanlagen**

Stichworte Verfahren, Wasser, Energie, Wasseraufbereitung, Energieeffizienz, Lebensmittel

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
24 + 6 Monate	06.07.2015	31.12.2017	1

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	EUWA H. H. Eumann GmbH Daimlerstr. 2-10 71116 Gärtringen	Tel:	07034 275 25
		Fax:	07034 275 90
		Projektleitung	Wolfgang Winkler
		Bearbeiter	

Kooperationspartner

- Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB), 13353 Berlin
- Thorsis Technologies GmbH (vormals Ifak system GmbH), 39114 Magdeburg
- Hochschule Fulda, 36037 Fulda

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Um Wasserverluste durch das häufige An- und Abfahren von Umkehrosmoseanlagen zur Wasseraufbereitung in Brauereien zu vermeiden, sollten die Anlagen mit flexibler Ausbringung betrieben werden. Damit geht eine weitergehende Nutzung des Reservevolumens einher. Aus Gründen der Versorgungssicherheit ist es wichtig, den Wasserbedarf in der nahen Zukunft ausreichend genau quantifizieren zu können, und diese Information in die Steuerung der Ausbringung der Wasseraufbereitung mit einzubringen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Entsprechend der Zielstellung gliederte sich das Vorhaben in die folgenden Projektphasen:

- Bestandsaufnahme Beispielbetrieb
- Bedarfspriorisierung
- Stellgrößenalgorithmus Wasseraufbereitung
- Regleroptimierung durch Simulationssoftware
- Pilotversuche Flexibilisierung Umkehrosmose
- Implementierung Simulation

Basierend auf einer differenzierten und vor allen Dingen zeitbasierten Bestandsaufnahme der relevanten Wasserverbraucher in einer mittelständischen Brauerei mit einem Jahresausstoß von 78.000 hL erfolgte die Erstellung von Tages- und Wochenganglinien des Gesamtwasserbedarfs, die wiederum als Grundlage zur Erstellung von Algorithmen für die flexible Regelung einer Umkehrosmoseanlage herangezogen wurden. Diese Algorithmen 1 bis 4 weisen einen steigenden Implementierungsaufwand dar und wurden zur Berechnung verschiedener Szenarien eingesetzt. Eine Analyse der wichtigsten wasserverbrauchenden Aggregate und Anlagen gab Auskunft über die Betriebsdaten, die im Sinne einer sich selbst aktualisierenden Prognose in die Regelung immer wieder aktuell eingespeist werden müssen (Bedarfspriorisierung). Weitergehende Ansätze zur automatisierten Regleroptimierung durch den Einsatz von Simulationssoftware wurden untersucht. Pilotversuche im 1,5-m³/h-Maßstab zur Ermittlung der Anlagenkenndaten, insbesondere hinsichtlich der Permeatqualität und des elektrischen Energiebedarfs, fanden vor Ort in einer zweiten Brauerei statt. Abschließend erfolgte noch eine Komplettsimulation (neben Wasser- auch Energie- und Produktströme) auf Basis der in Brauerei 1 erhobenen Daten am Beispiel des Sudhauses mit Hilfe der Simulationsplattform SIMBA# des Projektpartners Thorsis (vormals ifak).

Ergebnisse und Diskussion

Aus den sich aus der Bestandsaufnahme des Beispielbetriebes ergebenden Ganglinien war es möglich, über verschiedene Algorithmen die Anzahl der täglichen Schaltzyklen mit den dazugehörigen wasserintensiven An- und Abfahrphasen zunächst von zehn (Algorithmus 1, An-Aus-Betrieb) auf drei (Algorithmus 2, Nutzung der Flexibilität der Umkehrosmose) bis auf Null (Algorithmus 3, zusätzliche Bedarfsprognose rollierend über 90 min) bzw. unter hinsichtlich der Reservegröße ungünstigeren Voraussetzungen (Algorithmus 4) von 24 auf sieben zu verringern. Grundsätzlich ist es möglich und ratsam, die Steuerung der Umkehrosmose über eine softwarebasierte Regleroptimierung weiter zu verbessern.

Die Versuche mit einer Umkehrosmoseanlage im 1,5-m³/h-Maßstab zeigten, dass eine Spreizung der Ausbringung im Bereich von 20 % bis 100 % der Nennausbringung machbar ist. Bei den Ausbringungen im unteren Teil des Regelbereichs ist auf die sich verschlechternde Permeatqualität durch den niedrigeren Wasserflux zu achten und ggf. durch Abschaltung von Membranfläche gegenzusteuern. Insgesamt war aber eine einfache und robuste Fahrweise möglich. Energetisch wirkte sich ein Teillastbetrieb durch die geringere benötigte transmembrane Druckdifferenz positiv aus. Unter Berücksichtigung einer typischen Tagesganglinie steigt die Nettoausbeute der Anlage unter Berücksichtigung der Variation der Ausbringung und dem sich ändernden Verschnittanteil durch die Flexibilisierung der Wasseraufbereitung von 86,5 % auf 90,4 %, was einer Verringerung des durch die Wasseraufbereitung anfallenden Abwassers um knapp 30 % entspricht. Darüber hinaus sinkt der elektrische Energiebedarf unter Praxisbedingungen von 0,42 kWh/m³ auf 0,35 kWh/m³, was einer Einsparung von ca. 17 % entspricht. Die für die Bedarfsprognose wichtige Rückkopplung aus dem Prozess beschränkte sich durch die durchgeführte Bedarfspriorisierung auf eine begrenzte Anzahl von Daten aus der Betriebsdatenerfassung und Produktionsplanung. Allerdings stellte sich die automatisierte Bereitstellung dieser Informationen bei klein- und mittelständischen Brauereien in der Umsetzung als Problem dar.

Die am Beispiel des Sudhauses durchgeführte Komplettsimulation mit Produkt- und Energieströmen ergab nochmals weitergehende Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Verbrauchsdaten. Allerdings ist der für die Implementierung der Simulation erforderliche Aufwand erheblich hoch und daher derzeit kaum mit vertretbarem Aufwand umzusetzen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Der Antragsteller EUWA Wasseraufbereitungsanlagen hat ebenso wie der Kooperationspartner Thorsis Technologies (vormals ifak) ein direktes geschäftliches Interesse an der Umsetzung der Erkenntnisse des Projektes.

Die VLB Berlin als weiterer Kooperationspartner verfügt über herausragende, branchenspezifische Kommunikationskanäle, wie beispielsweise die eigene Zeitschrift Brauerei Forum, aber auch Fachtagungen, Seminare sowie einen Newsletter mit ca. 8.000 Adressaten. Darüber hinaus unterhält sie für ihre Mitglieder verschiedene Fachgremien. Der hierzu gehörige Technisch-wissenschaftliche Ausschuss zum Themenschwerpunkt Umwelt-/Ressourcenmanagement und Arbeitssicherheit wurde bereits in der Vergangenheit in das Projekt mit eingebunden und dient auch weiterhin zur Weitergabe der Erkenntnisse in die Praxis auf Entscheider Ebene. Sowohl die VLB Berlin als auch die Hochschule Fulda nehmen die Erkenntnisse in die Lehre und Weiterbildung mit auf.

Es werden die Projektergebnisse zeitnah in den entsprechenden brauereispezifischen Fachmedien in Gestalt gemeinsamer Artikel veröffentlicht.

Fazit

Wasser- und Energieeinsparung in relevanter Größenordnung ist durch eine flexible, mit Hilfe einer über eine Prognose abgesicherte Fahrweise einer Umkehrosmoseanlage in Brauereien realisierbar. Hierbei bietet sich eine abgestufte Vorgehensweise an, wie sie im Ergebnisteil detailliert vorgestellt wird. Ein größeres Hemmnis bei klein- und mittelständischen Brauereien stellt das Einpflegen von Produktionsplanungsdaten und die Anbindung und damit automatische Rückmeldung aus dem Prozess dar. Hierfür sind noch praktische Lösungen zu erarbeiten und zu implementieren. Auf der anderen Seite sind der weiteren Optimierung basierend auf einer Komplettsimulation einer Brauerei kaum Grenzen gesetzt. Allerdings ist der hierfür erforderliche Implementierungsaufwand erheblich.

I. INHALTSVERZEICHNIS

I. Inhaltsverzeichnis	1
II. Abbildungsverzeichnis	3
III. Tabellenverzeichnis	4
IV. Abkürzungsverzeichnis.....	5
V. Zusammenfassung	6
VI. Einleitung	7
VII. Hauptteil	10
1. Arbeitsschritte, Methoden, Ergebnisse	10
1.1 Bestandsaufnahme Beispielbetrieb	10
1.1.1 Allgemeine Beschreibung des Betriebes	10
1.1.2 Beschreibung der Betriebsdatenerfassung (BDE) für den Rohstoff Wasser	11
1.2 Bedarfspriorisierung.....	13
1.3 Stellgrößenalgorithmus Wasseraufbereitung.....	15
1.3.1 Algorithmus 1: Ein-Aus-Fahrweise WA und Relation zur Reservegröße	16
1.3.2 Algorithmus 2: Flexible Fahrweise WA ohne Bedarfsprognose.....	18
1.3.3 Algorithmus 3: Flexible Fahrweise WA mit rollierender Bedarfsprognose 90 min.....	18
1.3.4 Algorithmus 4: Flexible Fahrweise Wasseraufbereitung basierend auf aktuellem, täglichem Maximalstundenmittel.....	19
1.4 Regleroptimierung durch Simulationssoftware	22
1.4.1 Analyse des Regelproblems	22
1.4.2 Entwicklung der automatisierungstechnischen Funktionen	23
1.4.3 Anpassung des Stellgrößenalgorithmus	25
1.4.4 Fehlerbetrachtung	27
1.4.5 Bewertung Regleroptimierung	28
1.5 Versuche Flexibilisierung RO	28
1.5.1 Versuchsanlage.....	28
1.5.2 Permeatqualität in Abhängigkeit der Ausbringung	28
1.5.3 Elektrischer Energiebedarf in Abhängigkeit der Ausbringung	29
1.5.4 Zusammenfassende Bewertung der Pilotversuche mit variabler Ausbringung	31
1.6 Implementierung Simulation.....	33

1.6.1 Wahl des Simulationssystems	33
1.6.2 Mathematische Modellgrundlagen	34
1.6.3 Modellblöcke für MSR	35
1.6.4 Simulationsmodell am Beispiel Sudhaus	35
1.6.5 Simulationsergebnisse am Beispiel Sudhaus	38
2. Diskussion der Ergebnisse	41
3. Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung / zusätzliche Umweltentlastung ...	45
4. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....	48
VIII. Fazit	49
IX. Literaturverzeichnis	50
X. Anhang.....	52

II. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Zeitbezogener Wasserbedarf - Sudhaus	13
Abbildung 2: Theoretische Verteilung des Frischwassers in einer Brauerei	14
Abbildung 3: Priorisierung des Wasserbedarfs in einer Brauerei nach Produktionsbereichen	15
Abbildung 4: Tagesgang des Gesamtfrischwasserbedarfs des Beispielbetriebs bei max. Produktion (Worst-Case-Szenario, insgesamt 146 m ³ in 24 h, durchschnittlich 6,1 m ³ /h).....	16
Abbildung 5: Größe der Reserve in Abhängigkeit der Größe der Wasseraufbereitungsanlage	17
Abbildung 6: Tagesgang mit Algorithmus 1 (Schaltfunktion 90 % / 98 % mit konstanter Ausbringung Wasseraufbereitung 10 m ³ /h); zehn Schaltzyklen in 24 h.....	17
Abbildung 7: Tagesgang mit Algorithmus 2 (Leitgröße Abweichung aktueller Füllstand zum max. Füllstand Reserve; Ausbringung Wasseraufbereitung 20 % - 100 %); drei Schaltzyklen in 24 h	18
Abbildung 8: Tagesgang mit Algorithmus 3 (Leitgröße Bedarfsprognose 90 min rollierend, abgesichert durch Differenz aktueller Füllstand zum max. Füllstand Reserve; Ausbringung Wasseraufbereitung 20 % - 100 %); keine Schaltzyklen in 24 h	19
Abbildung 9: Darstellung des Mess- und Regelkreises (Algorithmus 4)	20
Abbildung 10: Reservenfüllstand und Schaltzyklen als Vergleich zu Algorithmus 4, 24 Schaltzyklen in 24 h.....	21
Abbildung 11: Reservenfüllstand und Schaltzyklen basierend auf aktuellem täglichem Maximalstundenmittel (Algorithmus 4), sieben Schaltzyklen in 24 h.....	21
Abbildung 12: RO-Reservetank, mit Umschaltung zwischen Stellgrößenalgorithmus (Block b1) und PI-Regler.....	25
Abbildung 13: Übergang Simulation nach fünf Wochen von 80 % Ganglinie auf 100 %.....	25
Abbildung 14: Simulation in den Wochen 14 und 15 bei 80 % Wochengang.....	26
Abbildung 15: Stellgrößenverlauf als Ergebnis der 16-wöchigen Anpassung des Stellgrößenalgorithmus	26
Abbildung 16: Zunehmend bessere Anpassung der Schätzung des Wasserbedarfs durch den Baustein b1 (rote Linie) an den Wasserbedarf (blaue Linie)	26
Abbildung 17: Minimierung Differenz Bedarf zur Wasserbereitstellung als Tagesmittelwert (rote Kurve)	27
Abbildung 18: Kumulierte Differenzen (grüne Kurve) dargestellt über der Anpassungszeit des Reglers	27
Abbildung 19: Veränderung der Leitfähigkeit in Abhängigkeit der eingestellten Ausbringung.....	29
Abbildung 20: Spezifischer Energiebedarf in Abhängigkeit der eingestellten Ausbringung Versuchsanlage 1,5 m ³ /h	30
Abbildung 21: Spezifischer Energiebedarf in Abhängigkeit der eingestellten Ausbringung, Hochrechnung Anlage 10 m ³ /h.....	32
Abbildung 22: Übersicht Gesamtmodell (Zeitpunkt t = 1,27 d)	36
Abbildung 23: Modell der Maischpfanne beim Einmaischn (Zeitpunkt t = 1,27 d)	37
Abbildung 24: Maischesteuerung	37
Abbildung 25: Modell mit Eiswassertank und Würzekühler (Zeitpunkt t = 1,27 d).....	38
Abbildung 26: Modell von Eiswassertank und Eiswasserkühler (Zeitpunkt t = 1,27 d).....	38

Abbildung 27: Zeitverläufe beim Einmischen und Sudplan für eine Woche (Montag – Sonntag) ...	39
Abbildung 28: Produktströme zwischen den Sudgefäßen (Montag – Dienstag)	39
Abbildung 29: Eiswassertank (Montag-Dienstag).....	40
Abbildung 30: Zu- und Ablauf des Frischwassertanks (Montag bis Freitag)	40
Abbildung 31: Volumen vom Frisch- und Warmwassertank (Montag-Dienstag)	40
Abbildung 32: Leistungsaufnahme WA bei verschiedenen Algorithmen, Hochrechnung Anlage 10 m ³ /h	47
Abbildung A1: Grundriss der Beispielbrauerei.....	52
Abbildung A2: Zeitbezogener Wasserbedarf - CIP (Teil I, Sudhaus) mit WPF = Würzepfanne	53
Abbildung A3: Zeitbezogener Wasserbedarf – CIP (Teil II, Sudhaus)	53
Abbildung A4: Zeitbezogener Wasserbedarf - Filtration	53
Abbildung A5: Zeitbezogener Wasserbedarf - Abfüllung	54
Abbildung A6: Zeitbezogener Wasserbedarf - CIP (Teil III).....	54
Abbildung A7: Modell vom Läuterbottich.....	55
Abbildung A8: Steuerung Läuterbottich.....	56
Abbildung A9: Zeitverläufe vom Läuterbottich (Montag – Dienstag)	57

III. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Beispielbetrieb - Produktportfolio und spezifischer Frischwasserbedarf.....	10
Tabelle 2: Elektrische Leistung und spezifischer elektrischer Energiebedarf.....	31
Tabelle 3: Zusammenstellung Ausbeute, Basis 146 m ³ /Tag und WA 10 m ³ /h.....	46
Tabelle 4: Zusammenfassung Einsparpotential Wasser und elektrische Energie, WA 10 m ³ /h	48
Tabelle A1: Rohwasserqualität Beispielbrauerei (Stadtwasser) bzw. am Standort der VA (Brunnenwasser nach Enteisenung / Entmanganung) im Vergleich zu den Anforderungen für Brau- bzw. Betriebswasser	58
Tabelle A2: Beispielbetrieb - Zusammenfassung der Betriebsdatenerfassung für den Rohstoff Wasser.....	58
Tabelle A3: Theoretischer Wasserbedarf - Sudhaus Teil I	59
Tabelle A4: Theoretischer Wasserbedarf - Sudhaus Teil II	59
Tabelle A5: Theoretischer Wasserbedarf - CIP (gesamt)	60
Tabelle A6: Theoretischer Wasserbedarf - Filtration	60
Tabelle A7: Theoretischer Wasserbedarf - Abfüllung	61

IV. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AD-Wandler	Analog-Digital-Wandler
BDE	Betriebsdatenerfassung
DA-Wandler	Digital-Analog-Wandler
D-Regler	differenzierender Regler
CIP	Cleaning in Place
EW(T)	Eiswasser(tank)
FlaReiMa	Flaschenreinigungsmaschine
FU	Frequenzumrichter
FuE	Forschung und Entwicklung
FW(T)	Frischwasser(tank)
HD-Pumpe	Hochdruckpumpe
I-Regler	integrierender Regler
LB	Läuterbottich
MB	Maischbottich
MBPF	Maischbottichpfanne
MSR	Messen, Steuern, Regeln
PC	Personal Computer
P-Regler	Proportionalregler
PWT	Plattenwärmeübertrager
RI-Fließbild	Rohrleitungs- und Installationsfließbild
RO	Reverse Osmosis (= Umkehrosmose)
SCADA	Supervising Control and Data Acquisition
SIP	Sanitation in Place
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
(ü)	Überdruck
UO	Umkehrosmose
VA	Versuchsanlage
VB	Verkaufsbier
VT	Vorlauftank
WA	Wasseraufbereitung
WHP	Whirlpool
WPF	Würzpfanne
WW	Warmwasser
ZKT	Zylindrokönischer (Gär-)Tank

V. ZUSAMMENFASSUNG

Um Wasserverluste durch das häufige An- und Abfahren von Umkehrosmoseanlagen (UO) zur Wasseraufbereitung in Brauereien zu vermeiden, sollten die Anlagen mit flexibler Ausbringung betrieben werden. Damit einher geht eine weitergehende Nutzung des Reservevolumens. Aus Gründen der Versorgungssicherheit ist es wichtig, den Wasserbedarf in der nahen Zukunft ausreichend genau quantifizieren zu können, um diese Information in die Steuerung der Ausbringung der Wasseraufbereitung mit einzubringen.

Im vorliegenden, von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 32155-01 geförderten Kooperationsprojekt der Partner EUWA, Thorsis, VLB Berlin und der Hochschule Fulda werden zunächst in einer beispielhaft ausgewählten klein- und mittelständischen Brauerei die wesentlichen Wasserströme ermittelt und in ihrem zeitlichen Verlauf erfasst. Unter Zuhilfenahme einer vorgenommenen Priorisierung gelingt es, die wichtigsten Wasserströme zu identifizieren und den Wasserbedarf in Form einer Ganglinie durch Aufsummieren der relevanten Verbraucher darzustellen. Somit ist es einerseits möglich, die Größe der Wasseraufbereitung mit der Reserve in Beziehung zu setzen. Andererseits kann über verschiedene angewandte Algorithmen zur Steuerung der Ausbringung der Wasseraufbereitung die Anzahl der täglichen Schaltzyklen mit den dazugehörigen wasserintensiven An- und Abfahrphasen zunächst von zehn (Algorithmus 1, An-Aus-Betrieb) auf drei (Algorithmus 2, Nutzung der Flexibilität der Umkehrosmose) bis auf Null (Algorithmus 3, zusätzliche Bedarfsprognose rollierend über 90 min) gesenkt werden. Mit Hilfe eines dem Algorithmus 3 vergleichbaren Ansatzes (Algorithmus 4) lassen sich unter sonst ungünstigeren Voraussetzungen (größere Wasseraufbereitung bei kleinerer Wasserreserve) die erforderlichen Schaltzyklen von 24 auf sieben verringern. Grundsätzlich ist es möglich und ratsam, die Regelung für die Umkehrosmose über eine softwarebasierte Regleroptimierung noch zu verbessern, um einen gleichmäßigen, aber auch variablen Betrieb zu gewährleisten. Die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten werden eingehend dargestellt.

Versuche mit einer UO-Versuchsanlage im 1,5-m³/h-Maßstab zeigen, dass eine Spreizung der Ausbringung im Bereich von 20 % bis 100 % der Nennausbringung machbar ist. Bei den Ausbringungen im unteren Teil des Regelbereichs ist auf die sich verschlechternde Permeatqualität durch den niedrigeren Wasserflux zu achten und ggf. durch Abschaltung von Membranfläche gegenzusteuern. Insgesamt ist eine einfache und robuste Fahrweise möglich. Energetisch wirkt sich ein Teillastbetrieb durch die geringere benötigte transmembrane Druckdifferenz positiv aus.

Unter Berücksichtigung einer typischen Tagesganglinie steigt die Nettoausbeute der Anlage durch die Flexibilisierung der Wasseraufbereitung von 86,5 % auf 90,4 %, was einer Verringerung des Abwassers um knapp 30 % entspricht. Darüber hinaus gelingt es, den durchschnittlichen elektrischen Energiebedarf von 0,42 kWh/m³ auf 0,35 kWh/m³ und damit um 17 % zu senken.

Die für die Bedarfsprognose wichtige Rückkopplung aus dem Prozess beschränkt sich durch die durchgeführte Bedarfspriorisierung auf eine begrenzte Anzahl von Informationen aus der Betriebsdatenerfassung und der Produktionsplanung. Allerdings stellt die automatische Bereitstellung dieser Informationen bei klein- und mittelständischen Brauereien noch häufig ein Problem dar. Hier ist es zukünftig wichtig, Schnittstellen genau zu definieren und zu implementieren. Abschließend wird eine am Beispiel des Sudhauses durchgeführte Komplettsimulation mit Produkt- und Energieströmen vorgestellt. Hierdurch ergeben sich nochmals deutlich erweiterte Möglichkeiten der Optimierung des Prozesses hinsichtlich der Verbrauchsdaten. Allerdings ist der erforderliche Implementierungsaufwand für eine komplette Simulation des gesamten Betriebes erheblich und daher derzeit kaum mit vertretbarem Aufwand umzusetzen.

VI. EINLEITUNG

Ausgangssituation

Die Notwendigkeit des schonenden Umgangs mit Wasser ist heutzutage vor dem Hintergrund stetig steigender Bereitstellungs- und Entsorgungskosten innerhalb der Brau- und Getränkeindustrie als ein wesentliches Merkmal einer wirtschaftlichen und ökologischen Betriebsweise allgemein anerkannt [Ahr04; DWA10, HKG08, GR11; Kun06, Mei06; Mei09, Sta03, WGP05]. In diesem Zusammenhang war und ist die detaillierte Evaluierung allgemeiner und prozessspezifischer Wasserverbräuche sowie die Entwicklung sinnvoller Strategien, Techniken und Technologien zur Minimierung der selbigen Gegenstand der Forschung [AiF14; BB13]. Den Angaben der Literatur [DWA10] entsprechend wird der Frischwasserverbrauch einer Brauerei maßgeblich durch die Betriebsgröße, die Ausstoßverteilung, die verwendete Technik und Technologie sowie das Sortiment beeinflusst. Bezogen auf einzelne Produktionsabschnitte in einer Brauerei sind die entscheidenden Verbräuche mit > 50 % des Gesamtwasserbedarfs in den Bereichen Sudhaus und Abfüllung lokalisiert, gefolgt von Reinigungs- & CIP-Prozessen, den Bereichen Filtration, Gär- bzw. Lagerkeller sowie der Frisch- und Brauwasseraufbereitung [Ahr04; DWA10; HKG08; Kun07; Kun06; Sta03]. In der Vergangenheit wurden verschiedene Ansätze entwickelt, den spezifischen Wasserverbrauch in Brauereien durch ein gezieltes Wassermanagement zu senken. Neben dem Wiedereinsatz ausgewählter, teils im Vorfeld u.a. mit Membranverfahren aufbereiteter Brauchwasserteilströme [GR11; Kun06; KA05; KA04; Mom07; SK00; VRG11] können die größten Einsparungen zumeist durch die verfahrenstechnische Optimierung der in den jeweiligen Produktionsbereichen vorhandenen Anlagen realisiert werden [Ahr04; DWA10; Kun07; Kun06; Sch93; Sta03; Unt99].

In den letzten Jahrzehnten sind erhebliche Anstrengungen unternommen worden, die Medienversorgung in der Lebensmittelindustrie und damit auch in Brauereien effizienter und hinsichtlich des Ressourcenbedarfs sparsamer zu gestalten. Dieser Umstand wird bezogen auf die Wasseraufbereitung am Beispiel der weitverbreiteten Umkehrosmose (UO) in Form der Ausbeuteerhöhung durch die Zugabe von Antiscalants sowie der Herabsetzung des Energiebedarfs durch die Entwicklung von Low-Pressure-Modulen sehr gut wiedergegeben. UO-Membrananlagen zur Wasseraufbereitung laufen im normalen Betrieb effizient und ressourcenschonend. Der aktuelle Stand der Technik basiert auf der Anwendung von Polyamid basierten Flachmembranen, die in Form von Wickelmodulen im Druckbereich von 7 bis 15 bar flächenbezogene Durchflüsse von 25 bis 30 L / (m²*h) ermöglichen [GM09; SE12].

Bezogen auf die Ausbringung sind Umkehrosmoseanlagen allerdings auf die Abdeckung von Spitzenproduktionsphasen, wie sie in Brauereien typischerweise saisonal im Sommer und darüber hinaus innerhalb einer Produktionswoche in der Mitte des Wochengangs auftreten, ausgelegt. Zusätzlich wird aus Gründen der Versorgungssicherheit das aufbereitete Wasser in einer Reserve bevorratet, die nahe 100 % Füllstand gefahren wird. Da Umkehrosmoseanlagen dem Stand der Technik entsprechend mit einer fest eingestellten Permeatausbringung betrieben werden, die sich an der zuvor beschriebenen Betriebssituation orientiert, können diese in Phasen schwankender Produktion nur unzureichend dem tatsächlichen momentanen Wasserbedarf angepasst werden. Dies hat zur Folge, dass Umkehrosmoseanlagen häufig an- und abgefahren werden. Aus technologischer Sicht ist sowohl beim An- als auch beim Abfahren der Anlagen das Spülen der Module vor dem Hintergrund des Verdrängens von Luft beim Anfahren bzw. von Konzentrat beim Abfahren zur Vorbeugung von Scaling unumgänglich, was zu erheblichen Wasserverlusten führt.

Viele klein- und mittelständische Brauereien verfügen über Betriebsdatenerfassungssysteme (BDEs). Die gesammelten Daten dienen der Protokollierung und Nachweisführung. Sie erlauben im Nachgang z.B. eine Beurteilung der Effizienz von Teilprozessen der Brauerei und können somit auch Ansatzpunkte für die Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen geben. Allerdings werden diese Informationen bislang nur in geringem Maße zur unmittelbaren Koordination und Optimierung verschiedener Produktionsbereiche einer Brauerei genutzt.

Zielsetzung

Ließen sich unter präziser Vorhersage des in den kommenden Betriebsstunden zu erwartenden Wasserbedarfs UO-Anlagen hinsichtlich ihrer Ausbringung hydraulisch anpassen, könnte in Phasen geringeren Bedarfs unter optimaler Ausnutzung der Wasserreserve nicht nur die Anzahl der An- und Abfahrzyklen, sondern auch bei gleicher zur Verfügung stehender Membranfläche im Hinblick auf einen geringeren erforderlichen Transmembrandruck der Energiebedarf minimiert werden. An beiden Punkten, der mangelnden hydraulischen Flexibilität von UO-Anlagen sowie der ungenauen, nicht permanent aktualisierten Bedarfsprognose für Frischwasser (FW), setzt das vorliegende Projekt an.

Der zugrunde liegende Ansatz der Erhöhung der hydraulischen Flexibilität von UO-Anlagen kombiniert mit einer abgesicherten Prognose des kurzfristigen Wasserbedarfs lässt sich auch auf andere wasserintensive Betriebe nicht nur im Lebensmittelbereich anwenden. Das Vorhaben hat daher modellhaften Charakter.

Aufgabenstellung

Entsprechend der Zielstellung gliedert sich das Vorhaben in die nachstehend aufgeführten Projektphasen:

- *Bestandsaufnahme Beispielbetrieb*
- *Bedarfspriorisierung*
- *Stellgrößenalgorithmus Wasseraufbereitung*
- *Regloptimierung durch Simulationssoftware*
- *Pilotversuche Flexibilisierung RO*
- *Implementierung Simulation*

Im beantragten Projekt soll ausgehend von aktuellen Betriebsdaten eine Prognose zum zukünftigen Wasserbedarf berechnet werden. Dabei sollen alle Informationen und Vorgaben, die den zukünftigen Wasserbedarf beeinflussen, wie Sudplan und Sudfortschritt einer Woche genauso wie Abfüllungsplan und –fortschritt als Eingangsgrößen Berücksichtigung finden, um den Wasserbedarf einer Brauerei möglichst präzise für die kommenden Stunden prognostizieren zu können.

Es existieren bereits Ansätze, die dazu genutzt werden können, die Ausbringung einer UO-Anlage flexibler zu gestalten. Diese Ansätze sollen konsequent und vor allen Dingen gemeinsam eingesetzt werden, um eine maximale Flexibilisierung der Ausbringung zu erzielen. Erst das Zusammenspiel der Einzelmaßnahmen erlaubt die Anpassung der Ausbringung in einem weiten hydraulischen

Bereich, der notwendig ist, um die eingangs geschilderten Vorteile eines weitgehend kontinuierlichen Betriebes voll auszunutzen. Zu diesen Maßnahmen zählen:

- Einführung einer regelbaren Konzentratzirkulation, evtl. nur für die letzte Bank,
- Zu- und Abschaltung einzelner Druckrohre oder Bänke,
- ggf. Verwendung von regelbarer Boosterpumpen vor den hinteren Bänken oder Verwendung der Konzentratentspannung zur Erhöhung des Drucks vor den hinteren Bänken.

Wesentliches Ziel ist die Erreichung eines möglichst großen Ausbringungsbereichs mit möglichst wenigen und einfachen apparativen Maßnahmen unter Berücksichtigung der Minimierung des elektrischen Energiebedarfs.

VII. HAUPTTEIL

1. ARBEITSSCHRITTE, METHODEN, ERGEBNISSE

1.1 Bestandsaufnahme Beispielbetrieb

1.1.1 Allgemeine Beschreibung des Betriebes

Bei dem ausgewählten Beispielbetrieb handelt es sich um eine mittelständische Brauerei mit einer Jahresproduktion von **ca. 80.000 Hektoliter (hL) Verkaufsbier (VB)**, wobei ca. 75% der Ausstoßmenge vor Ort hergestellt und ca. 25% als Fremdleistung lediglich auf die 0,5-Liter-NRW-Flasche abgefüllt werden. In dem Unternehmen werden ausschließlich **untergärige Biersorten** hergestellt, wobei die prozentuale Ausstoßverteilung zwischen Pilsener Bier, hellem Vollbier und Bockbier 83 zu 6 zu 11 beträgt (Tab. 1).

Tabelle 1: Beispielbetrieb - Produktportfolio und spezifischer Frischwasserbedarf

Position:	Beschreibung	Einheit	Wert
1)	Gesamtmenge VB	[hL]	78000
2)	Produktportfolio:		
2.1)	Pils	[hL]	49000
2.2)	Edel	[hL]	3200
2.3)	Bock	[hL]	6500
3)	Verbrauch FW	[m ³]	36000
4)	spez. Frischwasserbedarf	[hL/ hL VB]	4,62

Der jährliche Frischwasserbedarf in Form von Stadtwasser beziffert sich auf **36.000 m³**, sodass für den Zeitraum des vorliegenden F&E-Vorhabens ein rechnerischer Frischwasserbedarf von **4,62 hL/ hL VB** resultiert. Für sämtliche Prozesse innerhalb der Produktion wird eine Wasserqualität (Stadtwasser) eingesetzt. Wesentliche Analysewerte des eingesetzten Stadtwassers im Vergleich zu den üblichen Anforderungen für Brau- und Betriebswasser finden sich im Anhang (Tab. A1). Ein direkter Wiedereinsatz bzw. ein Recycling von gebrauchten Wässern findet nicht statt.

Das Sudhaus ist **einstraßig** und basiert auf einem **5-Geräte-Sudwerk**. Neben Maisch- und Läuterbottich, Vorlagegefäß, Würzepfanne und Whirlpool sind ein Glattwassertank und eine Sauergutanlage installiert. In 24 Stunden können **8 Sude** umgesetzt werden. Die durchschnittliche Ausschlagwürzmenge pro Sud beträgt **53 hL**. Sie wird in einem Plattenwärmeübertrager gegen Eiswasser von 4°C auf 10°C Anstelltemperatur herabgekühlt.

Der sich an das Sudhaus anschließende Gärkeller beinhaltet **12 zylindrokonische Tanks (ZKT)**, jeweils mit einem Volumen von 520 hL. Die maximale Belegung der ZKTs beträgt **8 Sude**.

Die Filtration des Bieres erfolgt zweistufig auf der Basis eines Kieselgurrahmenfilters mit nachgeschalteter Sterilfiltration.

Das für die Abfüllung zu bevorratende Filtrat wird in **2 Drucktanks** mit einem Volumen von **337 hL** und **2 Drucktanks** mit einem Volumen von **460 hL** gelagert.

Die Abfüllung des Bieres erfolgt auf die **0,5-Liter-NRW-Flasche** als **Mehrweggebinde** mit den assoziierten Aggregaten:

- a) Entpallettierer

- b) Kastenwascher
- c) Ein-End-Flaschenreinigungsmaschine
- d) Leergutinspektor
- e) Füller (**Nennleistung max.= 20.000 Flaschen/ h**)
- f) Etikettierer
- g) Vollgutinspektor
- h) Pallettierer

Abbildung A1 des Anhangs bildet die Brauerei in Form eines vereinfachten Grundrisses ab.

1.1.2 Beschreibung der Betriebsdatenerfassung (BDE) für den Rohstoff Wasser

Für den Rohstoff Wasser und für die entsprechend in den verschiedenen Produktionsbereichen anfallenden Verbräuche erfolgt zum jetzigen Zeitpunkt **keine** automatisierte und zeitbezogen lückenlose Dokumentation in der BDE. Entsprechend Tabelle A2 des Anhangs sind in dem Beispielbetrieb lediglich zwei mechanische Wasserzähler im Wasserhaus und in der Abfüllung im Bereich der Flaschenreinigungsmaschine (FlaReiMa) installiert. Für beide Zähler liegt keine direkte Anbindung an die BDE vor. Bedarfsweise und visuell erfasst werden in diesem Zusammenhang der Gesamtwasserbedarf des Beispielbetriebs sowie der Wasserbedarf der Flaschenreinigungsmaschine. Alle anderen produktionsbereichsbezogenen und prozessspezifischen Wasserbedarfe wurden daher auf der Grundlage von Prozessvorgaben (CIP), von Rezepturen (Sudhaus) und von Ergebnissen der direkten Dokumentation des Prozessverlaufs kalkulatorisch erhoben.

Theoretischer Wasserbedarf – Sudhaus

Exklusive des Wasseranteils für automatisierte Reinigungs- und Desinfektionsverfahren, kurz CIP (Cleaning in Place) genannt, basiert der theoretische Wasserbedarf des Sudhauses auf:

- a) **Frischwasser (FW)**, das für den Hauptguss (Einmaischen) und für die Nachgüsse (Läutern) mit Heißwasser (HW) verschnitten und
- b) **Eiswasser (EW)**, das zum Abkühlen der Ausschlagwürze auf Anstelltemperatur benötigt wird.

Der für die Haupt- und Nachgüsse benötigte Heißwasseranteil ist **bilanzneutral**, da es sich dabei um Eiswasser handelt, das die entsprechend abzuführende Wärmemenge der Ausschlagwürze während der Würzekühlung aufgenommen hat. Die theoretischen Bedarfe für Frisch- und Heißwasser sowie sudbezogen für Eiswasser können den Tabellen A3 und A4 des Anhangs entnommen werden.

Theoretischer Wasserbedarf – Gärung

Im Gärkeller wird Frischwasser überwiegend für den Ausschub von in Rohrleitungen verbliebenem Unfiltrat und zur Beschwallung von Oberflächen außerhalb der ZKTs (**zylindrokonische Tanks**) eingesetzt. Dieser Wasserbedarf wird i.d.R., so auch im Beispielbetrieb, **nicht** quantifiziert. Des Weiteren erfolgt der Einsatz von Wasser zur Vor-, Zwischen- und Nachspülung der Innenflächen von ZKTs sowie assoziiert von Rohrleitungen auf der Basis automatisierter Reinigungs- / ggf. assoziierter Desinfektionsprozesse (CIP/SIP). In diesem Zusammenhang konnte anteilig auf Prozessvorgaben zur Reinigung von ZKTs zurückgegriffen werden (s. Tab. A5 im Anhang).

Theoretischer Wasserbedarf – Filtration

Die Vor- und Nachbereitung des jeweils in einer Brauerei implementierten **Filtrationssystem**s zur weiterführenden **Klärung** des Bieres bedingt den Einsatz von Wasser. In dem ausgewählten Beispielbetrieb wird 80grädiges Heißwasser zur thermischen Desinfektion des Filtrationssystems im Vorfeld des Filtrationsprozesses eingesetzt. Anschließend wird der Filter mit Stadtwasser auf ca. 20°C herabgekühlt. Beide Teilschritte werden „verloren“ gefahren, d.h. die jeweiligen Volumenströme werden im Anschluss in die Kanalisation eingeleitet. Im weiteren Prozessverlauf erfolgt das Einschwemmen des Filtrationshilfsmittels Kieselgur in Form einer sogenannten Voranschwemmung und parallel zum Unfiltrat als kontinuierliche Dosage. In diesem Zusammenhang ist die Kieselgur in einem Vorlagegefäß zunächst mit Wasser auszumischen. Zum Abschluss des Filtrationsprozesses wird mit Wasser

- a) das im Filter anstehende Restbier ausgeschoben,
- b) der Sterilfilter rückgespült und
- c) die in den Rahmenfilter eingebrachte Kieselgur ausgetragen.

Die für die oben stehend beschriebenen Teilschritte benötigten Wassermengen werden zusammenfassend in Tabelle A6 des Anhangs wiedergegeben.

Theoretischer Wasserbedarf – Abfüllung

Wie bereits beschrieben sind in dem Beispielbetrieb lediglich zwei mechanische Wasserzähler im Wasserhaus und in der Abfüllung im Bereich der Flaschenreinigungsmaschine installiert, sodass bedarfsweise der Gesamtwasserbedarf des Beispielbetriebs sowie der Wasserbedarf der Flaschenreinigungsmaschine erfasst werden kann.

Den Angaben der Literatur entsprechend sind in einer Brauerei bei Abfüllung des Bieres auf Glasmehrweggebinde im Flaschenkeller in Bezug auf Kaltwasser die Flaschenreinigungsmaschine (ca. 40%), der Kastenwascher (ca. 16%) und die Bandschmierung (ca. 6%) als wesentliche Verbraucher zu nennen. Mit Kenntnis des Wasserbedarfs der Flaschenreinigungsmaschine des Beispielbetriebs wurde zunächst der theoretische Gesamtkaltwasserbedarf der Abfüllung ermittelt und anschließend die Bedarfe von Kastenwascher und Bandschmierung (s. Tab. A7 im Anhang).

Theoretischer Wasserbedarf – CIP

Tabelle A5 des Anhangs fasst im Hinblick auf Häufigkeit und Wasserbedarf produktionsbereichsübergreifend die wesentlichen automatisiert ausgeführten Reinigungsschritte zusammen.

1.2 Bedarfspriorisierung

Die zeitbezogene Darstellung des Wasserbedarfs exemplarisch für das Sudhaus zeigt Abbildung 1, für die verschiedenen weiteren Produktionsbereiche kann sie den Abbildungen A2 bis A6 des Anhangs entnommen werden.

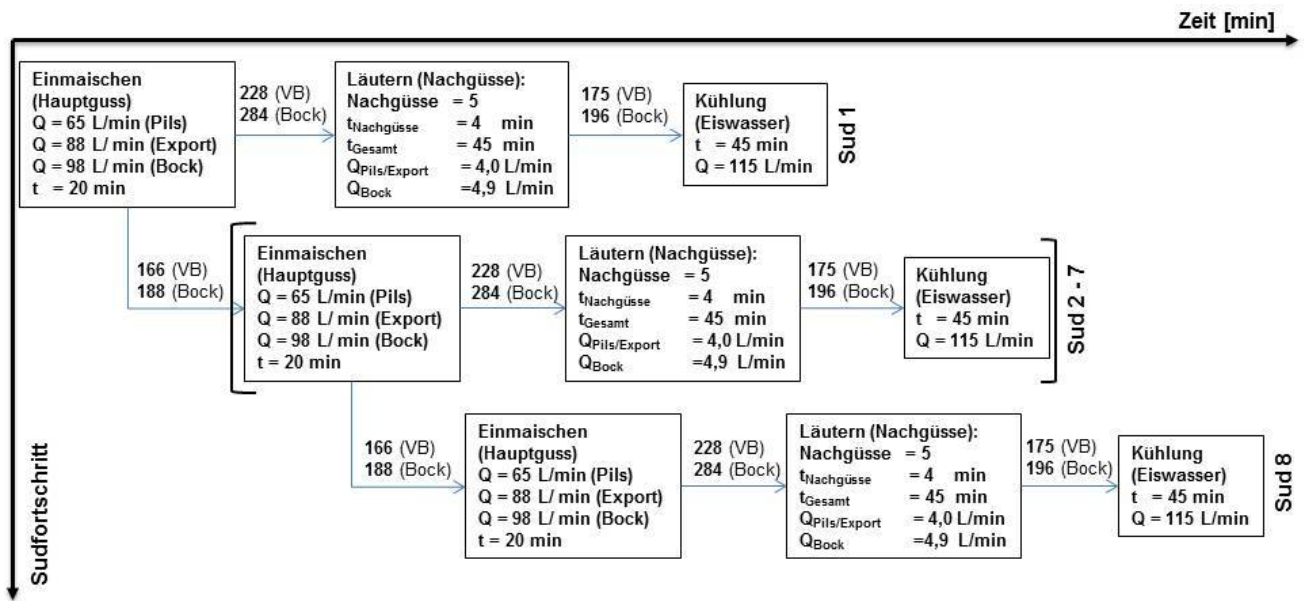


Abbildung 1: Zeitbezogener Wasserbedarf - Sudhaus

Den Angaben der Literatur [Sta03 u. Wal05] entsprechend sind in einer Brauerei bezogen auf die einzelnen Produktionsabschnitte die entscheidenden Verbräuche mit > 50 % des Gesamtwasserbedarfs in den Bereichen Sudhaus und Abfüllung lokalisiert, gefolgt von automatisierten Reinigungsprozessen (CIP), den Bereichen Filtration, Gär- bzw. Lagerkeller sowie der Frisch- und Brauwasseraufbereitung (s. Abb. 2).

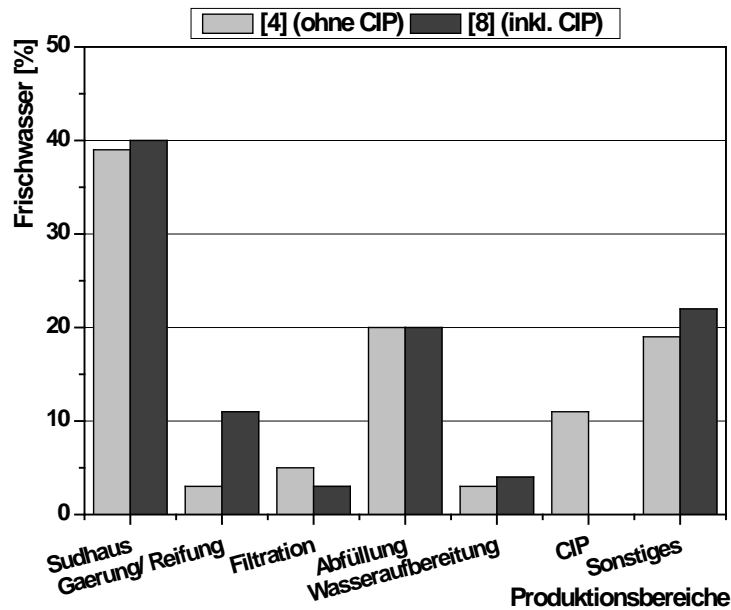


Abbildung 2: Theoretische Verteilung des Frischwassers in einer Brauerei

Die Bierherstellung kann, wie nachstehend formuliert, vereinfacht in fünf wesentliche Produktionsbereiche differenziert werden. Nach der Herstellung der Würze im **Sudhaus**, deren Vergärung zu Jungbier und dessen Reifung und erster Klärung im **Gär- und Lagerkeller** erfolgt über die Arbeitsschritte **Filtration, Drucktanklagerung und Abfüllung** die Fertigstellung des Bieres in einem verkaufsfähigen Gebinde.

In Abhängigkeit von Tankgröße und Tankanzahl spiegeln der Gär- und Lagerkeller sowie das Drucktanklager Kapazitätspuffer zwischen den Produktionsbereichen

- a) Sudhaus und Filtration (Gär- und Lagerkeller) sowie
- b) Filtration und Abfüllung (Drucktanklager) wider.

Wie bereits zuvor erwähnt basieren die Wasserbedarfe in den Bereichen Gär- und Lagerkeller sowie Drucktanklager einerseits auf der Notwendigkeit der Verdrängung von verbliebenem Unfiltrat und Filtrat in Rohrleitungen auf der Basis des Einsatzes von **Ausschubwasser** sowie andererseits der Reinigung und ggf. anschließenden Desinfektion von Tanks und assoziierten Leitungswegen in Form von:

- a) **Vorspülwässern** (zur Minimierung der Schmutzfracht),
- b) **Zwischenspülwässern**, zur Gewährleistung
 - b.1) der Phasentrennung zwischen alkalischen und sauren Reinigungsmedien und
 - b.2) der Vermeidung von Neutralisationsreaktionen und assoziiertem Verlust der Reinigungswirkung und
- c) **Nachspülwässern** (zur Gewährleistung der Rückstandsfreiheit).

Schlussfolgernd sind diese Bedarfe innerhalb einer Priorisierung als **tertiär bis quartär** einzustufen. **Primär** sollten mit der Wasserversorgung in einer Brauerei die Bedarfe der Produktionsbereiche Sudhaus und Abfüllung sichergestellt werden, **sekundär**, aufgrund der Schnittstellenfunktion, der Wasserbedarf im Produktionsbereich Filtration (s. Abb. 3).

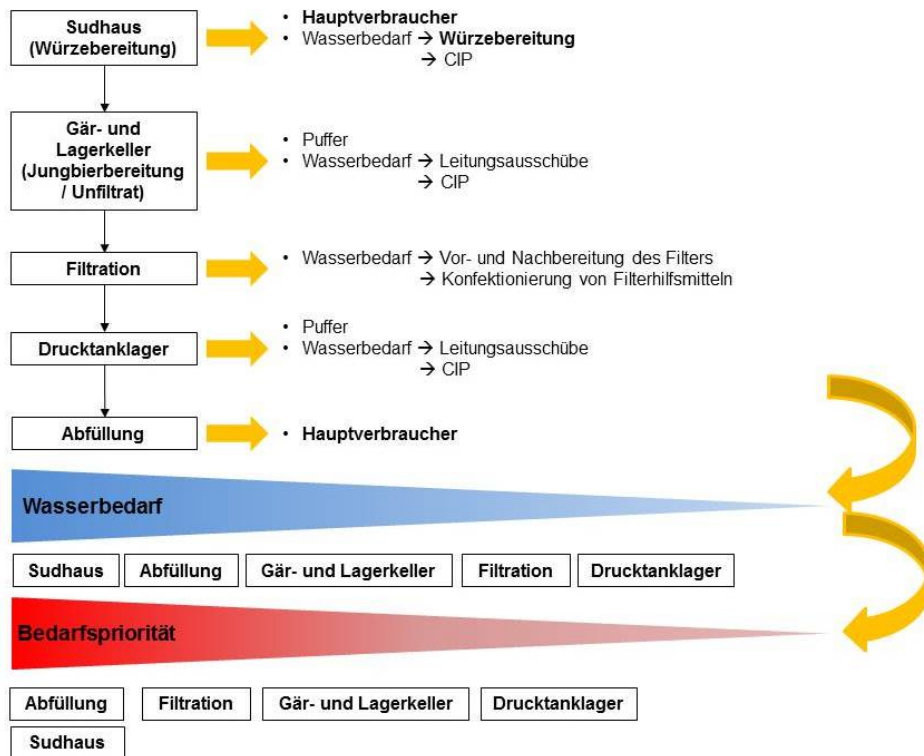


Abbildung 3: Priorisierung des Wasserbedarfs in einer Brauerei nach Produktionsbereichen

1.3 Stellgrößenalgorithmus Wasseraufbereitung

Im Zentrum der folgenden Betrachtungen zur Erstellung eines Stellgrößenalgorithmus steht aus Gründen der Priorisierung der Versorgungssicherheit der Frischwasserbedarfsverlauf über einen Tag mit maximaler Produktion (Worst-Case-Szenario Tagesgang), wie er für die Beispielbrauerei in Abbildung 4 dargestellt ist.

Es werden im Folgenden verschiedene Strategien zur Implementierung eines Stellgrößenalgorithmus für die Ausbringung der Wasseraufbereitung mit steigendem Aufwand vergleichend betrachtet:

- Ein-Aus-Fahrweise Wasseraufbereitung mit 100 % Ausbringung, Abhängigkeit zur Reservengröße (→ **Algorithmus 1**)
- Flexible Fahrweise Wasseraufbereitung ohne Bedarfsprognose (→ **Algorithmus 2**)
- Flexible Fahrweise Wasseraufbereitung mit rollierender Bedarfsprognose 90 min (→ **Algorithmus 3**)
- Flexible Fahrweise Wasseraufbereitung basierend auf aktuellem, täglichem Maximalstundenmittel (→ **Algorithmus 4**)

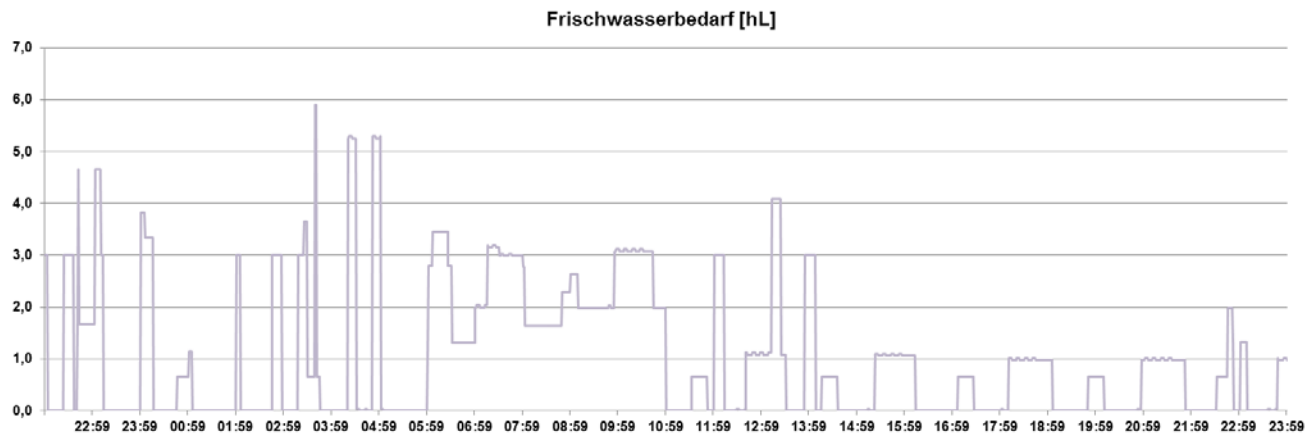


Abbildung 4: Tagesgang des Gesamtfrischwasserbedarfs des Beispielbetriebs bei max. Produktion (Worst-Case-Szenario, insgesamt 146 m^3 in 24 h, durchschnittlich $6,1 \text{ m}^3/\text{h}$)

1.3.1 Algorithmus 1: Ein-Aus-Fahrweise WA und Relation zur Reservegröße

Die Größe der Wasserreserve und die Auslegung der Wasseraufbereitungsanlage (WA) bedingen sich gegenseitig und verhalten sich gegenläufig. So kann eine kleinere Reserve durch eine größere Wasseraufbereitungsanlage und umgedreht innerhalb gewisser Grenzen ausgeglichen werden (s. Abb. 5). Entscheidend ist hierbei, dass die Reserve Unterschiede zwischen der maximalen Ausbringung der Wasseraufbereitung und dem maximalen Wasserbedarf innerhalb eines Tages sicher ausgleichen kann und so ein Leerlaufen der Reserve sicher verhindert wird.

Eine häufig gewählte Auslegung von Wasseraufbereitungsanlagen orientiert sich an der Größe der maximalen Sudhauskapazität und dem Jahresausstoß. Legt man dieses Prinzip auch bei der Beispielbrauerei zugrunde, so errechnet sich die Größe der Wasseraufbereitung mit $10 \text{ m}^3/\text{h}$ (ggf. aufgeteilt in $3 \text{ m}^3/\text{h}$ Brauwasser und $7 \text{ m}^3/\text{h}$ Betriebswasser; Variante A in Abb. 5). Unter Berücksichtigung der in Abbildung 4 dargestellten Tagesganglinie wäre eine Reserve mit 300 hL ausreichend. Die Wasserreserve würde über die Woche einen minimalen Füllstand von 15 % nicht unterschreiten (s. Variante A in Abb. 5 → durchgezogene Linie). Geht man von einer kleineren Reserve von nur 200 hL aus, wie sie in der Beispielbrauerei vorhanden ist, so wäre die Größe der Wasseraufbereitung mit $18 \text{ m}^3/\text{h}$ zu wählen (s. Variante B in Abb. 5 → gestrichelte Linie). Die damit einhergehende erhöhte Versorgungssicherheit – der minimale Reservenfüllstand liegt in diesem Fall über 75 % - bedingt allerdings erhöhte Wasserverluste durch eine größere Anzahl von Schaltzyklen in 24 h. Diese ergeben sich aus den festen Schaltpunkten (Einschalten der Anlage bei $< 90 \%$ Reservenfüllstand; Abschalten bei $> 98 \%$ Reservenfüllstand) und aus dem Betrieb der Anlage mit 100 % Ausbringung ($10 \text{ m}^3/\text{h}$ bei Variante A bzw. im Fall von Variante B $18 \text{ m}^3/\text{h}$). Beide Varianten sind im weiteren Projektverlauf Gegenstand der Betrachtungen. Über den Produktionstag verteilt ergibt sich für diesen ersten Algorithmus für die $10\text{-m}^3/\text{h}$ -Anlage (Variante A) das folgende Bild (Abb. 6) mit in der Summe zehn Schaltzyklen in 24 h.

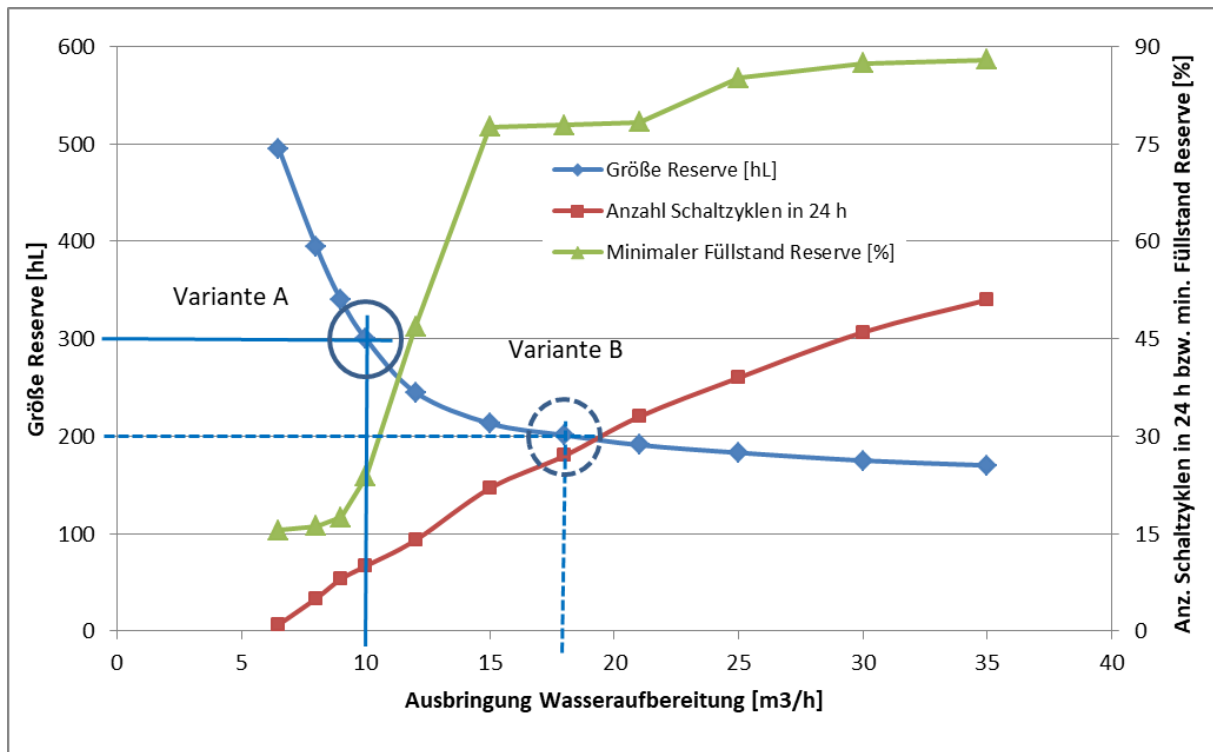


Abbildung 5: Größe der Reserve in Abhängigkeit der Größe der Wasseraufbereitungsanlage

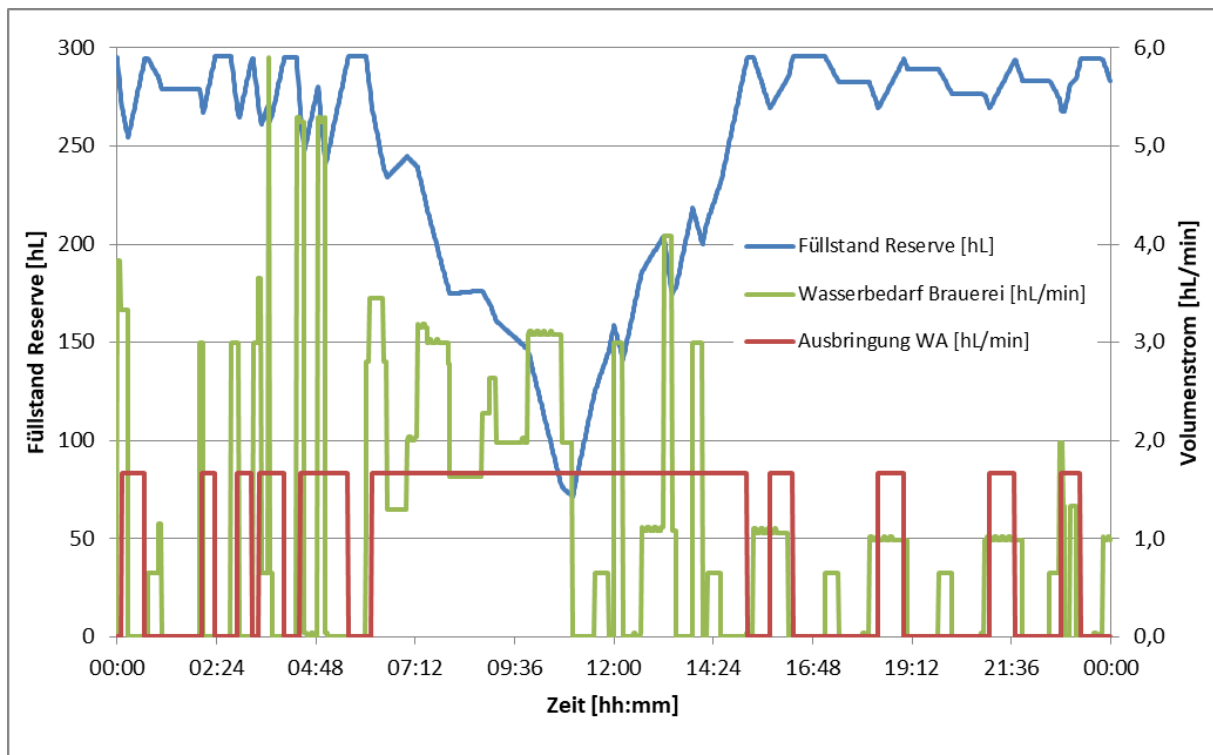


Abbildung 6: Tagesgang mit Algorithmus 1 (Schaltfunktion 90 % / 98 % mit konstanter Ausbringung Wasseraufbereitung 10 m³/h); zehn Schaltzyklen in 24 h

1.3.2 Algorithmus 2: Flexible Fahrweise WA ohne Bedarfsprognose

Als nächster Parameter zur Minimierung der Schaltzyklen wird die flexible Fahrweise der UO berücksichtigt. Zunächst unter der Annahme, dass die Umkehrosmose einen Ausbringungsbereich von 20 – 100 % durch die angedachten und in Kapitel 1.5 getesteten Modifikationen abdecken kann, ergibt sich das in Abbildung 7 dargestellte Bild. Leitgröße für den zugrunde liegenden Algorithmus 2 ist die Abweichung des aktuellen Reservefüllstandes zur vollen Reserve, wobei die Abweichung zusätzlich gewichtet wird. Vereinfacht bedeutet dieses, dass die Wasseraufbereitung, je voller die Reserve ist, in der Ausbringung zurückgenommen wird, und, je leerer diese ist, die Ausbringung überproportional steigt. Hierdurch lässt sich die Zahl der Schaltzyklen auf nur noch drei in 24 h verringern.

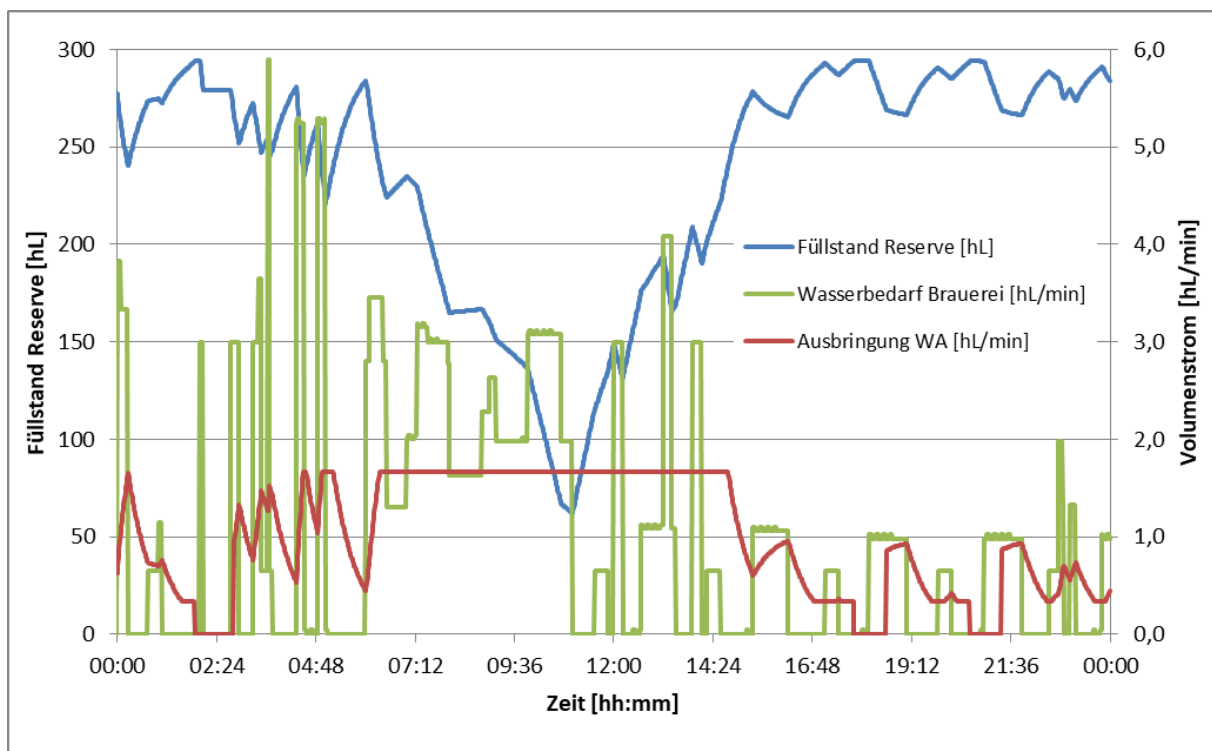


Abbildung 7: Tagesgang mit Algorithmus 2 (Leitgröße Abweichung aktueller Füllstand zum max. Füllstand Reserve; Ausbringung Wasseraufbereitung 20 % - 100 %); drei Schaltzyklen in 24 h

1.3.3 Algorithmus 3: Flexible Fahrweise WA mit rollierender Bedarfsprognose 90 min

Im Gegensatz zu Algorithmus 2 wird bei Algorithmus 3 zusätzlich der zukünftige Wasserbedarf über einen zeitlichen Horizont von 90 min rollierend in die Berechnung der Stellwertvorgabe für die Wasseraufbereitung mit einbezogen (Abb. 8). Der Bedarf in den kommenden 90 min gibt als primärer Parameter die Ausbringung der Wasseraufbereitung vor. Überlagert wird diese Vorlage durch den aktuellen Füllstand der Reserve als sekundären Parameter. Dieser wirkt sich dergestalt aus, dass bei einem hohen Füllstand (> 93 %) die Anlage bis zur Abschaltung bei 98 % immer mit minimaler Ausbringung von 20 % fährt, während bei niedrigem Füllstand (< 35 %) die Anlage immer mit maximaler Ausbringung von 100 % betrieben wird, und zwar unabhängig von der 90-minütigen Bedarfsprognose. Begrenzt ist die Ausbringung in jedem Fall durch die Vorgabe des Regelbereichs zwischen 20 % und 100 %. Durch diesen Algorithmus 3 läuft die Anlage bereits ohne

Unterbrechung 24 h durch; es fallen keine Wasserverluste durch Spülen beim An- und Abfahren der Anlage an. Da die Tagesganglinie der gesamten Brauerei auf der Summierung der Ganglinien der einzelnen Abteilungen und diese wiederum auf der Summe der einzelnen Anlagen mit Wasserverbrauch beruhen, kann die Ganglinie durch aktuelle Abfragung von Unterbrechungen (z.B. Sudhaus oder auch einzelne Linien der Abfüllung) mit begrenztem Aufwand der momentanen realen Situation und mit frei wählbarem Differenzierungsgrad angepasst werden.

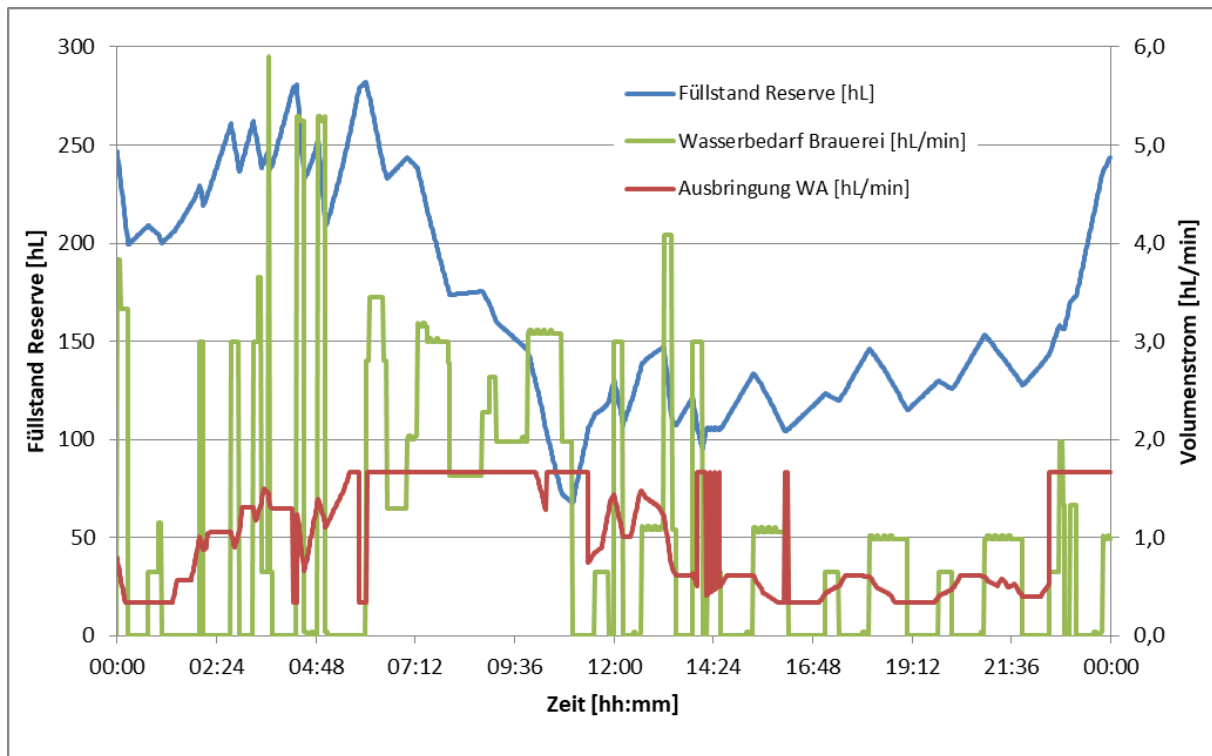


Abbildung 8: Tagesgang mit Algorithmus 3 (Leitgröße Bedarfsprognose 90 min rollierend, abgesichert durch Differenz aktueller Füllstand zum max. Füllstand Reserve; Ausbringung Wasseraufbereitung 20 % - 100 %); keine Schaltzyklen in 24 h

1.3.4 Algorithmus 4: Flexible Fahrweise Wasseraufbereitung basierend auf aktuellem, täglichem Maximalstundenmittel

Auf einem gegenüber Algorithmus 3 noch erweiterten Ansatz fußt Algorithmus 4, bei dem der theoretisch erwartete Wasserverbrauch mit dem realen kontinuierlich abgeglichen wird und die Differenz als Steuergröße Verwendung findet (s. Abb. 9). Für die Simulation wird auf eine kleinere Reserve von 200 hL, wie sie im Beispielbetrieb vorhanden ist, zurückgegriffen und eine damit korrespondierend größere Wasseraufbereitungsanlage von 18 m³/h angenommen.

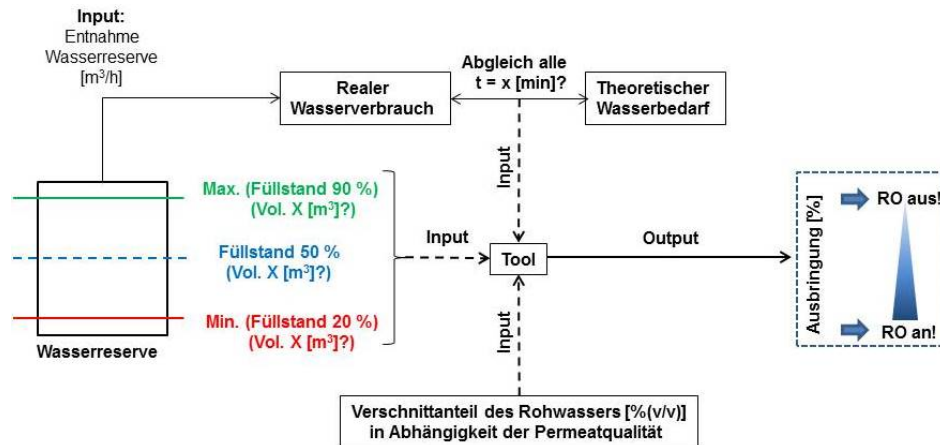


Abbildung 9: Darstellung des Mess- und Regelkreises (Algorithmus 4)

Abbildung 10 verdeutlicht die konventionelle Betriebsweise einer Umkehrosmoseanlage mit einer fest vorgegebenen Permeatausbringung von 3 hL/min entsprechend 18 m³/h. In Abhängigkeit des in der Abbildung oben stehenden Füllstandverlaufs der Reserve, wobei für die Inbetriebnahme der UO die Unterschreitung der Mindestfüllstands von 18 m³ als initiiierende und das Erreichen des maximalen Füllstands von 20 m³ als terminierende Regelgröße vorgegeben werden, resultiert ein intermittierender Betrieb mit 24 Intervallen. Hierzu im Gegensatz zeigt Abbildung 11 eine mögliche flexibilisierte Betriebsweise einer vergleichbaren Umkehrosmoseanlage, wobei im Hinblick auf die Betriebsbedingungen wie nachstehend formuliert

- a) als Ausgangsfüllstand der Reserve das tagesspezifische, maximale Stundenmittel des Wasserbedarfs festzulegen ist und
- b) die Permeatausbringung der Anlage flexibel zwischen 20% (0,6 hL/min) und 100% (3,0 hL/min) geregelt werden kann.

Für den in Bezug genommenen Tagesgang beträgt das maximale Stundenmittel des Frischwasserbedarfs 170 hL.

Die Einspeisung des Permeats und damit assoziiert die Permeatausbringung der Umkehrosmoseanlage als minutenbezogener Volumenstrom korrespondiert primär mit dem als stündliches, arithmetisches Mittel erhobenen Wasserbedarf.

Als sekundäre Regelgröße wird vorgegeben, dass zusätzlich die ggf. vorliegende Volumendifferenz zwischen dem Füllstand der Reserve zu Beginn einer jeden Betriebsstunde und dem maximalen Stundenmittel des Frischwasserbedarfs des Tagesgangs auszugleichen ist.

Unterschreitet in diesem Zusammenhang als tertiäre Regelgröße der prognostizierte, minutenbezogene Volumenstrom die Mindestpermeatausbringung der Anlage (0,6 hL/min) wird diese abgeschaltet.

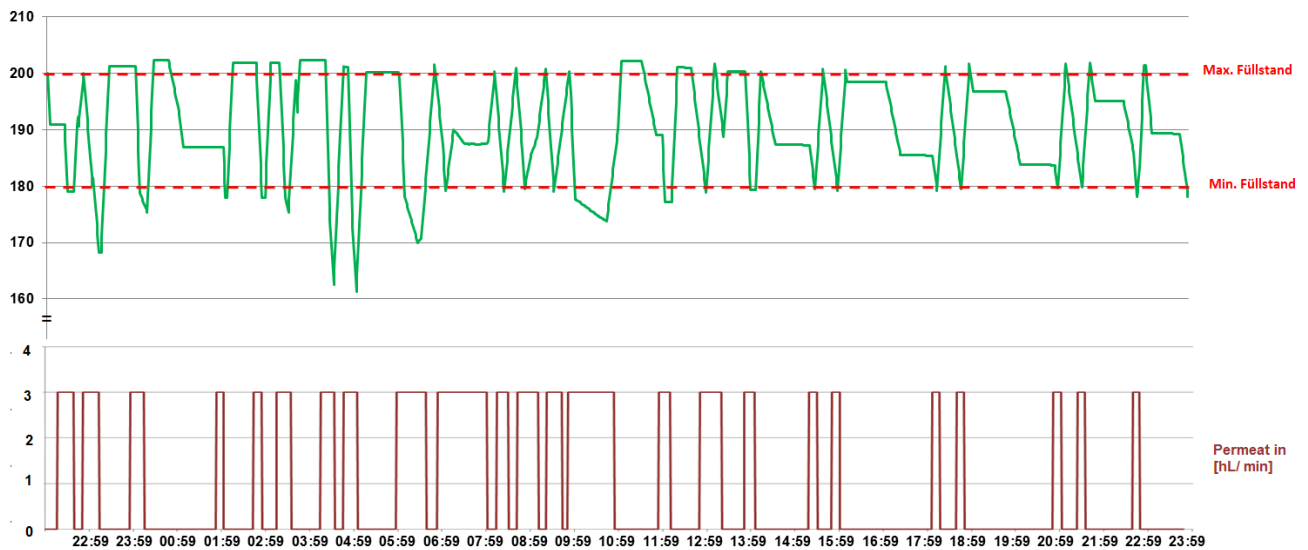


Abbildung 10: Reservenfüllstand und Schaltzyklen als Vergleich zu Algorithmus 4, 24 Schaltzyklen in 24 h
Darstellung des Betriebs einer Umkehrosmoseanlage zur Bereitstellung einer Wasserqualität ohne Rohwasseranteil mit:

- a) benötigtes Tagesvolumen = 158 m³
- b) Volumen der Reserve = 20 m³
- c) Min. Füllstand der Reserve = 18 m³ (90 % (v/v))
- d) Permeatausbringung (100%) = 3 hL/ min

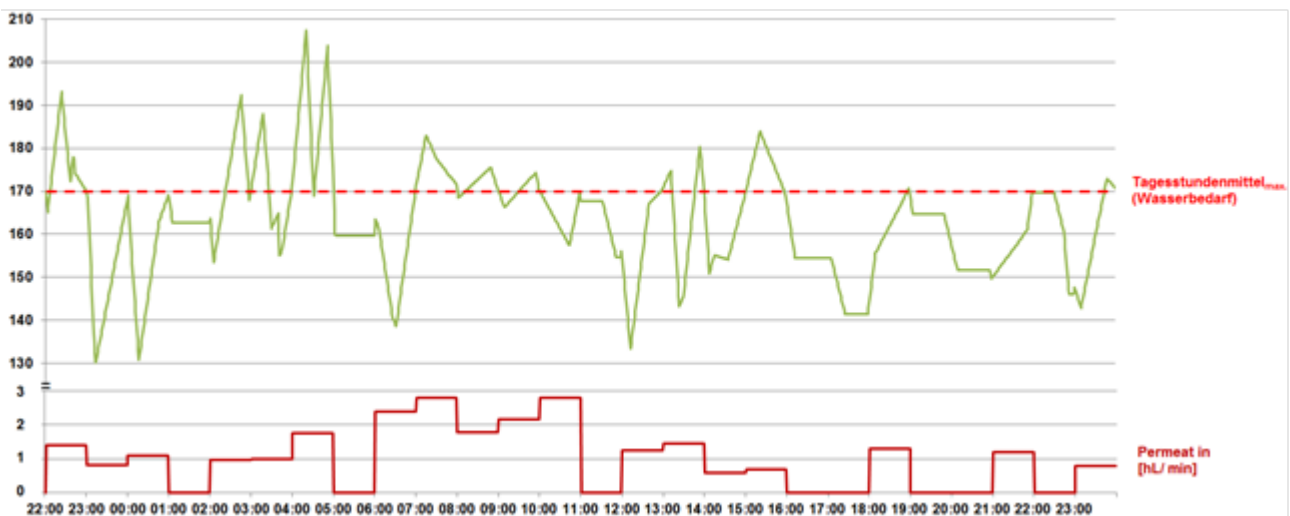


Abbildung 11: Reservenfüllstand und Schaltzyklen basierend auf aktuellem täglichem Maximalstundenmittel (Algorithmus 4), sieben Schaltzyklen in 24 h

Darstellung des Betriebs einer Umkehrosmoseanlage zur Bereitstellung einer Wasserqualität ohne Rohwasseranteil mit:

- a) benötigtes Tagesvolumen = 158 m³
- b) Volumen der Reserve = 20 m³
- c) Ausgangsfüllstand = maximales Tagesstundenmittel des Wasserbedarfs hL
- d) Permeatausbringung = 0,6 (20%) – 3 (100%) hL/ min

Bei entsprechender Auslegung kann die Anzahl der Intervalle während des intermittierenden Betriebs von 24 auf sieben reduziert werden.

1.4 Regleroptimierung durch Simulationssoftware

Bei den vorgestellten Algorithmen zeigen sich relativ starke und plötzliche Schwankungen in der Vorgabe der Ausbringung der Wasseraufbereitung. Diese zu minimieren ist das mit Hilfe einer Simulationssoftware verfolgte Ziel. Nachfolgend wird anhand von Simulationsmodellen das Zusammenspiel einer UO-Wasserreserve und dem Frischwasserverbrauch der Brauerei sowie die Wirkungsweise verschiedener Bestandteile der Regelung und mögliche Stellgrößenalgorithmen untersucht. Alle Varianten können im Simulationssystem unter definierten Bedingungen getestet und verglichen werden.

1.4.1 Analyse des Regelproblems

Automatisierungslösungen zur Regelung eines Füllstandes in einem Tank oder einer Wasserreserve finden Verwendung in verfahrenstechnische Anlagen, Reinigungsanlagen, Kläranlagen, Bioreaktoren und in Anlagen für die Lebensmittelherstellung. Bei einer Füllstandsregelung wird die Füllhöhe eines Behälters konstant gehalten bzw. einem veränderten Sollwert nachgeführt und gegen Störeinflüsse stabilisiert. Durch einen geregelten Zufluss kann ein variabler Abfluss bzw. ein veränderter Sollwert ausgeglichen werden.

Regler werden mit industriellen PID-Reglern als klassische Hardwareregler (Kompaktregler) umgesetzt oder als "Stellgrößenalgorithmus" in eine moderne speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) integriert. Da eine leistungsfähige SPS meist schon vorhanden und auch in der Lage ist, komplexe mathematische Funktionen zu berechnen, kann die SPS neben den wichtigen Aufgaben der Überwachung bzw. Ansteuerung einer Maschine oder Anlage auch die Echtzeitregelung bzw. Steuerung der Wasserreserve übernehmen. Die Integration von Steuerungen und Regelungen in eine vorhandene leistungsfähige SPS reduziert die Kosten für Hardware und Engineering eines zusätzlichen Kompaktreglers und wird daher auch im Projekt als Lösung bevorzugt.

Dagegen versprechen spezielle Industrieregler zur Wasserstandsregelung eine wirtschaftliche Betriebsweise und eine Möglichkeit der Anpassung auch an schwierige Regelstrecken. Beispielsweise besteht ein Niveaumess- und Regelsystem aus Niveauelektrode und Niveauregler, welche den Füllstand kontinuierlich in einem definierten Messbereich erfassen und regeln und Grenzwerte mit Schaltepunkten (z.B. MAX-Alarm, MIN-Voralarm) ausgeben. Diese Hardwareregler erfordern jedoch ein eigenes Engineering, belegen zusätzlichen Platz im Schaltschrank und besitzen meist nur eine feste Regelungsstruktur.

In der Automatisierungslösung kommen darüber hinaus auch AD bzw. DA-Wandler zum Einsatz und es müssen ggf. Kennlinien, Ansprechzeiten oder Totzeiten berücksichtigt werden. Neben dem zur Verfügung stehenden Speichervolumen spielt auch die Stellgröße und die Füllstandsmessung selbst eine wichtige Rolle in der Gesamtlösung. Eine für alle Fälle und Anwendungen gleichermaßen geeignete Füllstandsmessung gibt es nicht. Die Auswahl der Messmethode hängt vielmehr von mehreren Parametern ab, wie z. B. Art der Flüssigkeit, Temperatur, Druck, Dielektrizitätskonstante und Leitfähigkeit, teilweise auch von der Behältergeometrie. Aber auch die Anforderungen an die Genauigkeit, die Reaktionsgeschwindigkeit auf sich ändernde Füllstände wie auch die Zuverlässigkeit beeinflussen die Auswahl des Messverfahrens.

Bei der Inbetriebnahme einer Regelung werden Reglerstruktur und -parameter auf die Regelstrecke abgestimmt. Zur Inbetriebnahme einer Füllstandsregelung, die beispielsweise mit P-, PI- oder PID-

Regler betrieben werden soll, können verschiedene Methoden zur Einstellung der Reglerparameter zur Anwendung kommen:

- Anleitungen (z.B. vom Hersteller des eingesetzten Industrieregler)
- Einstellregeln (z.B. nach Chien, Hrones und Reswick)
- Analytische Berechnungen und Erfahrungen aus der dynamische Simulation

Die Anwendung der Einstellregeln erzielt jedoch nicht immer den erwarteten Erfolg. Da die Eigenschaften der Regelstrecke oft nur unzureichend bekannt sind, kommen vermehrt Auto-Tuning-Verfahren zum Einsatz, die selbstständig die optimalen Reglerparameter ermitteln. In der Praxis ist es in vielen Fällen gefährlich oder überhaupt nicht möglich, die experimentelle Einstellung der Reglerparameter unmittelbar am Prozess vorzunehmen. Deshalb wird häufig ein mathematisches Modell eingesetzt, an dem dann mit Hilfe einer Rechnersimulation gefahrlos experimentiert wird. Das ist auch das Vorgehen im Projekt.

Reale Systeme haben technische Grenzen und alle am Regelkreis beteiligten Teile (Umformer, Mess- und Stellglieder) haben ein eigenes statisches und dynamisches Verhalten. Eine Stellgröße kann sich z.B. nur in einem bestimmten Wertebereich bewegen und auch nicht unendlich schnell verändert werden. Die benötigte Zeit, um ein Stellglied (z.B. das Durchflussventil) vom geschlossenen in den geöffneten Zustand zu bewegen, wird Motorstellzeit genannt. Aus Sicht des geschlossenen Regelkreises stellt dies ein zusätzliches Verzögerungsglied dar. Eine Stellgrößenbegrenzung kann u.a. in Verbindung mit einem I-Anteil im Regler zu Problemen führen, wenn sich die Stellgröße in der Begrenzung befindet und der Regler keine "Anti-Wind-Up" hat, der das "Volllaufen" des Integrators im Regler verhindert.

1.4.2 Entwicklung der automatisierungstechnischen Funktionen

Die automatisierungstechnischen Funktionen (inklusive Stellgrößenalgorithmus) werden mit den Werkzeugen der Modellierung und Simulation entwickelt.

Die Modellblöcke für Anlagenteile der Regelstrecke, für Messsysteme und Regler werden entsprechend der Anlagentechnik zum Simulationsmodell verschaltet und parametrisiert. Die regelungstechnischen Funktionen werden im Simulationsmodell als Funktionsblockdiagramm aus einzelnen Blöcken für mathematische Funktionen, Signalverarbeitung, Kennlinienblöcke, Relay sowie Standardregler beschrieben [Ale10]. Hier kommt u.a. ein konfigurierbarer PID-Regler mit einzeln anschaltbaren P-, I-, D-Anteil sowie industrieüblichen Funktionen (z.B. Anti-Wind-Up eines Kompaktreglers) zum Einsatz.

Für die Regelung wird im Projekt auch ein spezieller Steuerungsblock zur Programmierung des Stellgrößenalgorithmus eingesetzt. Dessen Funktion wird über eine der standardisierten SPS-Programmiersprachen (ST – Strukturierter Text der internationale Norm IEC 61131-3 [IEC02]) definiert. Der simulativ entwickelte und erprobte Steuerungsalgorithmus kann anschließend als Quellcode exportiert und patfformunabhängig direkt in eine SPS implementiert werden. Der ST-Code dient als eindeutige Funktionsbeschreibung und ermöglicht den einfachen Transfer von Steuerungsalgorithmen aus den Simulationsmodellen in reale Anwendungen.

In diesem Steuerungsblock lassen sich beliebige Algorithmen formulieren. Damit können auch aufwendigerer Steuerungs- und Regelungsalgorithmen, die beispielsweise iterativen Charakter

besitzen oder auch modellgestützte Regler, entwickelt und getestet werden, um schwierige Regelungsaufgaben zu lösen.

Modellbasierte Regler verwenden intern ein vereinfachtes Modell des Prozesses. Ein Beispiel ist ein allgemeiner nicht-linearer prädiktiver Regler (non-linear MBPC [Ale10]). Er benutzt ein internes Modell der Regelstrecke, um für eine vorgegebene Stellfolge den Verlauf der Regelgröße zu berechnen. Werden lineare Modelle für die Regelstrecke angenommen, ergeben sich vereinfachte Möglichkeiten, den Regler zu implementieren.

Der berechnete Verlauf von Regel- und Stellgröße wird in einem Gütefunktional bewertet. Dieses Gütefunktional kann z.B. folgenden Aufbau haben [Ale10]:

$$J = \sqrt{\frac{1}{n_2 + n_1 + 1} \sum_{i=n_1}^{n_2} (\hat{x}(k+i) - w(k+i))^2} + \delta_u \frac{1}{T_0} \sqrt{\sum_{j=1}^{nu} (u(k+j) - u(k+j-1))^2}$$

Formel 1: Gütefunktional

mit

$n_1 \dots n_2$	Prädiktionshorizont
$1 \dots nu$	Stellhorizont
$x(k+i)$	Prädiktion der Regelgröße für den Zeitpunkt $k+i$
$w(k+i)$	angenommene Führungsgröße/Sollwert $k+i$
$u(k+j)$	vorgeschlagene Stellgröße für den Zeitpunkt $k+j$
δ_u	Stellgrößenwichtung
T_0	Tastzeit

Die Stellfolge wird in jedem Tastschritt so bestimmt, dass J minimal wird. Der erste Wert der Stellfolge wird als aktuelle Stellgröße ausgegeben (Single Step Policy). Im nächsten Tastschritt wird der Vorgang wiederholt. Die Berechnung der Stellgröße erfordert eine Berechnung der Stellfolge $u(k+1), \dots, u(k+nu)$, sodass J minimal wird. Hierzu werden Annahmen für den künftigen Verlauf des Sollwertes und der Störgröße angesetzt.

Bezüglich der Störgröße kann ein erwarteter Zeitverlauf (z.B. ein typischer Tages- oder Wochengang) angenommen werden. Alternativ kann auch ein konstanter Wert angesetzt werden.

Zur Berechnung von J wird die Regelstrecke mit einem geeigneten Integrator simuliert und J berechnet. Zur Berechnung der Gütefunktion kann ein Optimierer aufgerufen werden. Da im Projekt zunächst mit $nu=1$ gearbeitet wird, kann ein eindimensionaler Minimum-Suchalgorithmus eingesetzt werden.

Wenn die Regelstrecke nur durch ein allgemeines nichtlineares Modell beschrieben werden kann, erfordert die Prädiktion die numerische Lösung dieser Systembeschreibung, startend von einem geeigneten Anfangszustand, mit Annahmen über die vorgegebenen Störfolgen und Annahmen zum zeitlichen Verlauf weiterer auf den Prozess wirkender Störungen.

1.4.3 Anpassung des Stellgrößenalgorithmus

Im Folgenden wird beispielhaft an dem in Abbildung 12 dargestellten Simulationsmodell eine Anpassung des Stellgrößenalgorithmus der Wasseraufbereitung im Block b1 als Alternative zu einem PID-Regler über einen Zeitraum von insgesamt 16 Wochen gezeigt. In diesem Zeitraum erfolgt eine Variation der Ganglinie (80 % und 100 %). In Abbildung 13 ist der Übergang von 80 % der Ganglinie auf 100 % nach der anfänglichen Anlernphase von fünf Wochen zu sehen.

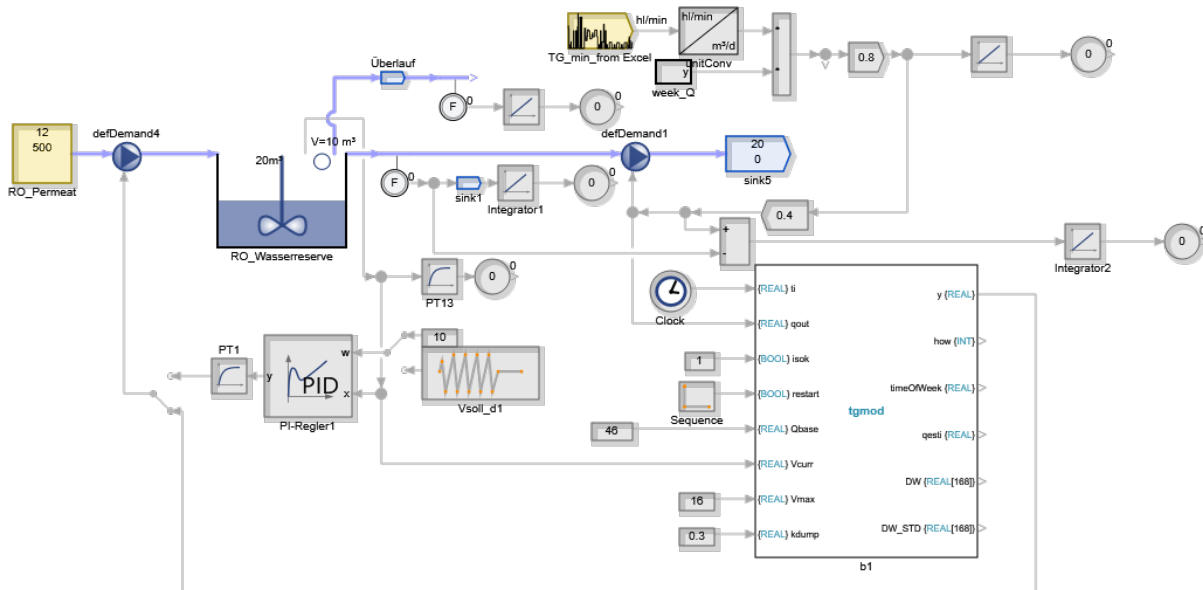


Abbildung 12: RO-Reservetank, mit Umschaltung zwischen Stellgrößenalgorithmus (Block b1) und PI-Regler

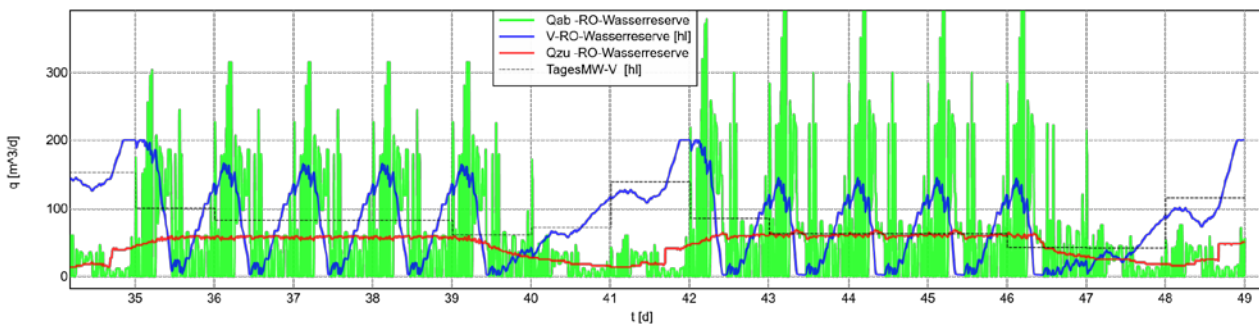


Abbildung 13: Übergang Simulation nach fünf Wochen von 80 % Ganglinie auf 100 %

Am Ende der Simulationszeit (Abbildung 14) zeigt die Stellgröße einen ruhigen Verlauf (rote Kurve in Abbildung 15).

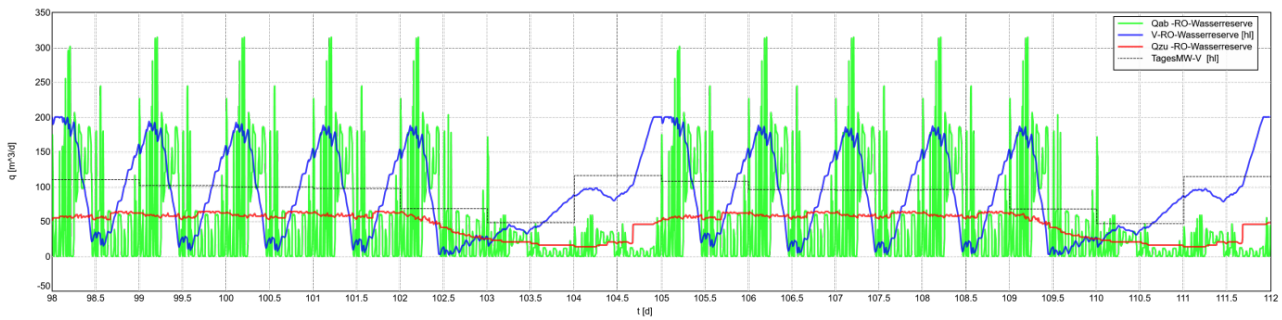


Abbildung 14: Simulation in den Wochen 14 und 15 bei 80 % Wochengang

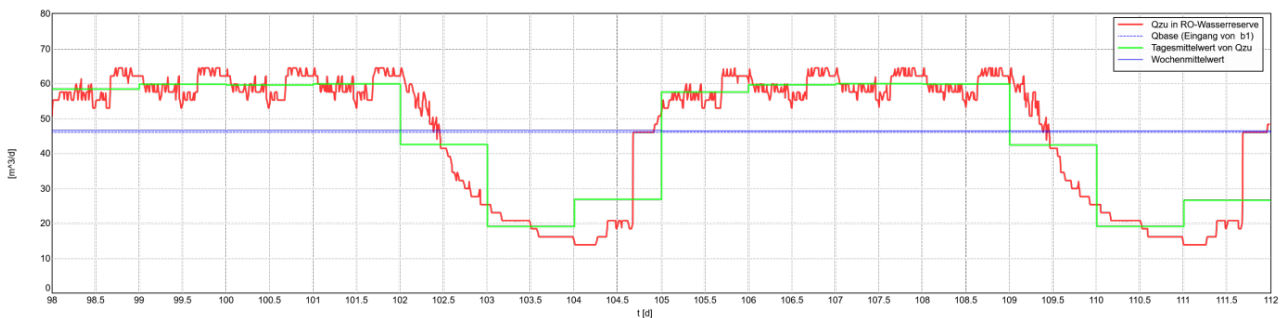


Abbildung 15: Stellgrößenverlauf als Ergebnis der 16-wöchigen Anpassung des Stellgrößenalgorithmus

Der entwickelte Algorithmus kann auch für andere vergleichbare Brauereien mit einem ausgeprägten Wochengang des Frischwasserbedarfs eingesetzt werden. Die rote Kurve in Abbildung 16 zeigt die Veränderung des intern gelernten Wochenganges im Vergleich zu den angeforderten Wassermengen aus der Reserve. Der Algorithmus startet mit einem Mittelwert für die erste Woche und passt sich dann der Dynamik des Wasserbedarfs an.

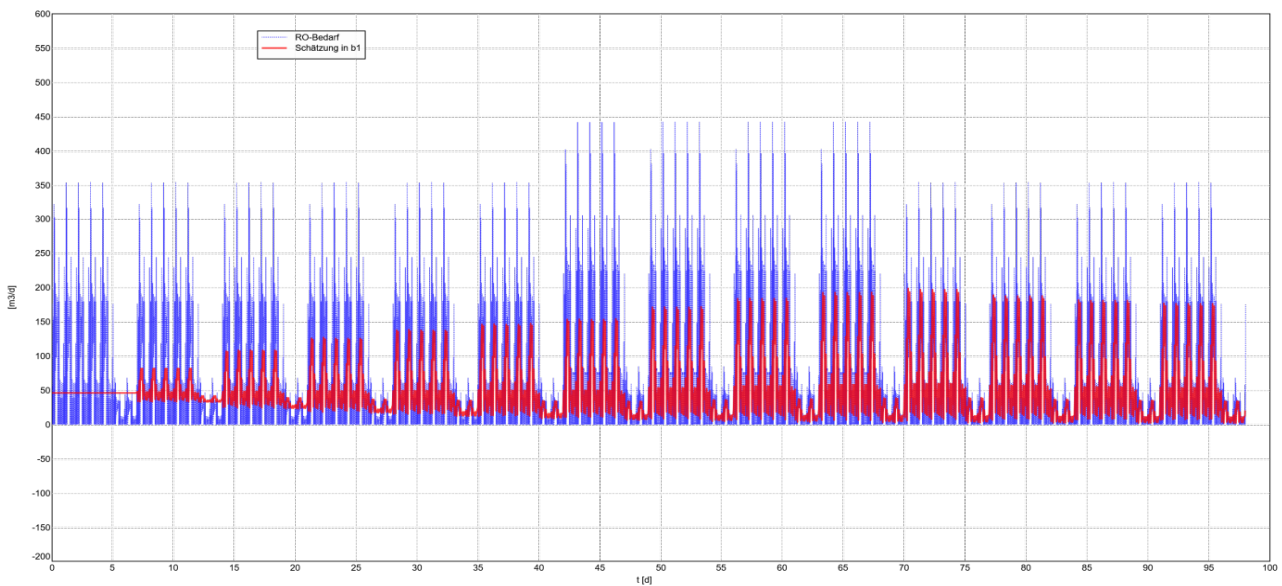


Abbildung 16: Zunehmend bessere Anpassung der Schätzung des Wasserbedarfs durch den Baustein b1 (rote Linie) an den Wasserbedarf (blaue Linie)

1.4.4 Fehlerbetrachtung

Die Differenz von Wasserbedarf und Lieferung zum FW-Tank zeigt, wie gut der Bedarf an aufbereitetem Wasser aus dem Vorrat der geregelten Wasserreserve, welcher mit dem Stellgrößenalgorithmus bewirtschaftet wird, gedeckt werden kann. Die hohen Werte der Differenz zu jeder Minute (vgl. blaue Kurve in Abb. 17) erklären sich damit, dass der Ablauf der Wasserreserve nicht innerhalb einer Minute auf die Änderung des Wasserverbrauchs reagieren kann. Interessanter ist daher die rote Kurve mit den Tagesmittelwerten der Differenzen.

Nachdem der Stellgrößenalgorithmus eingefahren ist und für die internen Berechnungen den typischen Wochengang vom Wasserbedarf benutzt, liegt die Differenz an den Produktionstagen nur noch bei 60 L/Tag, was einem Fehler von 0,1 % entspricht.

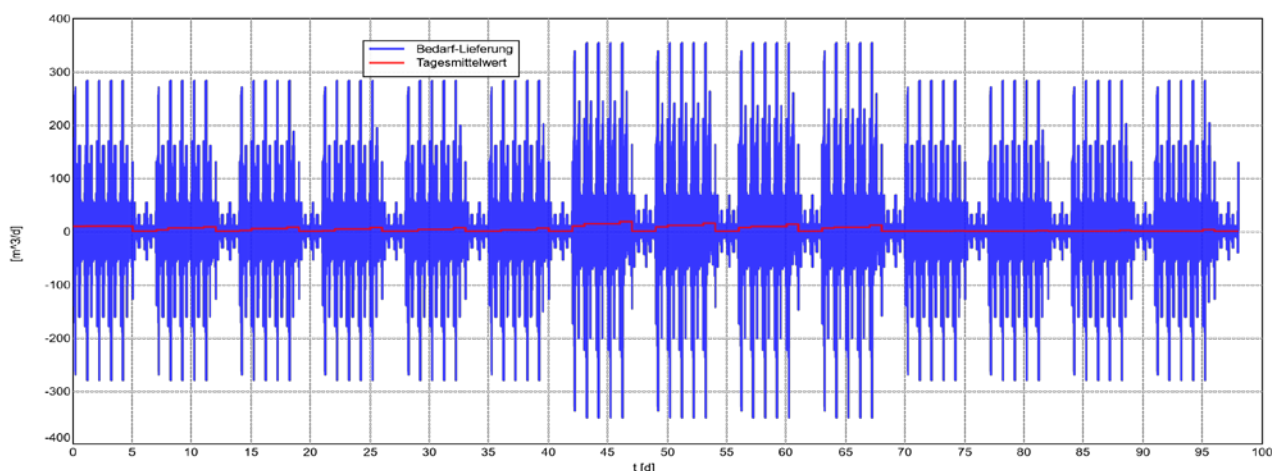


Abbildung 17: Minimierung Differenz Bedarf zur Wasserbereitstellung als Tagesmittelwert (rote Kurve)

Zur Auswertung werden im Simulationsmodell die vielen Differenzminutenwerte mit einem Integrator-Block summiert und in Abbildung 18 als grüne Kurve dargestellt. Auch hier ist gut zu erkennen, dass die grüne Kurve ab der 10. Woche kaum noch ansteigt.

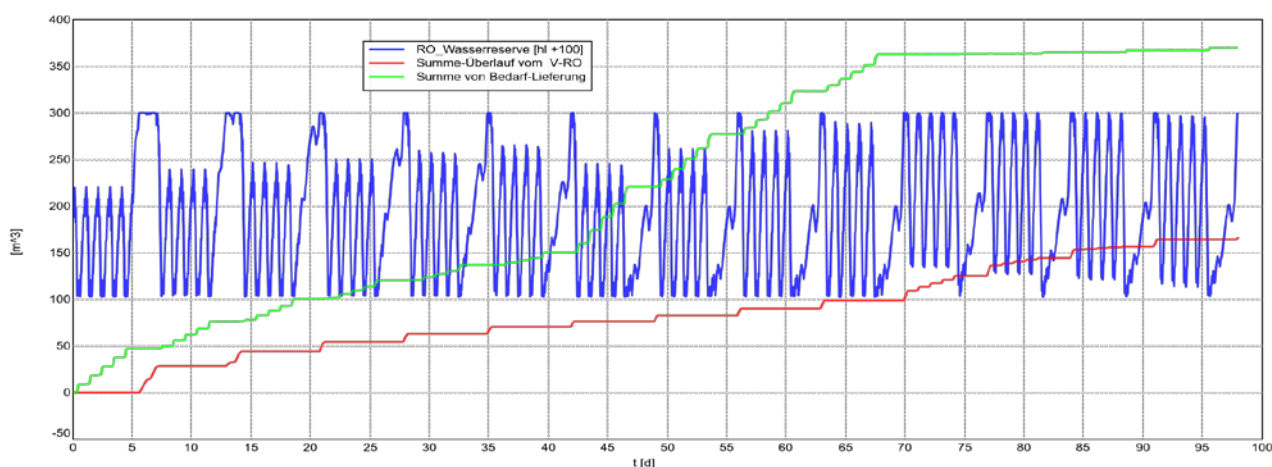


Abbildung 18: Kumulierte Differenzen (grüne Kurve) dargestellt über der Anpassungszeit des Reglers

1.4.5 Bewertung Regleroptimierung

Der am Simulationsmodell entwickelte und getestete modellbasierte Regler für die Wasseraufbereitung benutzt intern ein vereinfachtes Modell der Regelstrecke und einen Wochengang vom Frischwasserbedarf der Brauerei als zukünftige Stellfolge, um den Verlauf der Regelgröße zu berechnen. Da der Wochengang vom Frischwasserbedarf der Brauerei nicht immer vorliegt und es i.d.R. auch kein zugeschnittenes Simulationsmodell der Brauerei zur Prognose gibt, kann der Regler auch zunächst mit einem Mittelwert arbeiten und mit einem erweiterten Algorithmus den Wochengang selbst lernen.

1.5 Versuche Flexibilisierung RO

1.5.1 Versuchsanlage

Die Umkehrosmoseversuchsanlage verfügt über insgesamt sechs 4“-Module, die in drei hintereinander geschalteten Bänken in Tannenbaumkonfiguration (3-2-1) angeordnet sind. Jedes Modul weist eine Membranfläche von 8 m² auf, sodass es im Schnitt mit max. 250 L/h zur Permeatausbringung beitragen kann. Die maximale Gesamtausbringung der Anlage (100 %) beläuft sich damit auf 1,5 m³/h. Ausgestattet ist die Anlage im Wesentlichen mit einem regelbaren Zulauf (Hochdruckpumpe mit Frequenzumrichter), einem geregelten Konzentratventil, einer regelbaren Konzentrationsrezirkulation mit wählbarer Wiedereinspeisung entweder auf der Druckseite der Hochdruckpumpe (Einlauf 1. Bank), in den Zulauf zur 2. Bank oder in den zur 3. Bank. Darüber hinaus ist die Anlage mit einem regelbaren Rohwasserverschnitt zur Einstellung der aufbereiteten Wasserqualität ausgerüstet.

Die Anlage wird während der Versuche mit einer Permeatausbeute von 90 % betrieben, was bei der gegebenen Rohwasserqualität weitgehend der maximal erreichbaren entspricht. Hierzu werden Schwefelsäure und ein Antiscalant mengenproportional in den Zulauf dosiert. Bei einer Permeatausbringung von 1,5 m³/h (100 %) beträgt der Rohwasserverschnitt 100 L/h, sodass insgesamt bei dieser Einstellung 1,6 m³/h durch die Anlage bereitgestellt werden. Es ergibt sich hierdurch ein für Brauwasser idealer m-Wert von 0,6 mval/L und die Leitfähigkeit liegt bei 65 µS/cm (+/- 5 µS/cm). Auch bei den anderen Einstellungen wird der Verschnitt soweit machbar auf diese Zielwerte nachgeführt.

1.5.2 Permeatqualität in Abhängigkeit der Ausbringung

Bei einer Verringerung der Ausbringung bei konstant hoher Permeatausbeute werden die Konzentrat- und der Rohwasserzulauf entsprechend verringert; hierdurch stellt sich ein geringerer Eingangsdruck und damit eine kleinere transmembrane Druckdifferenz ein. Gleichzeitig muss zur Einhaltung der hydraulischen Anforderungen die Konzentratrezirkulation erhöht werden. Bedingt durch den geringeren Transmembrandruck nimmt der Wasserfluss durch die Membran wunschgemäß ab. Der Ionenschlupf allerdings ist, wie es auch vom üblicherweise angesetzten Lösungs-Diffusions-Modell vorhergesagt wird, abhängig vom Konzentrationsgradienten über die Membran. Aufgrund der gleichbleibend hohen Permeatausbeute verringert sich dieser bei kleinerer Ausbringung nicht. Vielmehr steigt der durchschnittliche Konzentrationsgradient durch die größer werdende Konzentratrezirkulation sogar noch an. Insgesamt verschiebt sich hierdurch das Verhältnis der permeierenden Ionen (wird größer) zum durch die Membran tretenden Lösungsmittel

Wasser (wird kleiner), sodass die Ionenkonzentration und damit die Leitfähigkeit im Permeat bei niedriger eingestellter Anlagenausbringung ansteigt. Dieses erwartete Verhalten lässt sich experimentell gut bestätigen und ist in Abbildung 19 dargestellt.

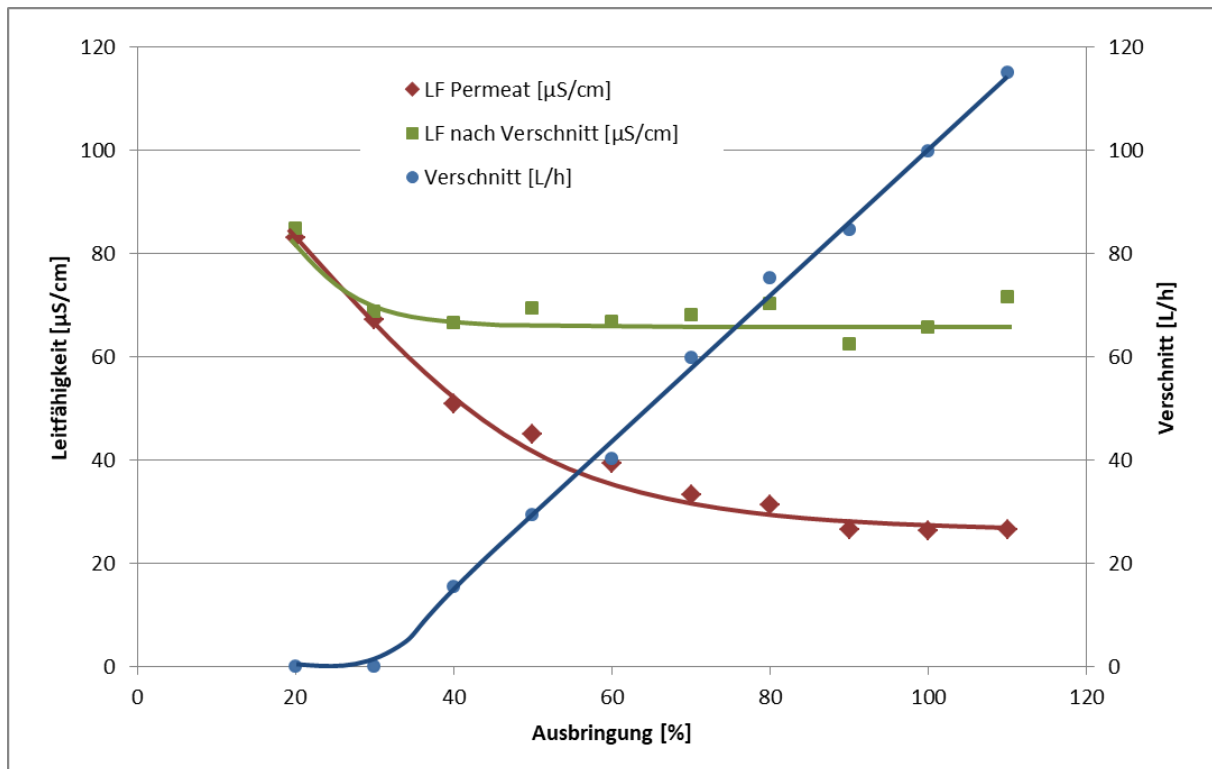


Abbildung 19: Veränderung der Leitfähigkeit in Abhängigkeit der eingestellten Ausbringung

Bis zu einer Einstellung von 30 % kann die steigende Permeatleitfähigkeit noch durch einen geringer eingestellten Verschnitt ausgeglichen werden. Bei 20 % Ausbeute übersteigt die Permeatleitfähigkeit bereits die angestrebte Leitfähigkeit des Brauwassers, sodass auch bei 0 L/h Verschnitt die angestrebte Brauwasserqualität nicht mehr gehalten werden kann. Auch wenn sich die hier ermittelte Grenze bei 30 % der Nennausbringung zunächst nur auf die individuellen Gegebenheiten speziell hinsichtlich der vorhandenen Rohwasserqualität bezieht, ist dennoch mit sehr ähnlichen Ergebnissen auch bei abweichender Rohwasserqualität zu rechnen. Besseres Rohwasser führt bei der Auslegung zu einer höheren Ausbeute und damit zu einer höheren Aufkonzentration, sodass insgesamt die Konzentratqualität in etwa vergleichbar bleibt.

Um die Permeatqualität auch bei niedrigen Ausbringungen in einem Bereich zu halten, der noch einen Verschnitt erlaubt, wird in einigen Versuchen gezielt die Membranfläche verringert und so die Permeatleitfähigkeit gesenkt. Dieser Ansatz wird im folgenden Kapitel 1.5.3 nochmals aufgegriffen.

1.5.3 Elektrischer Energiebedarf in Abhängigkeit der Ausbringung

In Abbildung 20 wird der auf die produzierte Brauwassermenge bezogene elektrische Energiebedarf der Wasseraufbereitung in Abhängigkeit der eingestellten Ausbringung gezeigt.

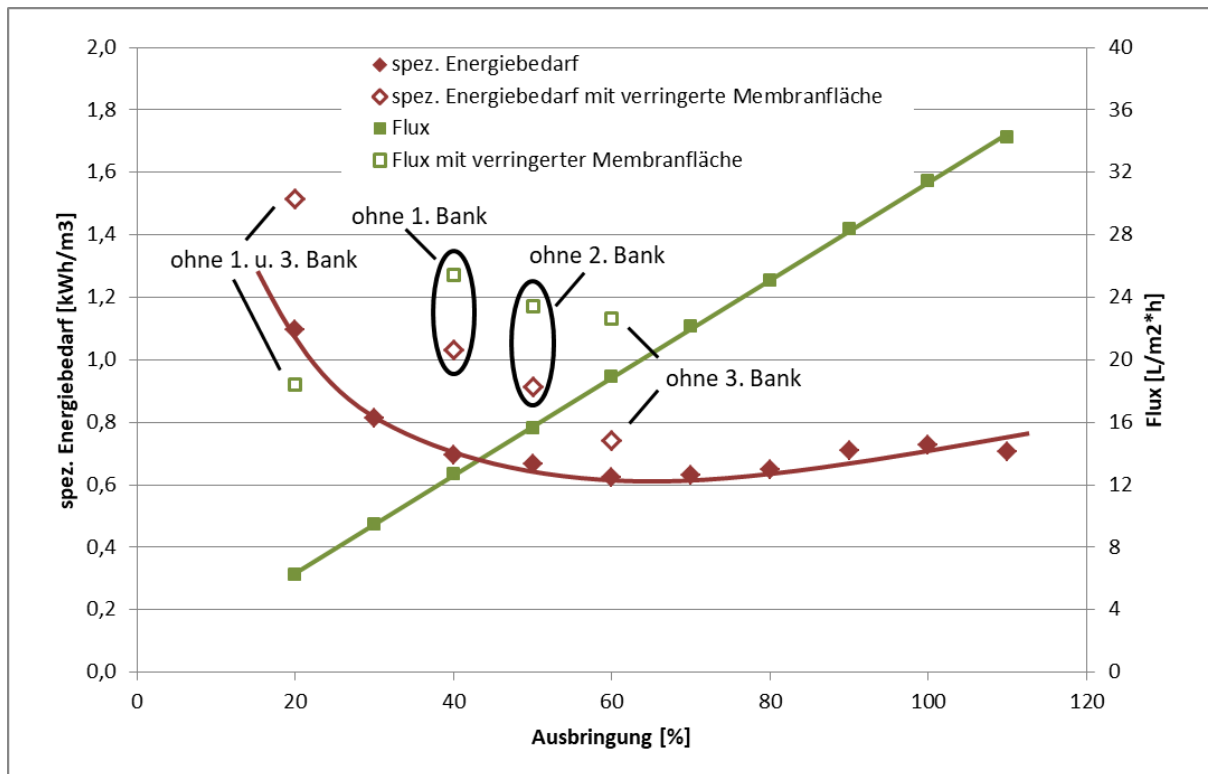


Abbildung 20: Spezifischer Energiebedarf in Abhängigkeit der eingestellten Ausbringung Versuchsanlage 1,5 m³/h

Mit abnehmender Ausbringung sinkt zunächst erwartungsgemäß der spezifische Energiebedarf, da weniger Wasser durch die gleiche Membranfläche transportiert werden muss, was eine niedrigere transmembrane Druckdifferenz zur Folge hat. Allerdings fällt dieser Effekt bis zum Minimum bei ca. 60 % Ausbringung eher schwach aus. Wird die Ausbringung weiter gesenkt, steigt der spezifische Energiebedarf sehr deutlich an. Um die Ursache hierfür zu klären, ist es notwendig, den spezifischen Energiebedarf weiter zu differenzieren (Tab. 2). Unter der Annahme eines durchschnittlichen Pumpenwirkungsgrades von 67 % lassen sich der elektrische Energiebedarf für die Hochdruck- und die Rezirkulationspumpe abschätzen. Die Differenz zur gemessenen Leistungsaufnahme entfällt auf die sonstigen Verbraucher wie die Steuerung, die Sensoren und weitere Stromverbraucher wie die Dosierpumpen für Antiscalant und Säure.

Deutlich erkennbar ist die geringere Leistungsaufnahme mit fallender Ausbringung, was vorrangig auf eine geringere benötigte Leistung der Hochdruckpumpe zurückzuführen ist, die bei 20 % auf annähernd Null absinkt, was dadurch erklärt werden kann, dass bei 20 % nur noch ein geringfügig höherer Druck als der Vordruck von 3 bar benötigt wird, um die erforderliche Permeatmenge zu erzeugen. Beim spezifischen und damit auf einen Kubikmeter bezogenem Strombedarf relativiert sich die Leistungsabnahme naturgemäß, da bei niedriger Ausbeute auch weniger Wasser produziert wird. Dennoch ist auch hier eine deutliche Abnahme bei der Hochdruckpumpe zu erkennen, die allerdings teilweise durch einen höheren spezifischen Energiebedarf der Rezirkulationspumpe kompensiert wird.

Tabelle 2: Elektrische Leistung und spezifischer elektrischer Energiebedarf

Ausbringung (%)		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
inkl. Verschnitt (m³/h)		0,30	0,46	0,63	0,78	0,95	1,12	1,28	1,44	1,61	1,76
HD-Pumpe	(kW)	0,01	0,04	0,08	0,13	0,18	0,27	0,35	0,49	0,57	0,65
Rez.pumpe	(kW)	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Sonstiges	(kW)	0,29	0,31	0,34	0,37	0,39	0,41	0,46	0,51	0,58	0,57
Summe	(kW)	0,33	0,37	0,43	0,52	0,59	0,71	0,83	1,02	1,17	1,24
HD-Pumpe	(kW/m ³)	0,05	0,09	0,12	0,17	0,19	0,24	0,27	0,34	0,35	0,37
Rez.pumpe	(kW/m ³)	0,09	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Sonstiges	(kW/m ³)	0,96	0,68	0,54	0,48	0,41	0,37	0,36	0,36	0,36	0,32
Summe	(kW/m³)	1,09	0,81	0,70	0,67	0,62	0,63	0,65	0,71	0,73	0,70

Entscheidend für den in der Summe aber bei sehr niedrigen Ausbringungen sogar deutlich höheren spezifischen elektrischen Energiebedarf ist allerdings, dass der Strombedarf für die sonstigen Verbraucher (Steuerung, Sensoren, Dosierpumpen) sich nicht so stark verändert und daher bei niedriger Ausbeute aufgrund der geringeren Wassermenge deutlich stärker zu Buche schlägt. Dieser Effekt relativiert sich bei größeren Anlagen, wie in Abbildung 21 ersichtlich ist. Bei der Hochrechnung wird angenommen, dass der Strombedarf für Sonstiges von der Anlagengröße unabhängig ist. Dementsprechend fällt der spezifische Strombedarf insgesamt niedriger aus und verringert sich bei 100 % Ausbringung von 0,73 kWh/m³ bei der Versuchsanlage mit 1,5 m³/h auf 0,42 kWh/m³ bei einer Anlage mit 10 m³/h. Bedingt durch den geringeren Flux verringert sich dieser Wert auf 0,24 kWh/m³ bei 30 – 40 % Ausbringung. Der erhoffte Effekt einer Einsparung elektrischer Energie von bis zu 40 % ist gegeben. Wenn aus Gründen einer verbesserten Permeatqualität einzelne Bänke abgeschaltet und damit der Flux wieder erhöht wird, steigt der spezifische elektrische Energiebedarf bei kleinen Ausbringungen wieder, bleibt aber durchaus noch im Bereich der Werte für 100 % Ausbringung (nicht ausgefüllte Markierungspunkte in Abb. 21).

1.5.4 Zusammenfassende Bewertung der Pilotversuche mit variabler Ausbringung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine Verringerung der Ausbringung auf bis zu 20 % der ursprünglichen Auslegung möglich ist. Das primäre Mittel hierbei ist der Einsatz einer regelbaren Konzentratzirkulation, die aus energetischen Gründen in jedem Fall auf der Druckseite der Hochdruckpumpe wieder in den Kreislauf eingespeist werden sollte. Weitere Optimierung kann sich im individuellen Fall noch durch die Einspeisung vor der 2. oder 3. Bank ergeben. Bei Einstellung einer neuen Ausbringung sollten zur Vermeidung einer sonst während der Umstellung möglicherweise auftretenden Überschreitung der maximalen Permeatausbeute die einzelnen Volumenströme in einer definierten Reihenfolge angepasst werden. Bei einer Verringerung der Ausbringung ist zunächst der Feed der Anlage herunter zu regeln, anschließend die Konzentratausschleusung, die Konzentratzirkulation und der Verschnitt. Bei einer Erhöhung der Ausbringung kehrt sich die Reihenfolge um: Zunächst werden Konzentratausschleusung und Konzentratzirkulation angepasst und erst anschließend der Feed der Anlage erhöht. Das Verändern der Ausbringung ist einfach und robust möglich und hat während der Versuche nur eine kurze Zeit im Bereich weniger Minuten in Anspruch genommen.

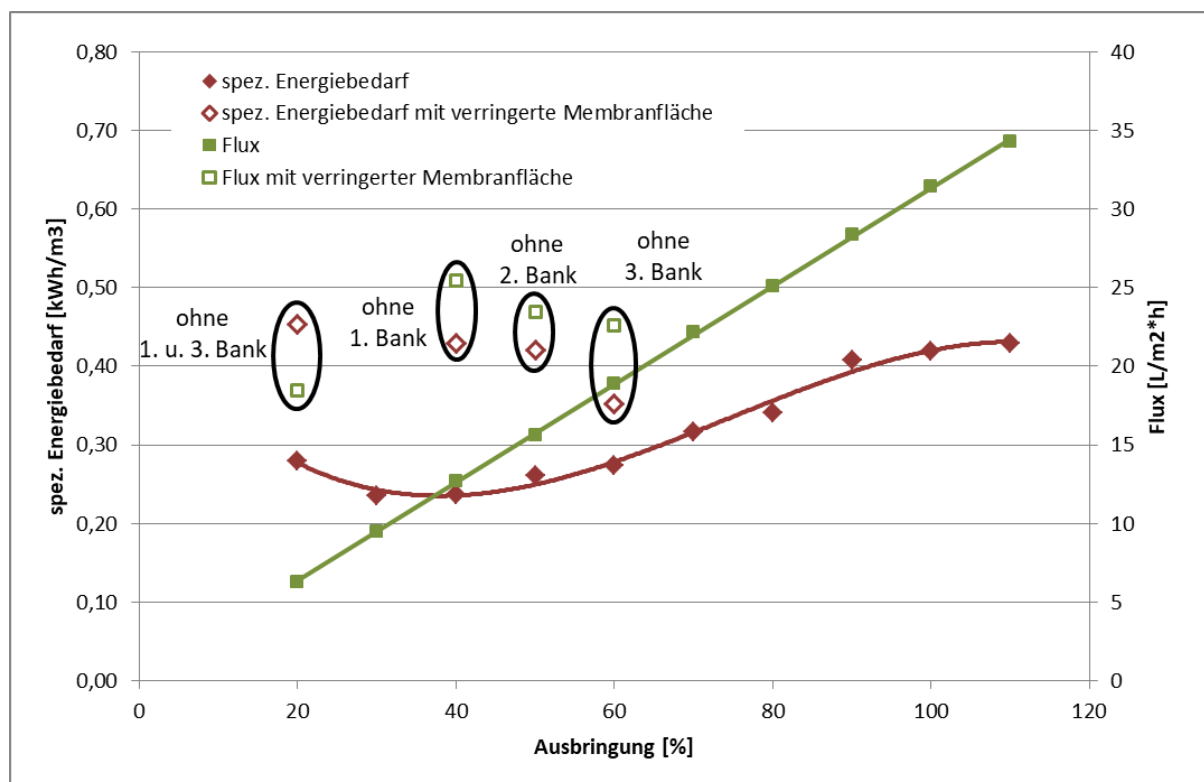


Abbildung 21: Spezifischer Energiebedarf in Abhängigkeit der eingestellten Ausbringung, Hochrechnung Anlage 10 m³/h

Zur Erhaltung einer ausreichenden Permeatqualität kann bei sehr niedriger Ausbringung eine Abschaltung von einzelnen Bänken vorgenommen werden, was im einfachsten Fall durch ein Absperrern der Permeatseite der betroffenen Bank erreicht werden kann. Zur Vermeidung von permeatseitigem Rückstoß im Störfall sind gesonderte Maßnahmen zum Schutz der Membran zu ergreifen. Der Einbau einer mit einem Rückschlagventil versehenen Kurzschlussleitung zwischen Feed- und Permeatseite der jeweiligen Bank bietet sich hierfür an. Das Rückschlagventil würde im Fall eines permeatseitigen Überdrucks einen Druckausgleich zur Zulaufseite sicher und einfach mechanisch gewährleisten. Beim Abfahren der Anlage bietet das Schließen der Permeatseite zusätzlich den Vorteil, dass kein Permeat unbeabsichtigt produziert wird, was schon bei einem wie im Fall der Versuche üblichen Vordruck von 3 bar (ü) ohne Hochdruckpumpe sonst unvermeidlich ist. Hierdurch wird das Verdrängen des Konzentrates erleichtert, da kein Wasser in Richtung Permeat mehr verloren geht, und es kommt zu keiner Aufkonzentration des Nachspülwassers, was sonst die Scalinggefahr bei Anlagenstillstand im ungünstigen Fall erhöhen kann.

Durch die Verringerung der Ausbringung lässt sich der spezifische Energiebedarf deutlich senken. Lediglich bei sehr kleinen Anlagen wird diese Einsparung durch den Grundbedarf der Anlage an elektrischer Energie und durch die ggf. erforderliche Abschaltung einzelner Bänke zur Erhaltung der Permeatqualität zunichte gemacht.

Insgesamt hat die Versuchsanlage ein ausgesprochen robustes Verhalten über den gesamten ausgetesteten Ausbringungsbereich von 20 bis 110 % gezeigt.

1.6 Implementierung Simulation

Die bislang vorgestellte Vorgehensweise mit einer abgeleiteten Bedarfsprognose orientiert sich stark an den zur Verfügung stehenden Daten spezifisch für den Beispielbetrieb. Im Folgenden wird eine weitergehende und vor allen Dingen leichter zu verallgemeinernde Simulation einer Brauerei bis zu den wasserverbrauchenden Einzelaggregaten vorgestellt, die im Rahmen des Projektes zwar nicht vollständig abgebildet werden konnte, aber zusätzliches Optimierungspotenzial bietet. Gegenstand der Simulation sind daher zunächst nur Sudhaus und Abfüllung, wobei das Sudhaus detailliert modelliert wurde.

1.6.1 Wahl des Simulationssystems

Auch bei der Modellierung und Simulation von Brauereiprozessen sollten Aufwand und Nutzen in einem "gesunden" Verhältnis zueinander stehen. Die Zielstellung (Probleme, Fragestellung, Genauigkeitsforderung, usw.), der bezahlbare Aufwand bzw. der gegebene Zeitrahmen, die verfügbaren Daten und Informationen zur Anlage selbst sowie das einsatzbereite Simulationssystem (Simulator + Modellblockbibliothek, die auf mathematischen Modellgrundlagen aufsetzt) bestimmen die Untersuchungsmöglichkeiten und Ergebnisse einer Simulationsstudie.

Für viele einfache Fragestellungen sollte ein einfaches Modell einer Standard-Brauerei oder ein Satz Bemessungsgleichungen bzw. einige einfache, möglichst universelle Modellblöcke genügen, um den typischen Produktionsprozess abzubilden.

Neben den Rezepten können sich Brauereien in anlagentechnischen Details der Bierproduktion und damit vor allem auch im Wasser-, Wärme- und Energieverbrauch deutlich voneinander unterscheiden. Viele Brauereien sind historisch gewachsen und beinhalten deshalb individuelle Abschnitte im Produktionsverfahren bzw. ganz spezielle Anlagenteile.

Das ist ein Grund für den hohen Schwierigkeitsgrad und den universellen Anspruch an die Entwicklung von parametrierbaren Modellbausteinen zur Modellierung von Brauereiprozessen.

Ein besonderer rechentechnischer Anspruch an die Modellierung und Prozesssimulation in Brauereien und Getränkeabfüllbetrieben kommt aber auch aus der Mischung von diskontinuierlichen Batchprozessen (auf die Minute genau), dem Transport bzw. der Lagerung der Zwischenprodukte zwischen den Prozessstufen, einigen kontinuierlichen Prozessen und den beteiligten Stoff- und Energieströmen. Neben den damit verbundenen unterschiedlichen Zeithorizonten und Zeitabläufen („steife Systeme“) stellen auch die zugrunde gelegten mathematischen Modelle bzw. die dynamischen Simulationsrechnungen einen hohen Anspruch an das Simulationssystem (Integrator, Datenmenge) und den PC.

Die mathematischen Modelle basieren auf Massen- und Energiebilanzen, welche während der Berechnung der Simulationsmodelle mit einem Integrator geschlossen werden und mathematisch aufgehen müssen. Die Simulationsergebnisse sollten einerseits genau genug sein, um wesentlichen Effekte abzubilden. Andererseits dürfen die zu entwickelnden Modellbausteine und die mathematischen Modellgrundlagen (i.d.R. nichtlineare Differenzialgleichungssysteme) auch nicht zu kompliziert bzw. zu komplex werden, damit sie noch parametrierbar sind und vom Simulator in endlicher Zeit berechnet werden können.

Für die Planung und Optimierung von verfahrenstechnischen Anlagen hat sich das Werkzeug dynamische Simulation zur Erprobung verfahrenstechnischer und automatisierungstechnischer

Optionen etabliert. Für diese Aufgabe stehen international eine Anzahl von Simulationsumgebungen zur Verfügung, die es erlauben, sowohl die verfahrenstechnischen als auch die regelungstechnischen Optionen zu simulieren.

Unter den kommerziell verfügbaren Simulationsplattformen bieten die kostenintensive Basissoftware Matlab /Simulink (siehe www.mathworks.com) und darauf basierte Systeme die größte Flexibilität, um sowohl Standardfunktionen der Automatisierungstechnik als auch weitergehende Regelungskonzepte zu modellieren. Diese Systeme haben aber einen hohen Einarbeitungsaufwand und beinhalten eine erhöhte Gefahr, ungewollt Fehler ins Simulationsmodell einzubauen, die u.U. schwer zu erkennen sind. Damit sind sie für den Ingenieur, der nicht täglich verfahrenstechnische Fragestellungen im Zusammenspiel mit betrieblichen bzw. automatisierungstechnischen Optionen im Rahmen von Planung oder Optimierung einer konkreten Anlage in einem üblicherweise knappen Zeit- und Budgetrahmen beantworten muss, nicht das erste Mittel der Wahl.

Für die Bearbeitung des Projektes war kein Simulationssystem verfügbar, um mit vorgefertigten Modellbausteinen vom Produktionsprozess einer Brauerei den individuellen Wasserverbrauch zu modellieren und anhand von Wochenplänen Prognosen zu berechnen und Steuerungen oder Regelungen zu entwickeln.

Diese Ausgangslage war Motivation für den Einsatz der beim Projektpartner Thorsis Technologies verfügbaren offenen Simulationsplattform SIMBA# (siehe: simba.ifak.eu) und für die Entwicklung angepasster Modellgrundlagen und Modellblöcke für das vorliegende Projekt. Das bedeutet, dass die Simulationsplattform um ausgewählte Prozesse der Beispielbrauerei erweitert wird, sodass im Projektverlauf neben der verfahrenstechnischen Funktion auch Betriebsführungskonzepte und Steuerungs- und Regelungsvarianten untersucht werden können.

Ziel war auch, die Simulationsstudien mit weniger Aufwand durchzuführen, und, wenn möglich, ohne Verlust an Flexibilität alle erforderlichen regelungstechnischen Optionen zu modellieren. Darüber hinaus sollte die Simulationsuntersuchung im Projekt ohne kostenintensive Basis- oder Spezialsoftware auskommen.

1.6.2 Mathematische Modellgrundlagen

Zur Erstellung der Simulationsmodelle dient in SIMBA# ein Fließbildeditor. Damit wird das Simulationsmodell als Verfahrensfließbild (hierarchischer Aufbau, skalierbare und dynamisch animierte Symbole für die Modellblöcke) ähnlich einem RI-Fließbild aufgebaut, was bedeutet, dass auch die verfahrensbestimmende MSR-Technik bzw. Details der automatisierungstechnischen Funktionen berücksichtigt werden müssen.

Für die mathematische Beschreibung von im Wasser bzw. im Brauereiprozess ablaufenden Reaktionen existieren universelle Reaktormodelle, für die die Liste der betrachteten Substanzen und die ablaufenden Prozesse frei definiert werden kann. Die Reaktionsnetzwerke (mathematische Modellgrundlage mit Stöchiometrie und Kinetik der Prozesse) können mit einem speziellen Editor komfortabel definiert oder angepasst werden.

Zur detaillierten Darstellung der Stoffströme (Wasser, Produkte, Reinigungsmedien einer CIP, ...) und ausgewählter Prozesse einer Brauerei werden unterschiedliche mathematische Modellgrundlagen mit angepassten Komponenten benötigt. Im Projekt werden neben einem

vereinfachten Wassermmodell, welches den Stoffstromvektor zu jedem Zeitpunkt mit Wassermenge und Temperatur beschreibt, auch Modellansätze für Brauwasser und Produkt (Maische, Bier, ...) genutzt, die zusätzlich auch die Wasserqualität beispielsweise in Form von An- und Kationen, dem pH-Wert und der Härte mit aufnehmen können.

1.6.3 Modellblöcke für MSR

Steuerungs- und Regelungsfunktionen können als klassisch Funktionsblock basierte Beschreibungen das Simulationsmodell ergänzen, als SPS-Code eingebunden bzw. als Ablaufsteuerungen grafisch beschrieben werden.

Zur Beschreibung einer Ablaufsteuerung, die beispielsweise in einem Läuterbottich abläuft und prozessabhängig bestimmt, zu welchem Zeitpunkt wieviel Frischwasser genommen wird, eignet sich ein Petri-Netz-basierter Ansatz. Mit Petri-Netzen lassen sich Abläufe, Rezepte, auch parallel ablaufende Prozesse grafisch beschreiben. Das Petri-Netz besteht aus Stellen (gerundete Blöcke) und Transitionen (rechteckige Blöcke). Als Automatengraph interpretiert würde man von Zuständen und Zustandsübergangsbedingungen sprechen. Die Transitionsblöcke schalten (feuern), wenn alle Eingangsstellen belegt (markiert) sind, und optional eine Übergangsbedingung erfüllt ist. Die Transitionsblöcke können optional eine Zeitbedingung formulieren (feuern nach einer vorgegebenen Zeitdauer) und ebenfalls optional ein Eingangssignal definieren, das eine externe Schaltbedingung vorgibt, die beliebig aus dem Anlagenzustand, booleschen Operationen und weiteren Zeitbedingungen resultiert werden kann.

1.6.4 Simulationsmodell am Beispiel Sudhaus

Das Simulationsmodell enthält wesentliche Prozessschritte und Anlagenteile vom Sudhaus, die direkt oder indirekt Mengen und Zeitpunkte des Frischwasserbedarfs bestimmen. Es beginnt mit dem Einmischen und endet beim Füllen eines Gärtanks (ZKT) im Gärkeller. Das Modell ist hierarchisch aufgebaut, d.h. unter den Blöcken des Gesamtmodells verbergen sich weitere Teilmodelle, die nachfolgend auch abgebildet sind. Die Verbindungslinien zwischen den Modellblöcken sind einzelne Signale (grau) oder Signalvektoren zur Beschreibung von Wasser (blau) und Produktströmen (gelb). Die folgenden Abbildungen 22 bis 26 verdeutlichen auszugsweise den Ansatz bezogen auf das Sudhaus.

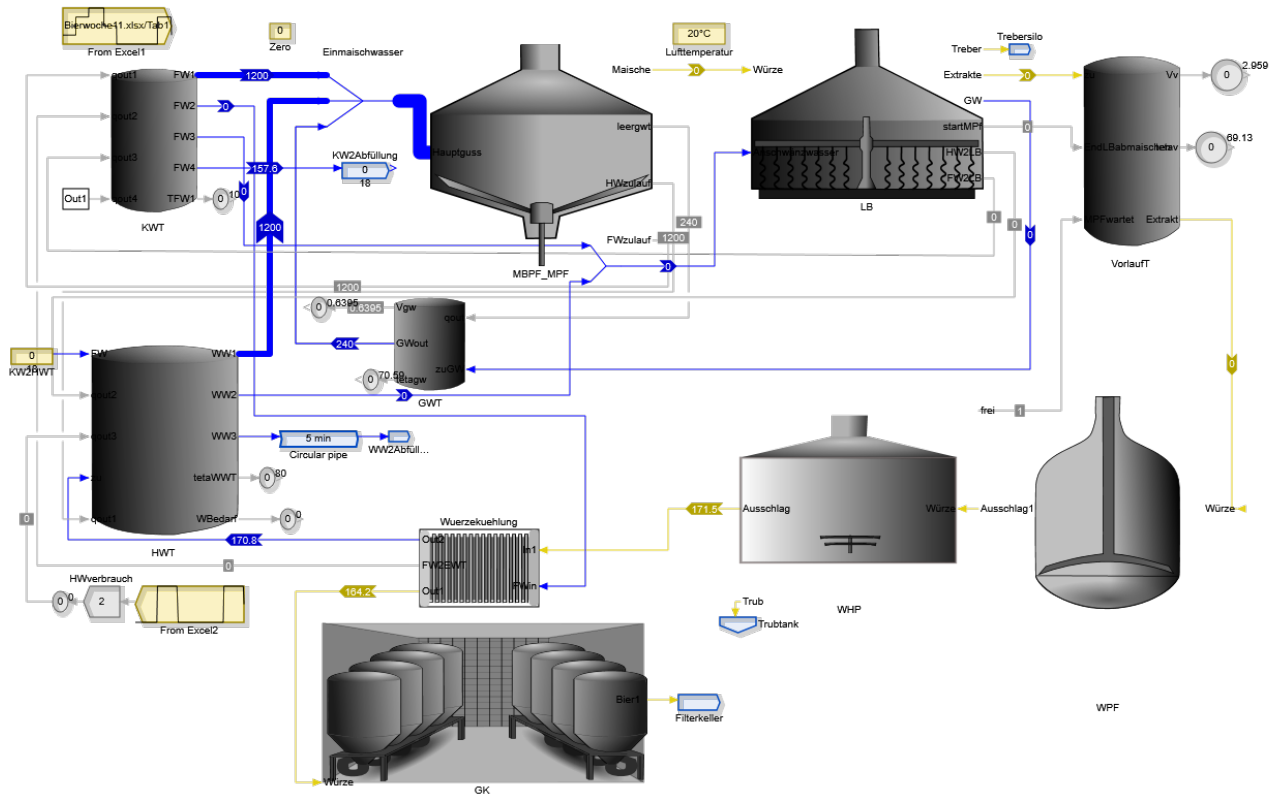


Abbildung 22: Übersicht Gesamtmodell (Zeitpunkt t = 1,27 d)

Der Eiswassertank wird mit einem Zweipunktregler mit FW nachgefüllt, was bedeutet, dass erst dann, wenn beim Würzekühlen der Füllstand im EW-Tank unter den Schaltschwellenwert (von z.B. 8 m³) abgesunken ist, der Tank mit gekühltem FW (Eiswasser 2,5 m³/h) nachgefüllt wird. Dadurch ergibt sich ein Unterschied im Zeitverhalten von EW beim Würzekühlen zum FW beim Nachfüllen des Eiswassertanks.

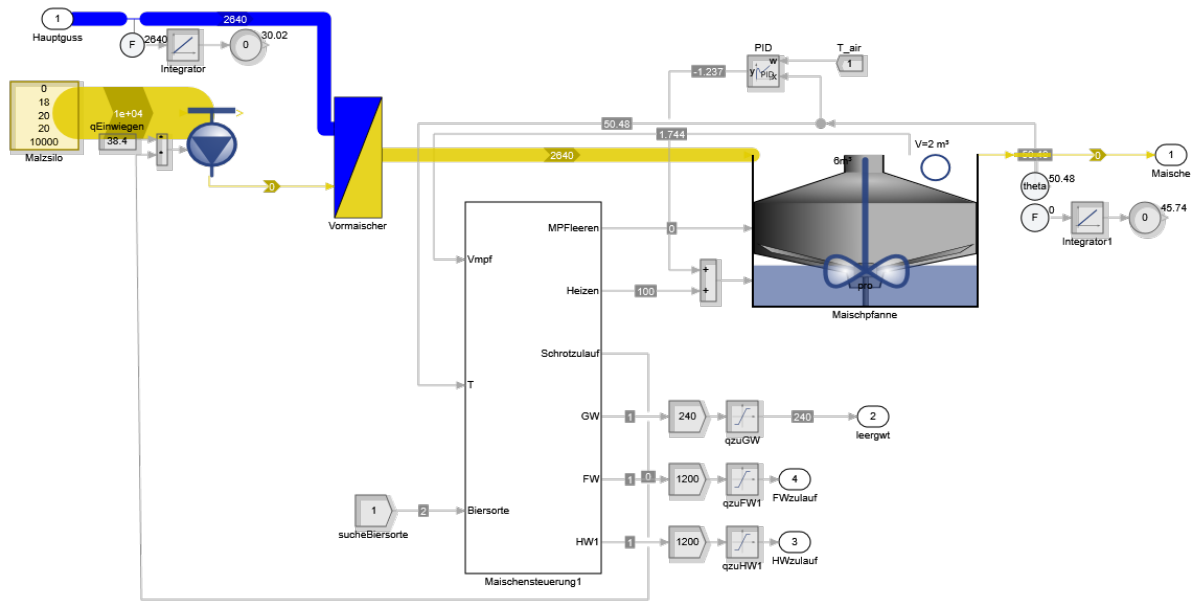


Abbildung 23: Modell der Maischpfanne beim Einmischen (Zeitpunkt t = 1,27 d)

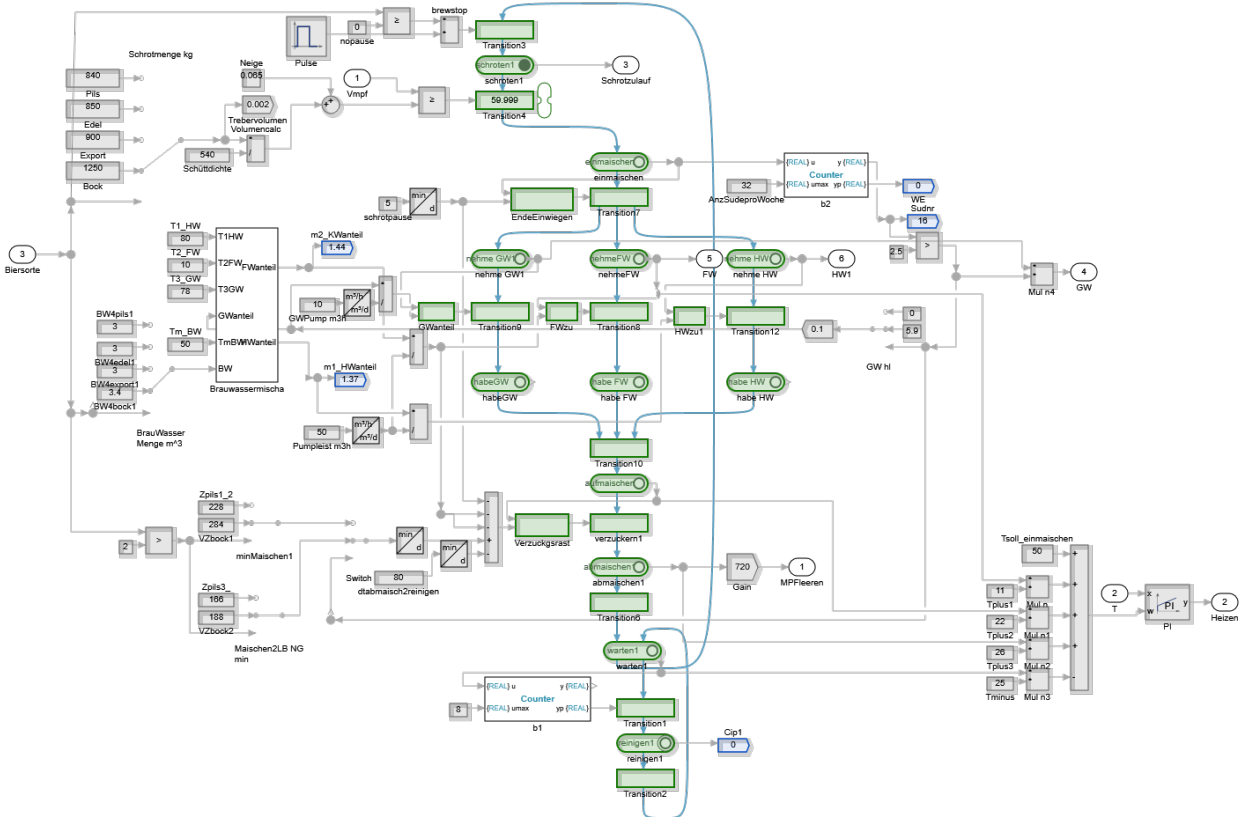


Abbildung 24: Maischesteuerung

Die entsprechenden Abbildungen für den Läuterbottich finden sich im Anhang (Abb. A7 u. A8).

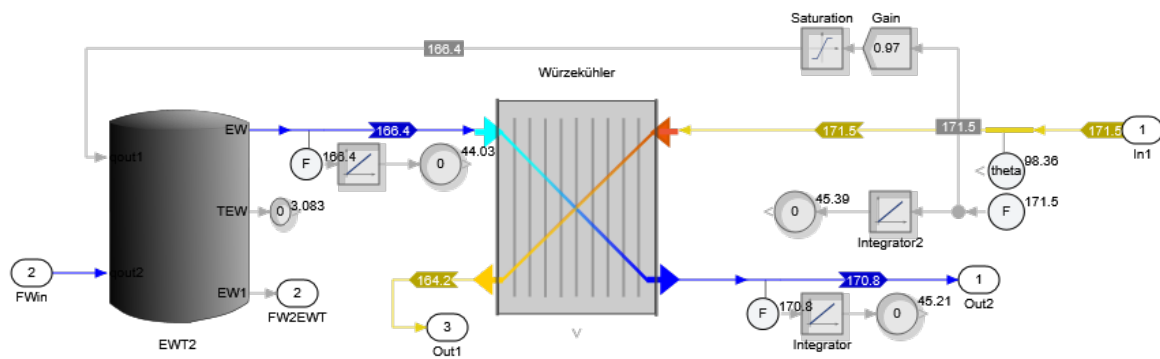


Abbildung 25: Modell mit Eiswassertank und Würzekühler (Zeitpunkt t = 1,27 d)

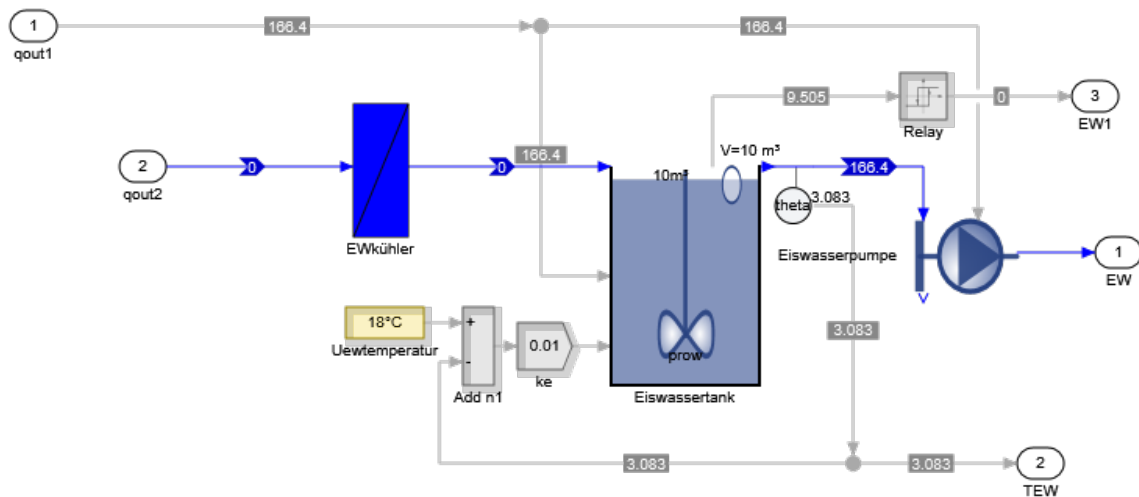


Abbildung 26: Modell von Eiswassertank und Eiswasserkühler (Zeitpunkt t = 1,27 d)

1.6.5 Simulationsergebnisse am Beispiel Sudhaus

In den Abbildungen 27 bis 30 sind zur Verdeutlichung einige ausgewählte Simulationsergebnisse als Zeitverläufe über zwei Tage und für eine Woche dargestellt.

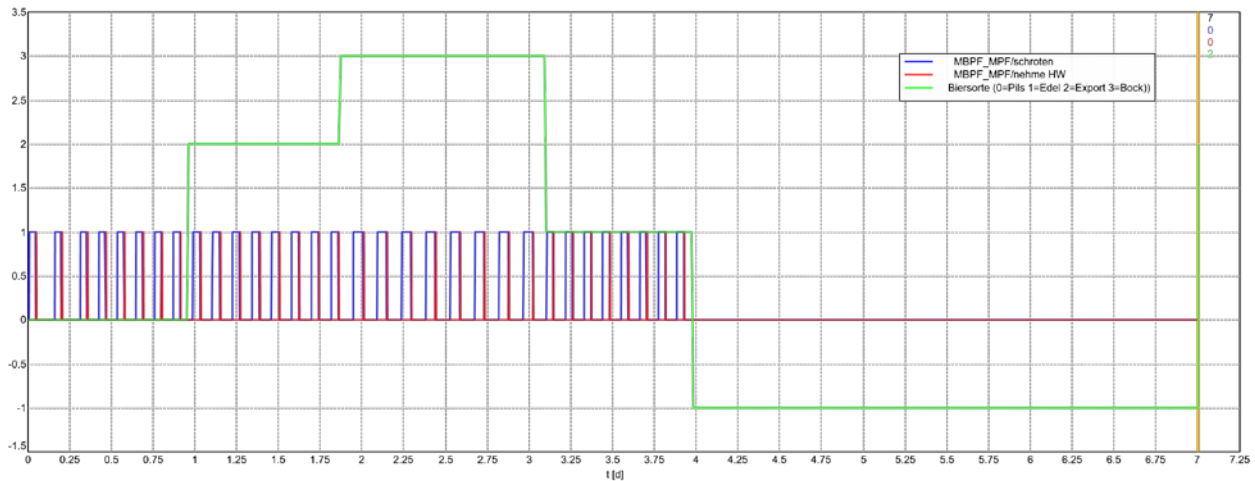


Abbildung 27: Zeitverläufe beim Einmischen und Sudplan für eine Woche (Montag – Sonntag)

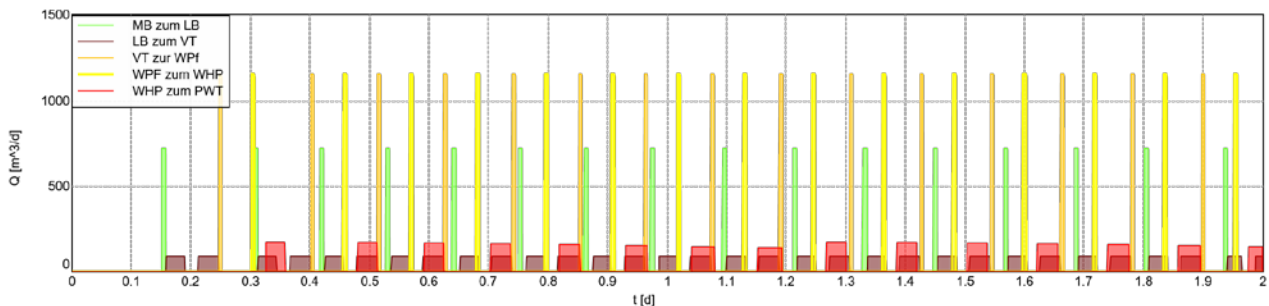


Abbildung 28: Produktströme zwischen den Sudgefäßen (Montag – Dienstag)

Für den Läuterbottich ist das Simulationsergebnis im Anhang zu finden (Abb. A9).

Nach einem identischen Schema lassen sich auch beispielsweise die Belegung des Glattwassertanks, des Vorlaufgefäßes, der Würzepfanne und des Whirlpools simulieren (Ergebnisse nicht gezeigt). Die Auswirkungen auf die Reserven für Eiswasser, Frischwasser und Heißwasser zeigen die Abbildungen 29 bis 31.

Die ausgewählte Simulationsplattform kann um Modellblöcke und Modellgrundlagen für Prozesse der Brauerei erweitert werden. Mit den aufgebauten Simulationsmodellen werden neben verfahrenstechnischen Details auch Fragen der Betriebsführung und insbesondere Steuerungs- und Regelungsvarianten untersucht.

Dynamische Simulationsmodelle können Produktionsprozesse einer Brauerei mit Wasser- und Energieströmen und -verbrauch abbilden und zur Planung, Steuerung bzw. zur Verbesserung des Betriebes eingesetzt werden. Eine Berechnung des wesentlichen Frischwasserbedarfs ist für ausgewählte Produktionsabschnitte einer Brauerei unterschiedlich detailliert möglich. Die Prozesse im Sudhaus können mit der Belegung der Gärbehälter und der Ablaufsteuerungen mit Minutenwerten (je Biersorte, Rezept) abgebildet werden. Im Simulationsmodell werden die Wasserbilanzen geschlossen und das Zusammenspiel von Frischwassertank, Eiswassertank, Glattwassertank und Heißwassertank und Produktionsprozess im Sudhaus wird simuliert. Außerdem kann der Wasserbedarf der Abfüllung oder der CIP-Reinigungsprozesse über eine Excel-Datei in ein Simulationsmodell einbezogen werden.

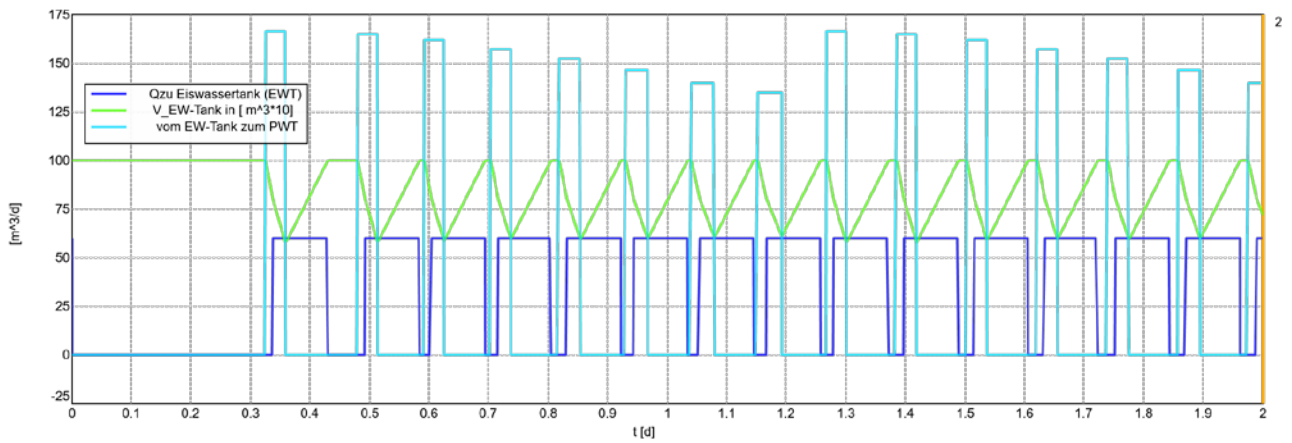


Abbildung 29: Eiswassertank (Montag-Dienstag)

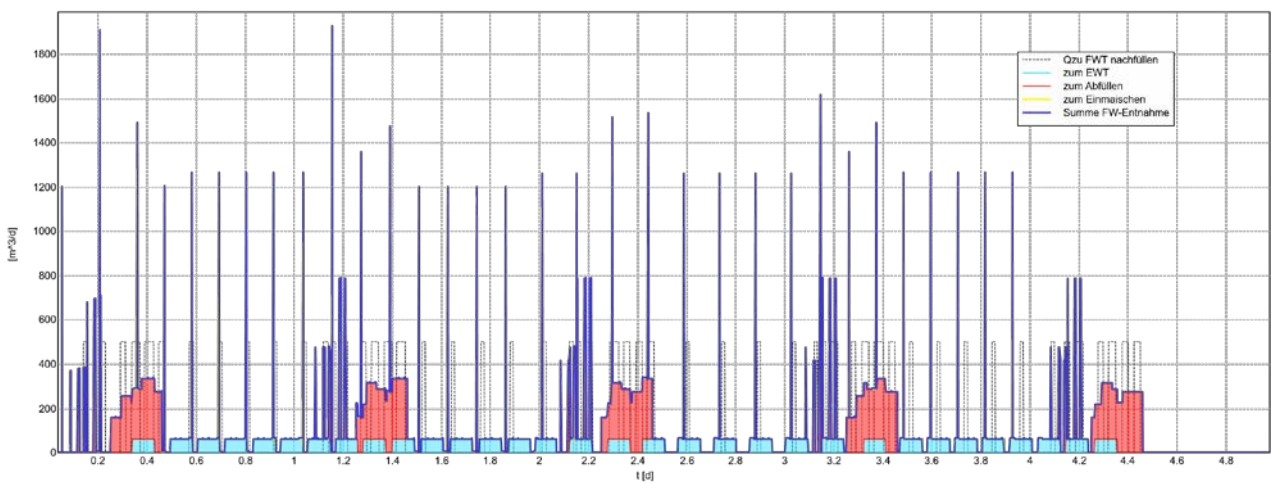


Abbildung 30: Zu- und Ablauf des Frischwassertanks (Montag bis Freitag)

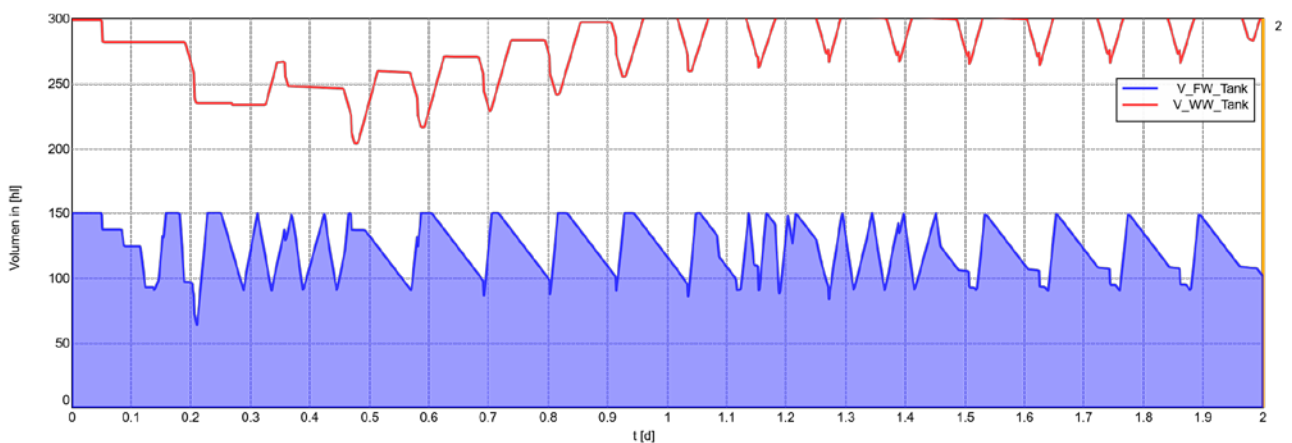


Abbildung 31: Volumen vom Frisch- und Warmwassertank (Montag-Dienstag)

Der Einsatz eines komplexen Gesamtmodells vom Produktionsprozess einer Brauerei als Basis zur Bewirtschaftung bzw. Ansteuerung einer Umkehrosmoseanlage in Echtzeit ist gegenwärtig nicht

praktikabel. Die Entwicklung einer stabilen Lösung für den harten Einsatz in einer mittleren Brauerei würde den Zeit- und Kostenaufwand eines FuE-Projektes sprengen.

2. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Der ermittelte Wasserbedarf der ausgewählten Beispielbrauerei liegt im Vergleich mit 4,6 hL/hL VB eher etwas hoch, da noch berücksichtigt werden muss, dass ein nennenswerter Teil des Bieres nicht vor Ort gebraut sondern lediglich abgefüllt wird. Derzeit wird der Wasserbedarf ausschließlich aus Stadtwasser, das in einer 20-m³-Reserve bevorratet wird, eingesetzt. Es erfolgt keine weitere Aufbereitung. Der Vergleich mit den Anforderungen macht deutlich, dass sowohl für Brauwasser als auch für Betriebswasser eine Aufbereitung anzuraten wäre. So liegt der Gehalt an Hydrogencarbonat über den Anforderungen für Brauwasser und die Gesamthärte ebenso über den Anforderungen für Betriebswasser. Da sich die Anforderungen an Brau- und an Betriebswasser unterscheiden, ist eine getrennte Bereitstellung sinnvoll, was allerdings in kleinen Brauereien aufgrund des Aufwandes häufig nicht realisiert wird. Insgesamt eignet sich die ausgewählte Brauerei aufgrund Ihrer Größe sehr gut für das Projekt und repräsentiert damit die klein- und mittelständischen Brauereien in Deutschland. Nicht gänzlich unüblich für diese Größe ist die in Bezug auf die Wasserversorgung nur rudimentäre Betriebsdatenerfassung. Es existieren lediglich zwei mechanische Zähler; eine automatisierte Datenaufnahme des Wasserverbrauchs findet nicht statt. Entsprechend aufwendig gestaltete sich die Ermittlung der für das Projekt erforderlichen Daten. Die ermittelten Verbrauchsdaten - differenziert nach den relevanten Wasserverbrauchern und nach dem zeitlichen Verlauf - bilden die rechnerische Basis für das Projekt. Insbesondere die Erfassung der zeitlichen Verläufe ist bislang in dieser Form noch nicht durchgeführt und in der Literatur beschrieben worden.

Die anschließende Wasserbedarfspriorisierung erlaubt die Fokussierung auf die wesentlichen Verbraucher im Sudhaus und in der Abfüllung. Somit ergibt sich ein Leitfaden für die weitere Vorgehensweise und gestattet die Festlegung einer gewünschten bzw. erforderlichen Differenzierungstiefe. Spätestens bei der Simulation, wie sie im Kapitel 1.6 beschrieben wurde, werden die Wasserströme auch schon bei verhältnismäßig kleinen Brauereien sehr komplex. Hier liefert die Bedarfspriorisierung eine wichtige Grundlage, den Aufwand zielgerichtet begrenzen zu können.

Die Größe einer Wasseraufbereitungsanlage ist nach unten grundsätzlich beschränkt durch den durchschnittlichen Wasserbedarf an einem Tag mit maximal möglicher Produktion; bei der Beispielbrauerei liegt dieser Wert bei rd. 6 m³/h. Diese minimale Größe erfordert eine große Reservekapazität, so wie es in Abbildung 5 dargestellt ist. Gerade bei kleinen Anlagen steigt die erforderliche Reservekapazität exponentiell an, sodass hier in Kombination mit einem niedrigen Minimalfüllstand Grenzen gesetzt sind. Auf der anderen Seite geht eine große Wasseraufbereitungsanlage zwar mit einer kleinen benötigten Reservegröße bei gleichzeitig hoher Versorgungssicherheit durch hohen Minimalfüllstand einher, allerdings steigt die Anzahl der Schaltzyklen deutlich an. Die Begrenzung für die Ausbringung der Wasseraufbereitungsanlage nach oben ergibt sich aus dem Maximalwasserstrom, der bezogen auf eine Minute Zeitintervall bei der Beispielbrauerei mit rd. 35 m³/h bestimmt werden kann. Neben hohen Investitionskosten für die Wasseraufbereitung sind damit auch höhere Wasserverluste durch das An- und Abfahren (s. Abb. 5) gegeben. Insofern muss ein Kompromiss hinsichtlich der Anlagengröße gefunden werden. Im

vorliegenden Projekt kommen hierzu die beiden Varianten A mit 10 m³/h und B mit 18 m³/h in den nachfolgenden Betrachtungen für die Beispielbrauerei zum Einsatz.

Die im Folgenden aufgegriffenen verschiedenen Algorithmen und Ansätze steigern sich im Aufwand schrittweise. Bezogen auf eine 10-m³/h-Anlage ergibt sich bereits durch die Nutzung einer Flexibilität der Wasseraufbereitung gegenüber dem reinen Ein-Aus-Betrieb (Algorithmus 1; zehn Schaltzyklen in 24 h) eine deutliche Verbesserung der Situation auf nur noch drei Schaltzyklen in 24 h (Algorithmus 2). Hierbei geht nur der Reservefüllstand als Eingangsgröße in den Algorithmus ein. Somit lässt sich diese Verbesserung bereits durch eine einfache Änderung der Steuerung mit minimalem Aufwand realisieren, wenn die UO auf eine flexible Fahrweise eingerichtet ist. Eine Prognose des Wasserbedarfs und damit eine Rückmeldung aus der Betriebsdatenerfassung werden auf dieser Stufe noch nicht benötigt, womit sich diese Möglichkeit für Betriebe wie die Beispielbrauerei ohne automatisierte Betriebsdatenerfassung anbietet. Beim Algorithmus 3 wird zum ersten Mal eine Bedarfsprognose verwendet, um die Ausbringung der Wasseraufbereitung einzustellen. Hierdurch werden Schaltzyklen in 24 h beim zugrunde gelegten Wasserbedarfstagesgang komplett vermieden. Die Anzahl der Eingangsinformationen lässt sich durch die vorab durchgeführte Bedarfspriorisierung überschaubar gestalten, kann aber auch je nach Bedarf beliebig bis zu den einzelnen Wasserverbrauchsstellen und deren zeitliche Verschachtelung weiter differenziert werden. Im einfachsten Fall genügen beispielsweise im Bereich Sudhaus für die Produktion die Abbildung der Eiswasserbereitung, der Maisch- und Läutervorgänge für die einzelnen Sude sowie für die Sudhausreinigung die wesentlichen Informationen zur CIP. Im Bereich Abfüllung ist es zunächst bereits ausreichend, einen durchschnittlichen Wasserbedarf pro Abfülllinie zu ermitteln, da dieser zeitlich bei Betrieb der Linie weitgehend konstant anzusetzen ist, ergänzt durch Wasserbedarfsinformationen während der Linien- oder Zwischenreinigung. Basis für die Erstellung einer kompletten Wochenganglinie ist die Produktionsplanung für Sudhaus, Filtration und Abfüllung. Kontinuierlich ergänzt werden muss während der Woche das Auftreten der relevanten Produktionsunterbrechungen, die beispielsweise im Sudhaus zu einer Verzögerung des Einmischens des nächsten Sudes oder bei der Abfüllung zur Unterbrechung einzelner Linien führt. Diese Informationen sollten möglichst kontinuierlich zur Verfügung stehen und automatisch in das Prognosetool übertragen werden. Sie können im Gegensatz zur Produktionsplanung nicht bereits im Vorfeld eingepflegt werden und erfordern daher einen erhöhten technischen Aufwand. Algorithmus 4 fußt auf identischen Voraussetzungen, setzt diese aber in einer anderen Art und Weise um. Der zugrunde liegende Gedanke basiert darauf, dass die Wasseraufbereitung primär nur die Wassermenge produziert, die laut Prognose in der kommenden Stunde benötigt wird. Diese Strategie ist anwendbar, da die Größe der Wasseraufbereitung in diesem Fall mit 18 m³/h gewählt wurde und damit über dem maximalen Stundenmittel von 17 m³/h liegt, sodass die Versorgung in jedem Fall gewährleistet ist. Darüber hinaus gleicht die Wasseraufbereitung ggf. auftretende Differenzen zu einem Reservefüllstand von 170 hl - entsprechend einem maximalen Stundenbedarf, der als zusätzliche Sicherheit bevorratet wird – aus. In der Folge läuft die Umkehrosmose jeweils für eine Stunde mit einer durchgängigen und konstanten und damit ruhigen Ausbringung, da der Sollwert nur im Stundenrhythmus aktualisiert werden muss. Unter den gegenüber Variante A ungünstigeren Randbedingungen – kleinere Reserve und damit größere Wasseraufbereitung – kann die Anzahl der Schaltzyklen auch hier deutlich von 24 auf sieben verringert werden. Ebenso lässt sich analog zum Vorgehen bei Algorithmus 3 durch eine Rückkopplung aus der Betriebsdatenerfassung die Prognose und damit die Stellgröße für die Wasseraufbereitung anpassen.

Einen etwas anderen Ansatz verfolgt die Regleroptimierung durch Simulationssoftware. Hierbei wird das Stellsignal für die Wasseraufbereitung an eine Wochenganglinie über eine Simulation angepasst, wobei die Ganglinie nicht unbedingt aus der Summe der Einzelverbraucher ermittelt werden muss. Vielmehr ergibt sich die Möglichkeit, über eine einfache Messung des Gesamtwasserbedarfs über einen möglichst langen Zeitraum am Ausgang der Wasserreserve die Datenbasis für die Simulation zu schaffen. Diese Daten liegen aufgrund der automatisierten Betriebsdatenerfassung in größeren Brauereien häufig bereits vor. Die eigentliche softwarebasierte Anpassung des Stellgrößenalgorithmus erfolgt während einer Simulation, die mehrere Durchläufe abbildet und somit virtuell über mehrere Wochen geht. Ein wesentlicher Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass, wenn die erforderlichen Wasserverbrauchsdaten vorliegen, die Anpassung rein virtuell in kurzer Zeit durchzuführen ist und erst anschließend und nach ausführlicher Prüfung in der Praxis umgesetzt wird. Es empfiehlt sich, den Stellgrößenalgorithmus während einer Erprobungsphase parallel laufen zu lassen, und die Realverbräuche in die Simulation einzuspeisen. Hierdurch kann unter Praxisbedingungen und unabhängig vom realen Reservefüllstand erprobt werden, ob beim Einsatz des angepassten Stellgrößenalgorithmus eine virtuelle Reserve leer laufen würde und so der Algorithmus noch nachjustiert werden muss. Interessant ist hier auch die Möglichkeit besonders für größere Brauereien, unterschiedliche Wasserqualitäten für z.B. Brau- und Betriebswasser, die über eine einzelne Umkehrosmoseanlage mit unterschiedlichem Verschnitt bereitgestellt werden, in der Simulation abzubilden. Bei dieser Fahrweise ergibt sich als weiterer Parameter für die Wasseraufbereitung die Möglichkeit einer variablen Priorisierung der verschiedenen Wasserqualitäten. Es ist somit insgesamt möglich, auch zusehends komplexere Randbedingungen wie zusätzliche Wasserreserven für die verschiedenen Wasserqualitäten durch einfache Messungen der Wasserverbräuche abzubilden, ohne unbedingt tiefer in den Prozess einsteigen zu müssen. Eine Rückkopplung von Störungen aus dem Prozess ist wie beim Algorithmus 2 zwar hilfreich, aber in der ersten Stufe noch nicht zwingend erforderlich.

Die Versuche zur Adaption der Umkehrosmose fanden in einer zweiten Brauerei statt, die sich durch eine deutlich schlechtere Rohwasserqualität auszeichnet (s. Tab. A1 im Anhang), woraus ein insgesamt relativ kleiner Rohwasserverschnitt von rd. 6 % resultiert. Insgesamt zeigt es sich, dass die Ausbringung der Anlage bis auf ca. 30 % ohne weitere Maßnahmen abgesehen von einer gezielten Erhöhung der Konzentratrezirkulation verringert werden kann. Hierfür ist die Umkehrosmose mit einer regelbaren Konzentratausschleusung (Regelventil und Durchflussmessung), einer regelbaren Konzentratrezirkulation (Rezirkulationspumpe mit Frequenzumformer und Durchflussmessung) und einem regelbaren Rohwasserzulauf (Hochdruckpumpe mit Frequenzrichter (FU) und Durchflussmessung) auszustatten. Während die mit einem FU ausgestattete HD-Pumpe und die Eingangsdurchflussmessung zum Standard einer UO-Anlage zur Wasseraufbereitung in einer Brauerei gehören sollten, sind die regelbare Konzentratausschleusung und –rezirkulation zusätzlich vorzusehen und erhöhen somit die Investitionskosten der WA. Bei einer weiteren Verringerung der Ausbringung ist es notwendig, die Membranfläche zum Erhalt der Permeatqualität zu verkleinern. Mit dieser Maßnahme ist es dann möglich, die minimale Ausbringung auf 20 % zu senken. Eine Spreizung der Ausbringung um den Faktor 5 ist daher mit überschaubaren technischen Mitteln möglich. Die Hochrechnung auf eine größere Anlage zeigt darüber hinaus, dass, solange die Membranfläche nicht aus Gründen der Erhaltung der Permeatqualität verringert werden muss, eine erhebliche Energieeinsparung von bis zu 40 % durch den geringeren Transmembrandruck erzielt werden kann. Der zusätzliche elektrische Energiebedarf der Rezirkulationspumpe spielt bei der Verringerung der Ausbringung nur eine

untergeordnete Rolle. Insgesamt ist der Aufwand zur Flexibilisierung der Ausbringung der Umkehrosmose überschaubar und erlaubt einen robusten Betrieb, wie in den Versuchen gezeigt werden konnte.

Die Implementierung einer Simulation der Brauerei, also die Abbildung aller relevanten Vorgänge in ihrem zeitlichen Verlauf, hier vorrangig auf die Wasserströme bezogen, birgt großes Potential. So ist es grundsätzlich möglich, die Implementierung der Steuerungs- und Regelungsfunktionen aus der Simulation direkt zur Steuerung des Prozesses zu nutzen. Dieses erfordert eine spezielle Laufzeitumgebung, beispielsweise die Installation der ifak FAST-Umgebung (ifak FAST [HB13]) einschließlich des Simulators auf einem Windows-PC und die Anbindung an das SCADA-System. Aufgrund der potentiell schlechteren Verfügbarkeit müssen außerdem SPS-basierte Fall-Back-Strategien vorgesehen werden. Dann können aber auch beliebige, komplexe, übergeordnete Steuerungen und Regelungen implementiert werden. Mit dieser Variante kann die im Projekt genutzte Simulationsumgebung in ein größeres System, welches Funktionalitäten wie Prozessabbild-Middleware mit SCADA-Anbindung, Zeitreihendatenbank, erweiterte Funktionen zum Bedienen und Beobachten und Komponenten zum Rechtemanagement und zur Sicherheit beinhaltet, eingebettet werden. Dieses große System ist für zukünftige FuE-Projekte für folgende Aufgabenstellungen geeignet:

- Simulator als Prozessersatz zum Test des Automatisierungssystems,
- Simulator als Prozessersatz für Bedienschulungen (Trainingssimulator),
- Laufzeitumgebung für aufwendigere Berechnungsfunktionen, u.a. Funktionen zur Sensorüberwachung, Fehlererkennung, Kennwertberechnung,
- Laufzeitsystem für übergeordnete Steuerungen und Regelungen, insbesondere auch modellbasierte Regler.

Ist die Brauerei komplett in einer Simulation hinterlegt, ergeben sich noch weitere Chancen, z.B. zur energetischen Optimierung. Sind die Energieverbrauchsdaten einer Anlage im Sinne eines Kennfeldes bekannt, so kann diese Information gezielt genutzt werden. Beispielsweise wäre es denkbar, dass als weiterer Eingangsparemeter für die Wasseraufbereitung berücksichtigt wird, ob gerade gegenüber der ursprünglichen Wochenplanung noch elektrische Leistung im Rahmen des beim Versorger angemeldeten Kontingents kostengünstig abgerufen werden kann oder sogar muss, oder ob im Gegenteil aufgrund des höheren Bedarfs anderer Verbraucher möglichst keine elektrische Leistung für die Wasseraufbereitung zur Verfügung gestellt werden sollte, um zusätzliche Kosten zu vermeiden. Übertragen auf den gesamten Betrieb und die Braubranche könnte somit in Stromüberschusszeiten verursacht durch das Einspeisen regenerativer Energien sogar eine Netzentlastung erreicht werden. Dieses setzt allerdings voraus, dass diese Information ständig aktuell vorliegt; nur dann kann ggf. noch vorhandener Spielraum genutzt werden. Allerdings ist anzumerken, dass, auch wenn die Implementierung einer vollständigen Simulation der Brauerei ein sehr wirkungsvolles Werkzeug für jedwede Form der Optimierung darstellt, der Aufwand der Implementierung jedoch erheblich ist und somit im Rahmen des vorliegenden Projektes nur ansatzweise betrachtet werden konnte.

Insgesamt stellt sich die Rückkopplung aus dem Prozess bei klein- und mittelständischen Brauereien derzeit noch schwierig dar. Dieses ist im Wesentlichen auf folgende Punkte zurückzuführen:

- die BDE ist unvollständig und es werden nicht alle Wasserverbraucher gemessen, d.h. nicht alle Störgrößen sind bekannt,
- die Online-Kopplung an die BDE der Brauerei ist derzeit technisch nicht (ausreichend) vorbereitet,
- häufig ist nur eine manuelle Ankopplung an die Wochenplanung von Produktion und Abfüllung möglich.

Das Modell kann zwar offline mit Excel-Dateien vom Produktionsplan (wann, welcher Sud bzw. welche Biersorte) und von der Abfüllung (Zeitpunkte und Wasserverbrauch) einen Tagesgang oder einen Wochengang des Frischwasserverbrauchs vom Sudhaus und der Abfüllung simulieren. Es kann aber nicht den Sudfortschritt oder aktuellen Messwerte (z.B. Füllstand im FW-Tank) oder bekannte Störgrößen berücksichtigen. Das Simulationsmodell kann z.Z. nicht online gekoppelt und mit dem aktuellen Zustand der Produktion abgeglichen werden und kann hier deshalb nicht als Basis für eine modellbasierte Regelung in Echtzeit dienen.

Wie beispielhaft am Sudhaus gezeigt ist es grundsätzlich möglich, die komplette Brauerei in ihrem zeitlichen Verlauf in einer Simulationsumgebung abzubilden. Dieses stellt zwar zunächst einen erheblichen Aufwand dar und erfordert eine Onlinekopplung zum Abgleich mit dem aktuellen Zustand der Produktion, ist aber auf der anderen Seite ein sehr wirkungsvolles Werkzeug zur Optimierung. So können diverse Szenarien inklusive Störungen bis hin zu Havarien durchgespielt werden und so verschiedene Ansätze wie die diversen Algorithmen aus Kapitel 1.3 auf ihre Robustheit auch unter verschärften Randbedingungen im Vorfeld der eigentlichen Implementierung untersucht werden. Eine Optimierung während des laufenden Betriebes mit den damit verbundenen Risiken wie z.B. ein unbeabsichtigtes Leerlaufen der Reserve kann somit umgangen werden. Auch ist es möglich, wesentlich schneller die Ergebnisse zu erzielen, da die Simulation beschleunigt ablaufen kann.

3. ÖKOLOGISCHE, TECHNOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNG / ZUSÄTZLICHE UMWELTENTLASTUNG

Wassereinsparung

Es konnte gezeigt werden, dass im konkreten Fall der Beispielbrauerei mit einer Jahresproduktion von 78.000 hl Bier durch die Nutzung einer flexiblen Ausbringung der UO (Algorithmus 2) die Anzahl der täglichen An- und Abfahrereignisse von ursprünglich zehn auf drei verringert werden kann und bei zusätzlicher Nutzung einer Bedarfsprognose der jeweils folgenden 90 min diese sogar komplett eliminiert werden. Der maximale Tageswasserbedarf – zugrunde gelegt wurde als Worst-Case-Szenario eine maximale Tagesproduktion – liegt bei 146 m³. Somit würde die Wasseraufbereitung bei einer üblicherweise eingestellten Ausbringung von 100 % (10 m³/h) ca. 14,5 h laufen. Der Wasserbedarf pro Spülvorgang für das An- und Abfahren beträgt unter günstigen Bedingungen (wenig Vermischung des Rohwassers mit dem auszuschiebenden Konzentrat, wenig aufgrund des Vordrucks auch ohne Betrieb der Hochdruckpumpe entstehendes Permeat) ca. 0,75 m³. Dieser Wert ergibt sich aus dem Totvolumen der Module (10 * 30 l) sowie einem Aufschlag für Rohrleitungen von 25 % multipliziert mit Faktor 2 für das An- und Abfahren. Bei der Versuchsanlage wurde der theoretische Wert allerdings überschritten, wie am nur langsamen Verlauf der Leitfähigkeit im Konzentratablauf beim Abfahren erkannt werden konnte. Eine gewisse

Verbesserung kann durch das Absperrern der Permeatleitungen der einzelnen Bänke während des Spülvorgangs beim Abfahren erzielt werden (s. Kapitel 1.5.4). Die täglichen Spülverluste summieren sich somit für den konkreten Fall über einen Tag auf 7,5 m³ (10 Spülvorgänge * 0,75 m³/Schaltzyklus) für die einfache An-Aus-Fahrweise (Algorithmus 1) bzw. 2,3 m³/Tag (Algorithmus 2 mit drei Schaltzyklen) respektive keinen Wasserverlusten (Algorithmus 3). Beim Vergleich der drei Algorithmen ist der Verschnitt zu beachten. Dieser führt dazu, dass die Bruttoausbeute über der reinen Permeatausbeute von 90 % liegt. Darüber hinaus ist der Verschnitt bei den Algorithmen 2 und 3 nicht konstant, sondern bedingt durch die sich bei niedrigerer Ausbringung verschlechternde Permeatqualität im Schnitt geringer. Bezogen auf den schon mehrfach erwähnten Tagesgang ergeben sich die in der Tabelle 3 aufgeführten Bruttoausbeuten mit den korrespondierenden täglichen Konzentratvolumina. Addiert man zu diesen die An- und Abfahrverluste, so lassen sich aus dieser Summe die Nettoausbeuten berechnen (s. Tab. 3).

Tabelle 3: Zusammenstellung Ausbeute, Basis 146 m³/Tag und WA 10 m³/h

	Bruttoausbeute*	Wasserverluste			Nettoausbeute**
		Konzentrat	An-/Abfahren	Summe	
	(%)	(m ³ /Tag)	(m ³ /Tag)	(m ³ /Tag)	(%)
Algorithmus I	90,6	15,2	7,5	22,7	86,5
Algorithmus II	90,5	15,4	2,3	17,7	89,2
Algorithmus III	90,4	15,5	0	15,5	90,4
*: unter Berücksichtigung Verschnitt					
**: Berücksichtigung sämtlicher Wasserverluste					

Die Erhöhung der Nettoausbeute um 4-%-Punkte ist erheblich, verringert sich hierdurch doch die Abwassermenge um knapp 30 %. Dazu kommt, dass eine Erhöhung der reinen Permeatausbeute in diesem Bereich wenn überhaupt nur noch mit sehr hohem Aufwand realisiert werden kann, da mit jedem Prozent Ausbeutesteigerung die Konzentratkonzentration überproportional ansteigt und so der Aufwand zur Verhinderung von Scaling entsprechend größer wird. Eine Ausbeuteerhöhung liegt damit faktisch nicht im Bereich des Möglichen.

Auf den Jahreswasserbedarf von 36.000 m³ (s. Kap. 1.1.1) hochgerechnet würde schon die relativ kleine Beispielbrauerei im Jahr mit Algorithmus 2 in der Summe 1230 m³ Frisch- und Abwasser sparen; durch eine Implementierung des Algorithmus 3 steigert sich dieser Wert auf 1780 m³/a. Dieser Hochrechnung liegt als konservative Annahme der Tagesgang des Worst-Case-Szenarios mit dem maximalen täglichen Wasserbedarf zugrunde, sodass die Wasseraufbereitung schon mit Algorithmus 1 relativ lange durchläuft. Die Anzahl der Schaltzyklen dürfte sich in Schwachlastphasen eher noch deutlich erhöhen und damit das Einsparpotential nochmals ansteigen. Allein der Vergleich mit der in Kapitel 1.3.1 beschriebenen Variante B (größere Wasseraufbereitung bei kleinerer Reserve) erhöht für denselben Tagesgang die Anzahl der Zyklen im An-Aus-Betrieb bereits auf 24 (s. Kapitel 1.3.1) und die Anzahl der Schaltzyklen mit Algorithmus 4 verringert sich um 17 Stck. (s. auch Kap. 1.3.4). Die Einsparungen verfügen über das Potential, die benötigten Investitionen in die Umkehrosmoseanlage (s. Kap. 2) und ggf. die Datenerfassung in kurzer Zeit zu amortisieren.

Deutschlandweit beträgt das Wassereinsparpotential für Brauereien durch Flexibilisierung der Umkehrosmoseanlagen zur Brau- und Betriebswasseraufbereitung bei vorsichtiger Schätzung unter der Annahme der Anwendbarkeit bei einem Viertel der Bierproduktion mindestens 500.000 m³/Jahr.

Energieeinsparung

Eine bis zu 40%ige Energieeinsparung durch einen verringerten Flux ist im Teillastbetrieb bei 30 – 40 % der Nennausbringung erzielbar, was im Fall der angesetzten 10-m³/h-Anlage einer Verringerung des spezifischen elektrischen Energiebedarfs von 0,42 kWh/m³ auf 0,24 kWh/m³ entspricht (s. Kap. 1.5.3). Bezüglich der Umsetzung der Energieeinsparung ist allerdings zu beachten, dass im Laufe des Tages die Ausbringung der Anlage nach Bedarf angepasst wird und sie somit nicht immer im energetisch gesehen sparsamsten Bereich laufen kann. Unter Zugrundelegung der sich aus den Algorithmen 1 bis 3 ergebenden Ausbringungsprofile (s. Abb. 6 bis 8) und der in Abbildung 21 dargestellten Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs von der Ausbringung lassen sich die momentanen Leistungsaufnahmen der Wasseraufbereitung für diese drei Fälle über einen Tag ermitteln. Das Ergebnis des Verlaufs für die 10-m³/h-Anlage ist in Abbildung 32 dargestellt. Die Fläche unter den jeweiligen Kurven entspricht hierbei der im Laufe des Tages insgesamt aufgenommenen elektrischen Energie, die wiederum in Bezug zur produzierten Tageswassermenge von 146 m³ gesetzt werden kann. Somit ergeben sich die durchschnittlichen elektrischen Energiebedarfe von 0,42 kWh/m³ für die Fahrweise mit Algorithmus 1 (ein/aus), 0,37 kWh/m³ mit Algorithmus 2 (Nutzung nur der Flexibilisierung) und 0,35 kWh/m³ mit Algorithmus 3 (Flexibilisierung und Bedarfsprognose 90 min). Die Energieeinsparungen liegen damit bezogen auf Algorithmus 1 bei 12 % (Algorithmus 2) bzw. 17 % (Algorithmus 3). Hochgerechnet auf den Jahreswasserbedarf des Beispielbetriebes von 36.000 m³ ließen sich somit 1800 kWh (Algorithmus 2) bzw. 2520 kWh einsparen (Algorithmus 3).

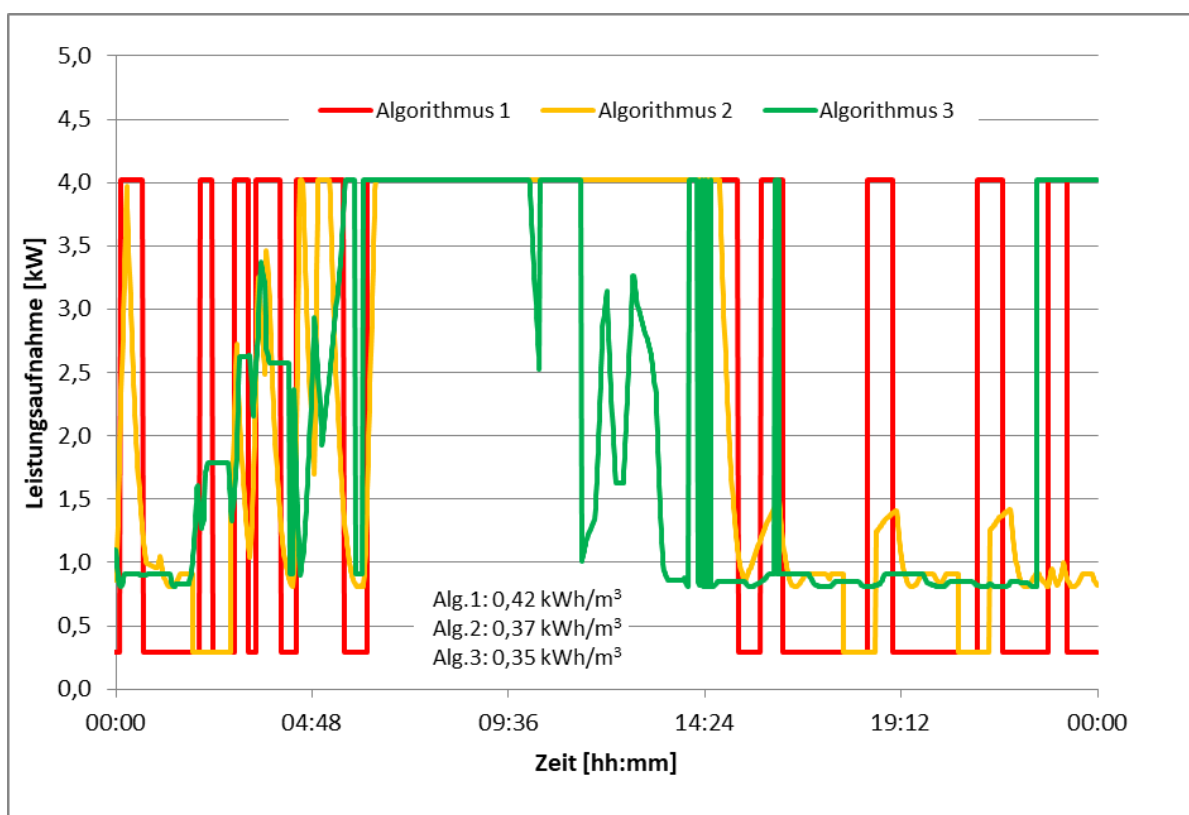


Abbildung 32: Leistungsaufnahme WA bei verschiedenen Algorithmen, Hochrechnung Anlage 10 m³/h

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 4: Zusammenfassung Einsparpotential Wasser und elektrische Energie, WA 10 m³/h

	Nettoausbeute	spez. elektrischer Energiebedarf
	(%)	(kWh/m ³)
Algorithmus I	86,5	0,42
Algorithmus II	89,2	0,37
Algorithmus III	90,4	0,35

Nicht berücksichtigt sind hierbei die Einsparungen, die sich aus einer weiteren Optimierung durch die Anwendung der Simulation ergeben können (s. Kapitel 1.6).

4. MAßNAHMEN ZUR VERBREITUNG DER VORHABENSERGEBNISSE

Der Antragsteller EUWA H.H. Eumann GmbH hat ebenso wie der Kooperationspartner Thorsis Technologies GmbH (ehemals ifak) ein direktes geschäftliches Interesse an der Umsetzung der Erkenntnisse des Projektes in Brauereien und anderen Betrieben der Lebensmittelbranche.

Der Kooperationspartner VLB Berlin ist ein Verein, der durch ca. 400 Mitgliedsbrauereien und – mälzereien sowie weitere Förderer aus Zuliefer-, Getränkeindustrie und Getränkehandel getragen wird. Die Mitglieder sind überwiegend mittelständische Unternehmen. Die VLB verlegt für ihre Mitglieder und auch andere Interessenten eine eigene Zeitschrift und veranstaltet regelmäßig Fachtagungen; auf denen Forschungsergebnisse publiziert werden. Weiterhin werden Arbeitsergebnisse auf der eigenen Homepage und in einem monatlich erscheinenden Newsletter mit ca. 8.000 Adressaten der Fachöffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Die VLB unterhält für ihre Mitglieder verschiedene Fachgremien, in denen regelmäßig aktuelle Forschungsergebnisse mit Experten der Industrie diskutiert werden, um weitere Anregungen zur Fortsetzung der Arbeiten zu erhalten. In diesem Zusammenhang sind die Technisch-wissenschaftlichen Ausschüsse (TWA) zu den Themenschwerpunkten:

- a) Abfüllung, Verpackung und Betriebstechnik;
- b) Umwelt-/ Ressourcenmanagement und Arbeitssicherheit;
- c) Produktion/ Brautechnik;
- d) Qualitätswesen und Analysetechnik sowie
- e) Rohstoffe, Mälzerei und Hopfenveredlung zu nennen.

Im TWA Umwelt-/Ressourcenmanagement und Arbeitssicherheit wurde das Projekt bereits vorgestellt.

Des Weiteren sind die Kooperationspartner Hochschule Fulda und VLB Berlin bestrebt, die Ergebnisse des Forschungsvorhabens im Rahmen von Publikationen in entsprechenden Fachzeitschriften und auf Vortragsveranstaltungen sowie Seminaren zu veröffentlichen. Darüber hinaus fließen die aus dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse als mögliche Inhalte in die durch den Projektpartner Hochschule Fulda zu gewährleistende Lehre am Fachbereich Lebensmitteltechnologie und in die branchenbezogene Ausbildungs- und Beratungstätigkeit des Kooperationspartners VLB Berlin mit ein.

VIII. FAZIT

Wasser- und Energieeinsparung in relevanter Größenordnung ist durch eine flexible, über eine Prognose abgesicherten Fahrweise einer Umkehrosmoseanlage in Brauereien realisierbar. Hierbei bietet sich eine abgestufte Fahrweise an, die in der Reihenfolge steigenden Aufwands wie folgt aussieht:

- fundierte Auslegung der Wasseraufbereitung und Abstimmung der Reservegröße,
- Fahren der Umkehrosmose mit flexibler Ausbringung in Abhängigkeit des Reservefüllstandes,
- flexibilisierte Fahrweise der Umkehrosmose ergänzt durch eine Rückkopplung aus der Produktion (→ aktualisierte Bedarfsprognose),
- weitergehende Regleroptimierung zur Festlegung der aktuellen Ausbringung der Wasseraufbereitung,
- weitergehende Optimierung durch Abbildung der Brauerei inklusive der Produktströme in einer Simulationsumgebung.

Wesentlich und neu sind die differenzierte Abbildung des zeitlichen Verlaufs des Wasserbedarfs und die Addition zu Tagesganglinien. Auf den hieraus gewonnenen Erkenntnissen fußen die Berechnungen zur Versorgungssicherheit sowie zu den angewandten Algorithmen. Gerade die abgestuften Algorithmen bestechen durch ihre Einfachheit und damit durch eine nur geringe Hürde zur Implementierung. So ist es zunächst nur notwendig, den momentanen Reservefüllstand einzupflegen. Auch im weiteren Schritt mit Rückkopplung sind die erforderlichen Ganglinien mit einem Minimum an Informationen zu erstellen. Hier leistet die durchgeführte Bedarfspriorisierung einen entscheidenden Beitrag.

Ein größeres Hemmnis bei klein- und mittelständischen Brauereien stellt das Einpflegen von Produktionsplanungsdaten und die Anbindung und damit automatische Rückmeldung aus dem Prozess dar. An dieser Stelle ist das Projekt hinter seiner ursprünglichen Zielsetzung zurückgeblieben. Hierfür sind noch praktische Lösungen zu erarbeiten und umzusetzen. Auf der anderen Seite sind der weiteren Optimierung unter Zuhilfenahme eines größeren Aufwandes praktisch keine Grenzen gesetzt. Weitere zu verarbeitende Informationen betreffen beispielsweise die gezielte Bevorzugung des energetisch optimalen Bereichs der Ausbringung der Umkehrosmose bei ca. 30 – 40 % oder auch die Differenzierung nach verschiedenen Wasserqualitäten mit jeweils weiteren Reserven, die in die Betrachtungen mit eingeschlossen und als weitere Puffer genutzt werden können. Als noch darüber hinausgehender Schritt könnten auch externe Informationen wie beispielsweise der aktuelle Strompreis mit als Eingangsparameter eingepflegt und nicht zeitkritische Anlagen - wie zu begrenzten Zeiten möglicherweise auch die Wasseraufbereitung - entsprechend betrieben werden. Gerade vor dem Hintergrund der sinnvollen Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien in Zeiten des Überschusses an sonnigen und windigen Tagen kann die flächendeckende Implementierung eines solchen Systems in den Betrieben einen nennenswerten Beitrag im Hinblick auf die Speicherproblematik leisten. Hierfür kann eine Komplettsimulation, wie sie im vorliegenden Projekt nur angerissen werden konnte, ein ausgesprochen hilfreiches Werkzeug darstellen, das hilft, mögliche Probleme im Zusammenhang mit der flexiblen Fahrweise von Anlagen generell frühzeitig zu erkennen und zu eliminieren.

IX. LITERATURVERZEICHNIS

- [Ahr04] Ahrens A., BRAUWELT, Nr. 13/ 14, 384-390, 2004
- [AiF14] AiF-ZIM KF 2132331 SK 3: Computergestütztes Wassermanagement, 08.2012-07.2014
- [Ale10] Alex, J., Eine neue Simulationsplattform zum integrierten Prozess- und Automatisierungsentwurf abwassertechnischer Systeme.at, 2010
- [BB13] Blumenhofer V., Groß F., Delgado A. und Becher F.-A., BrewingScience, Vol. 66, 136-143, 2013
- [DWA10] DWA-Regelwerk, Merkblatt DWA-M 732, 2010
- [GR11] Götz G., Geissen S.-U., Ahrens A., Reimann S., Brauindustrie, Nr. 10, S. 36-39, 2011
- [GM09] Greenlee L. F., Lawler D. F., Freeman B. D., Marrot B. und Moulin P., Water Research, 43, 2317-2348, 2009
- [HB13] Hübner, C., Thron, M., Alex, J., Bangemann, T.: Aktor-basierte Middleware-Plattform für fehlertolerante, verteilte SCADA-Systeme. AUTOMATION 2013, 25.-26.06.2013, Baden-Baden, VDI Wissensforum GmbH, ISBN 978-3-18-092209-6, 2013
- [HKG] Hien O., Küpferling E. und Guggeis H., BRAUWELT, Nr. 23, 640-643, 2008
- [Kun07] Kunzmann C., Hannoversche Industrieabwasser-Tagung – Brauerei-Seminar, Nr. 10, Tagungsband, 125-154, 2007
- [IEC02] IEC 61131-3: Programmable controllers – Part 3: Programming languages, 2nd Edition, International Electrotechnical Commission, Genf, 2002
- [Kun06] Kunzmann C., Brauindustrie, Nr. 3, 24-27, 2006
- [KA05] Kunzmann Ch., Schneider J., Schildbach S. und Ahrens A., BRAUWELT, Nr. 21, 624-631, 2005
- [KA04] Kunzmann Ch., Orzinski M., Schildbach S. und Ahrens A., BRAUWELT, Nr. 41/42, 1240-1246, 2004
- [Mei06] Meiser R., Getränkeindustrie, Nr. 2, 8-11, 2006
- [Mei09] Meiser R., Getränkeindustrie, Nr. 9, 42-44, 2009
- [Mom07] Momsen J., BRAUWELT, Nr. 40, 1098-1100, 2007
- [SE12] Schildbach S. und Eumann M., J. Inst. Brew., 118, 12-21, 2012
- [SK00] Schildbach S. und Kähm V., BRAUWELT, Nr. 33/34, 1333-1336, 2000
- [Sch93] Schu G. F., BRAUWELT, Nr. 40, 2026-2035, 1993
- [Sta03] Stammel V., Brauindustrie, Nr. 3, 36-37, 2003
- [Unt99] Unterstein K., BRAUWELT, Nr. 13/ 14, 567-569, 1999
- [VRG11] Verhülsdonk M., Rieck K.-L. und Glas K., BrewingScience, Vol. 64, 41-45, 2011
- [WGP05] Walter S., Glas K. und Palar H., BRAUWELT, Nr. 33, 972-976, 2005

[Wal05] Walter S., Untersuchung verfahrenstechnischer Möglichkeiten zur Brauchwasserkreislaufführung in der Brauerei Dissertation, Technische Universität München, 2005

X. ANHANG

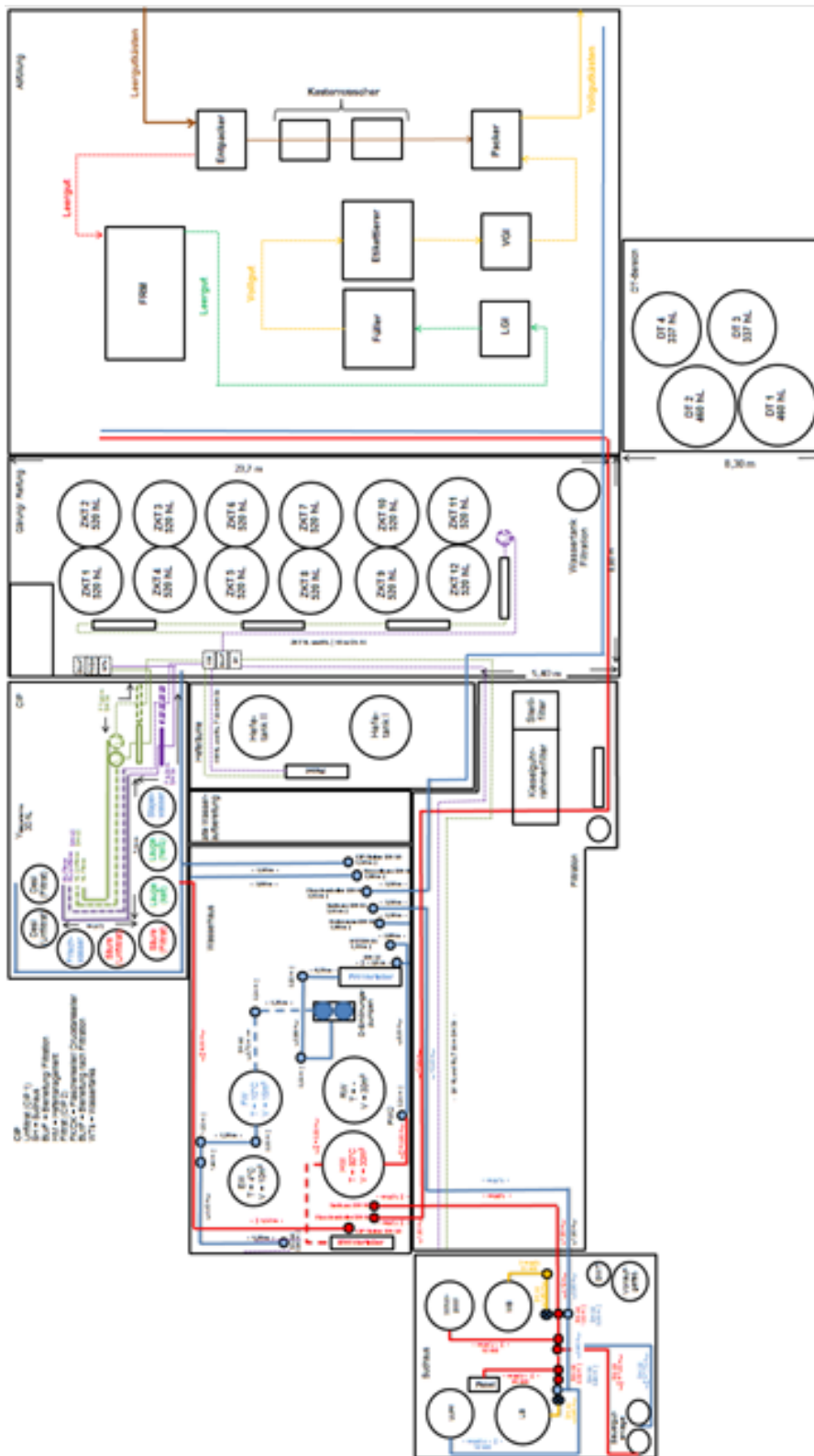


Abbildung A1: Grundriss der Beispielbrauerei

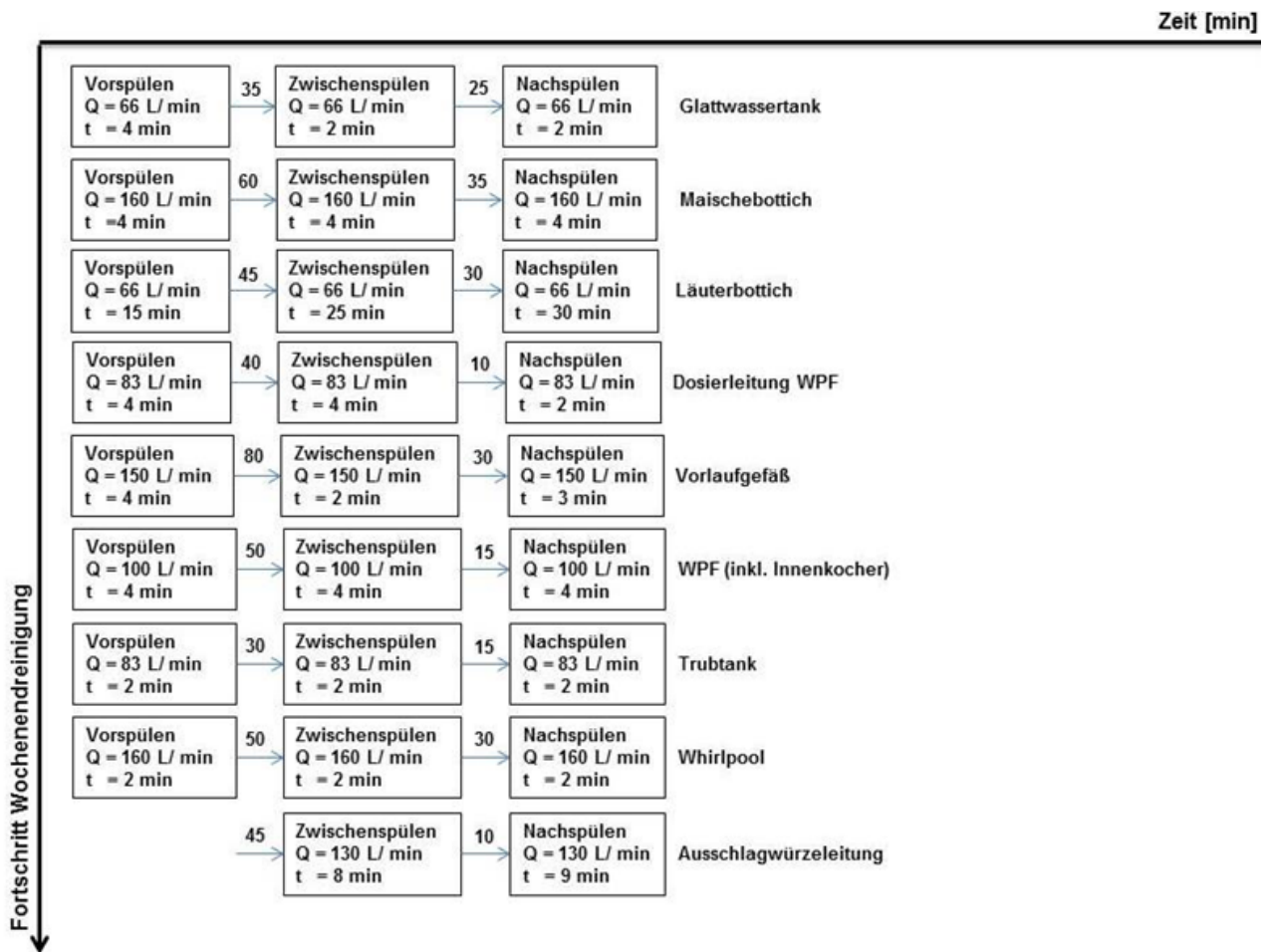


Abbildung A2: Zeitbezogener Wasserbedarf - CIP (Teil I, Sudhaus) mit WPF = Würzepfanne

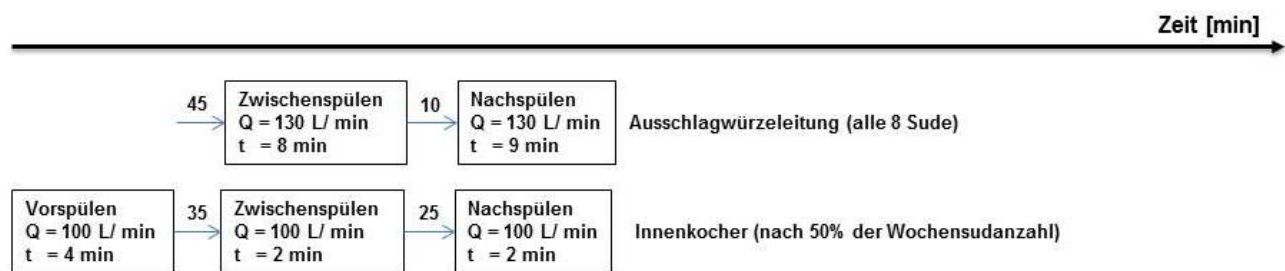


Abbildung A3: Zeitbezogener Wasserbedarf – CIP (Teil II, Sudhaus)

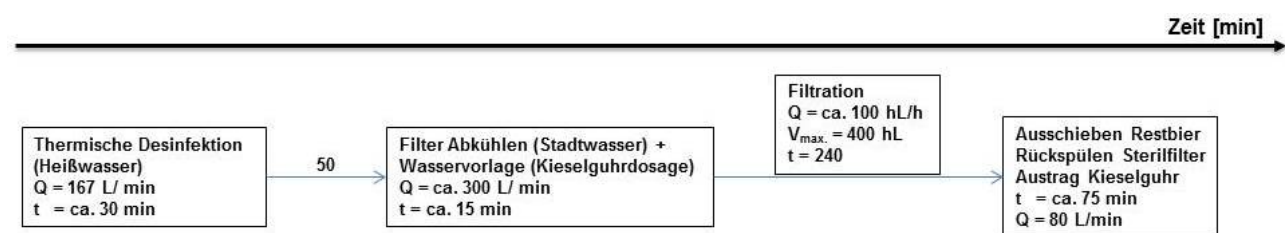


Abbildung A4: Zeitbezogener Wasserbedarf - Filtration



Abbildung A5: Zeitbezogener Wasserbedarf - Abfüllung

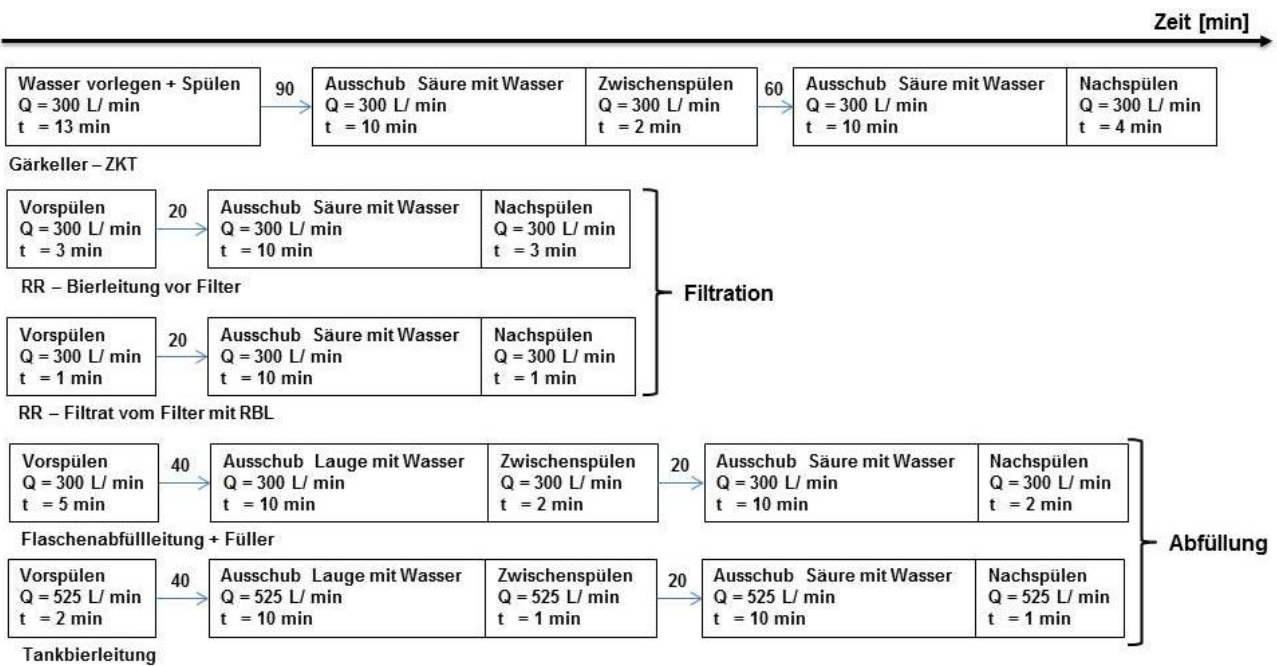


Abbildung A6: Zeitbezogener Wasserbedarf - CIP (Teil III)

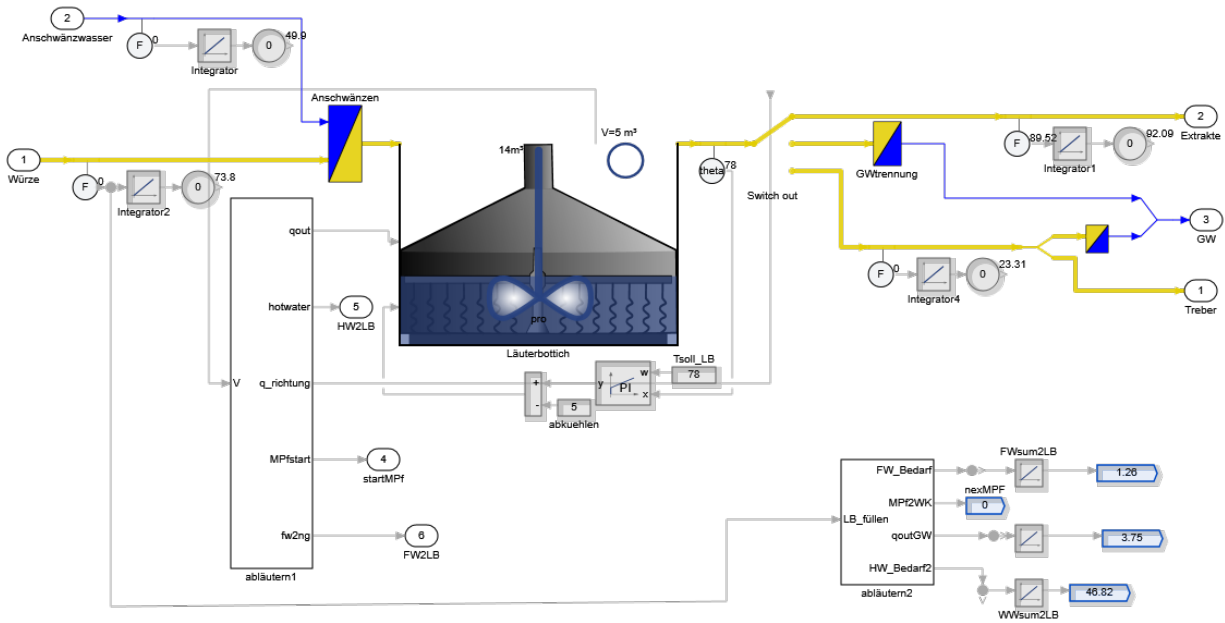


Abbildung A7: Modell vom Läuterbottich

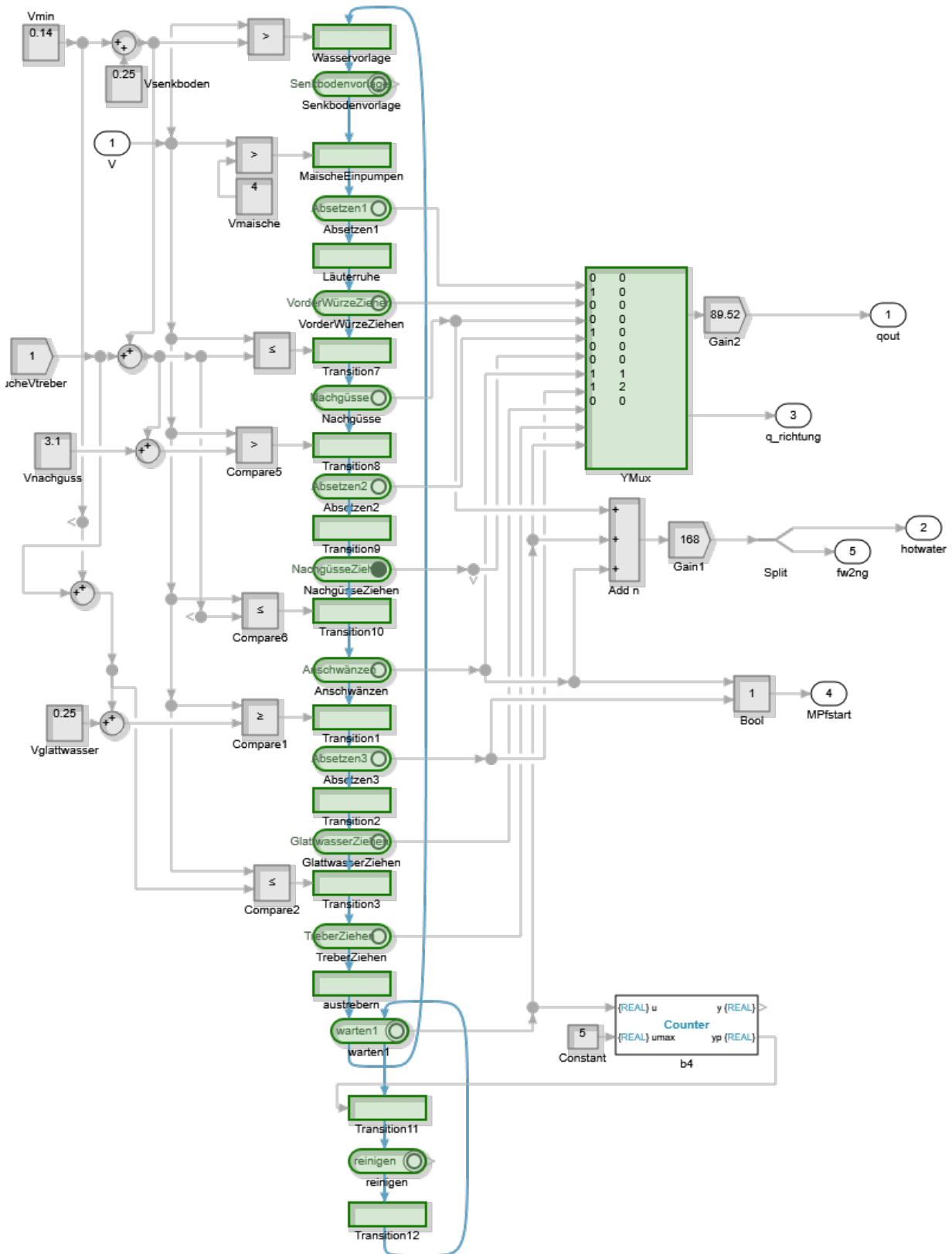


Abbildung A8: Steuerung Läuterbottich

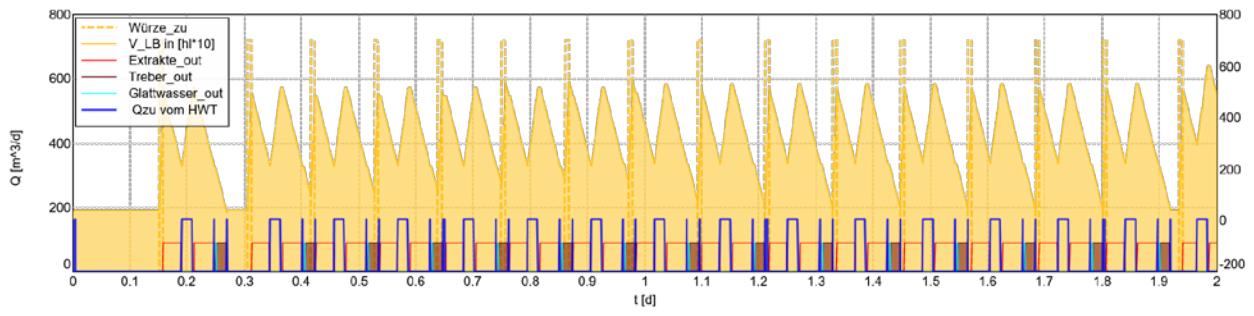


Abbildung A9: Zeitverläufe vom Läuterbottich (Montag – Dienstag)

Tabelle A1: Rohwasserqualität Beispielbrauerei (Stadtwater) bzw. am Standort der VA (Brunnenwater nach Enteisung / Entmanganung) im Vergleich zu den Anforderungen für Brau- bzw. Betriebswater

		Beispiel-	Brauerei	Anforderungen	
		brauerei	Standort VA	Brauwater	Betriebswater
pH-Wert	[]	7,78	7,11	5,0 - 9,5	
Leitfähigkeit	[µS/cm]	388	862		
Calcium	[mg/l]	61,4	103	70 - 90	
Magnesium	[mg/l]	4,3	44	0 - 10	
Gesamthärte	[°dH]	9,6	24,7		2,8 - 5,0
Natrium	[mg/l]	11,3	16,7	0 - 20	0 - 200
Kalium	[mg/l]	1,6	2,3		
Ammonium	[mg/l]	< 0,01	< 0,05	0,0 - 0,5	0 - 0,5
Hydrogencarbonat	[mval/l]	1,9	5,52	0,2 - 1,0	
Chlorid	[mg/l]	19,1	86,6	20 - 80	0 - 50
Sulfat	[mg/l]	76,0	63,3	30 - 150	0 - 250
Nitrat	[mg/l]	< 1	21,5	0 - 25	0 - 50

Tabelle A2: Beispielbetrieb - Zusammenfassung der Betriebsdatenerfassung für den Rohstoff Water

Produktionsbereich	Zählertyp	Anbindung an die BDE	Dokumentation
1.) Gesamt	mechanischer Zähler	-	monatlich (visuell)
2.) Sudhaus:			
2.1.) Maischen	-	-	Vorgabe (s. Sudbuch Rezepte)
2.2.) Läutern	-	-	Vorgabe (s. Sudbuch Rezepte)
2.3.) Würzekühlung	-	-	kalkulatorische Erhebung
3.) Gärung	-	-	-
4.) Filtration:			
4.1.) Sterilfahren	-	-	
4.2.) Kieselgur:			
4.2.1.) Anschwämmung	-	-	kalkulatorische Erhebung
4.2.2.) laufende Dosage	-	-	
4.3.) Filterreinigung	-	-	
5.) Abfüllung:			
5.1.) FlaReiMa	mechanischer Zähler	-	bei Bedarf (visuell)
5.2.) Kastenwascher	-	-	kalkulatorische Erhebung
5.3.) Bandschmierung	-	-	
6.) CIP	-	-	Vorgabe (s. Rezepte)

Tabelle A3: Theoretischer Wasserbedarf - Sudhaus Teil I

Hauptguss	V [hL]	FW-Anteil [hL]	HW-Anteil [hL]
Pils	30	13,08	16,92
Export	30	17,36	12,64
Bock	34	19,68	14,32
Nachgüsse	V [hL]	FW-Anteil [hL]	HW-Anteil [hL]
VB	28,2	0,83	27,37
Bock	33,6	0,98	32,61
Nachgüsse mit Glattwasser	V [hL]	FW-Anteil [hL]	HW-Anteil [hL]
VB	22,3	0,00	21,65
Bock	27,7	0,00	26,89

Tabelle A4: Theoretischer Wasserbedarf - Sudhaus Teil II

AW-Menge/ Sud	spez. WK Würze (12°P)	spez. Dichte (12°P)	Masse_{Würze}	Anstelltemp.	ΔT	Wärmemenge_{abführen}
[hL]	T = 100°C	T = 100°C				
	[kJ/(kg·K)]	[kg/m³]	[kg]	[°C]	[K]	[kJ]
53	3,987	1005,07	5327	10	80	1699059
	spez. WK_{H2O} für:	spez. Dichte für:	Masse_{Eiswasser}		ΔT	Eiswasserbedarf
	T = 4°C	T = 4°C				
	[kJ/(kg·K)]	[kg/m³]	[kg]		[K]	[m³]
	4,205	999,97	5317		76	5,3
						5,3

Tabelle A5: Theoretischer Wasserbedarf - CIP (gesamt)

Nr.	Produktionsbereich	Häufigkeit	Teilschritte	Wasserbedarf [m ³]
1.)	Sudhaus:			
1.1.)	Wochenendreinigung	[1/Woche]	Glattwassertank	1,5
			Maischbottich	2,0
			Läuterbottich	3,1
			Dosierleitung SG zu WPf	0,9
			Vorlaufgefäß	1,4
			Würzepfanne (vollständig)	1,2
			Trubtank	0,5
			Whirlpool	1,0
			Gesamt	11,6
1.2.)	Kaltwürzeleitung	[5/Woche]		2,2
1.3.)	Innenkocher	[2/Woche]		1,5
2.)	Gärung:			
	ZKT	[6/Woche]		2,7
3.)	Filtration:			
3.1.)	RR Bierleitung vor Filter	[2/Woche]		5,1
3.2.)	RR Filtrat vom Filter mit RBL	[2/Woche]		3,6
4.)	Abfüllung:			
4.1.)	Flaschenabfüllung + Füller	[4/Woche]		8,1
4.2.)	Tankbierleitung	[2/Woche]		12,5

Tabelle A6: Theoretischer Wasserbedarf - Filtration

Arbeitsschritt	Volumen [hL]
1.) Heißfahren des Filters:	
1.1) Heißwasservorlauf bis Rücklauftemp. = 78°C	50
1.2.) Heißwasservorlage in den Puffertank	
1.3.) Heißwasserkreislauf	
2.) Filtration:	
2.1.) Filter abkühlen auf 25°C	
2.2.) Wasservorlage	50
2.3.) Voranschwämmung Kieselguhr	
2.4.) laufende Dosage Kieselguhr	
3.) Filterreinigung:	
3.1.) Restbier ausschieben	60
3.2.) Sterilfilter rückspülen	
3.3.) Kieselguhrrahmenfilter reinigen	

Tabelle A7: Theoretischer Wasserbedarf - Abfüllung

Position:	Beschreibung	Einheit	Wert	Faktor
1.)	Gesamt:	[m³/h]	21	1,00
2.)	FlaReiMa:			
2.1.)	Frischwasserverbrauch	[L/ 0,5-L Fl.]	0,42	
2.2.)	Flaschendurchsatz	[Fl./h]	20000	
2.3.)	Wasserbedarf	[m ³ /h]	8,4	0,40
3.)	Kastenwascher:			
	Wasserbedarf	[m ³ /h]	3,36	0,16
4.)	Bandschmierung:			
	Wasserbedarf	[m ³ /h]	1,26	0,06