



FAKULTÄT FÜR
INFORMATIK

Masterarbeit

**Konzept für ein digitales Produktabbild
in der kontinuierlichen verfahrenstechnischen Produktion
am Beispiel eines Unternehmens der Lebensmittelindustrie**

Fakultät für Informatik

Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme

Arbeitsgruppe Wirtschaftsinformatik

Prüfer:	Prof. Dr. rer. pol. habil. Hans-Knud Arndt
Betreuer Fraunhofer IFF:	Dipl.-Ing. Marcus Kögler
Vorgelegt von:	Mike Richter
Abgabetermin:	16. Oktober 2018

*„Alles, was digitalisiert werden kann, wird digitalisiert werden.
Alles, was vernetzt werden kann, wird vernetzt werden.“*

Bruno Jacobfeuerborn

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungsverzeichnis.....	III
Symbolverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	VI
1. Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung.....	2
1.3 Fragestellung und Zielsetzung.....	3
1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....	4
2. Grundlagen.....	5
2.1 Verfahrenstechnik.....	5
2.1.1 Terminologie	5
2.1.2 Prozess- und Anlagentypen.....	7
2.1.3 Abgrenzung von der Fertigungstechnik	9
2.1.4 Mess-, Steuer- und Regeltechnik.....	11
2.1.5 Automatisierungs- und Prozessleittechnik.....	12
2.2 Das digitale Abbild	15
2.2.1 Definitionen, Begriffsabgrenzung und Funktion.....	15
2.2.2 Herkunft und Neuartigkeit des Ansatzes	17
2.2.3 Zweck und Nutzen.....	18
2.3 Verfolgbarkeit von Stoffen.....	19
3. Analyse des Produktionsprozesses	21
3.1 Weizen als verfahrenstechnischer Rohstoff und seine Produkte.....	21
3.2 Vorgehensweise bei der Prozessanalyse.....	22
3.3 Eingrenzung und Prozessüberblick.....	23
3.4 Beschreibung des Prozesses.....	26
3.4.1 Stufe 1: Aufbereitung des Rohstoffs	26
3.4.2 Stufe 2: Stoffumwandlung.....	27
3.4.3 Stufe 3: Aufarbeitung des Umwandlungsprodukts.....	31
3.4.4 Prozessmodell.....	32
3.4.5 Verfahrenstechnische Messgrößen	34
3.5 Intern eingesetzte IT-Systeme	36
3.6 Interne Produktverfolgung & Qualitätsdokumentation	37
3.7 Zusammenfassung der Herausforderungen	38

4.	Konzept.....	40
4.1	Geltungsbereich.....	40
4.2	Vorgehensweise und Konzeptbestandteile.....	41
4.3	Zieldefinition	43
4.4	Datenerfassung.....	44
4.4.1	Datenbedarfsanalyse und -abgleich	44
4.4.2	Technologieauswahl, -überprüfung, -ausgestaltung.....	50
4.5	Datennutzung.....	51
4.5.1	Traceability-Ansätze	51
4.5.2	Modellannahmen	53
4.5.3	Realisierung der Produktverfolgung.....	55
4.5.4	Erfassung der Produktqualität	62
4.6	Umsetzungsaspekte.....	62
4.6.1	Konzeptuelles Datenmodell	62
4.6.2	Optionen einer Softwarelösung.....	65
5.	Prototypische Umsetzung.....	69
5.1	Verwendete Software und Schnittstellen.....	69
5.2	Stamm- und Bewegungsdaten	69
5.3	Benutzung der Anwendung und Umsetzung der Berechnungen	71
6.	Evaluierung.....	75
6.1	Verifizierung und Validierung.....	75
6.2	Kritische Diskussion.....	76
6.3	Anspruchsgruppen- und Nutzenanalyse.....	78
7.	Abschluss	81
7.1	Zusammenfassung.....	81
7.2	Ausblick.....	83
	Literaturverzeichnis	84
	Anhang.....	89
A.1	Vergleich von kontinuierlichem und diskontinuierlichem Prozess	89
A.2	Notationselemente des Prozessmodells.....	89
A.3	Gegenüberstellung von Fertigungs- und Prozessindustrie.....	90
A.4	Generisches konzeptuelles Datenmodell	91
	Selbstständigkeitserklärung.....	92

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Bedeutung
BES	Batch Execution System
CAD	Computer-aided design
CAM	Computer-aided manufacturing
CIM	Computer-integrated manufacturing
ERP	Enterprise Resource Planning
FIFO	First In, First Out
I4.0	Industrie 4.0
IPK	In-Prozess-Kontrolle
KHZ	Konzentrationshydrozyklon
LIMS	Labor-Informations- und Management-System
MES	Manufacturing Execution Systems
MSR-Technik	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
PCE	Process Control Engineering
PCS 7	Process Control System 7 (Produkt von Siemens)
PI System	Plant Information System (Produkt-Suite von OSIsoft)
PIMS	Plant/Process Information Management System
PLM	Product Lifecycle Management
PLS	Prozessleitsystem
R&I-Fließschema	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema
RAMI 4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SDK	Software Development Kit
SHZ	Separationshydrozyklon
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TK	Tank
WGP	Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik

SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Bedeutung (dt./eng.)	Einheit
η	Ausbeute	%
ρ	Dichte (density)	$\frac{t}{m^3}$
p	Druck (pressure)	<i>bar</i>
L	Füllstand (level)	%
m	Masse (mass)	<i>t</i>
\dot{m}	Massestrom (mass flow)	$\frac{t}{h}$
pH	pH-Wert (H_3O^+ -Ionenkonzentration)	(keine)
PR	Proteingehalt	%
ϑ	Temperatur	°C
TS	Trockensubstanz	%
τ	Verweilzeit	<i>h</i>
V	Volumen (volume)	m^3
\dot{V}	Volumenstrom (flow)	$\frac{m^3}{h}$
t	Zeit	<i>h</i>

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Klassische Automatisierungspyramide	14
Abbildung 2: Tracking und Tracing.....	20
Abbildung 3: Hauptprodukte und Bilanz des Weizenstärke-Prozesses.....	21
Abbildung 4: Grundfließbild der Anlage	25
Abbildung 5: Prozessstufe 1: Aufbereitung des Rohstoffs	26
Abbildung 6: Prozessstufe 2: Stoffumwandlungen (Nassprozess).....	28
Abbildung 7: Funktionsweise eines Zyklons.....	30
Abbildung 8: Funktionsweise der Separationshydrozyklonanlage	30
Abbildung 9: Prozessstufe 3: Aufarbeitung des Umwandlungsprodukts.....	31
Abbildung 10: Prozessmodell des Weizenstärke-Produktionsprozesses	33
Abbildung 11: Relevante unterstützende IT-Systeme des Unternehmens.....	37
Abbildung 12: Vorgehensweise bei der Konzeption.....	42
Abbildung 13: Typologie der Stoffe.....	44
Abbildung 14: Typologie der Anlagenausrüstung	45
Abbildung 15: Konzeptuelles Stammdatenmodell der Anlagenausrüstung	46
Abbildung 16: Kennzeichnung von Stellen der MSR-Technik.....	48
Abbildung 17: Datenbedarfsanalyse und -abgleich im Prozessmodell	49
Abbildung 18: Strömung in einem Rohr	53
Abbildung 19: Massefluss in einem Silo	54
Abbildung 20: Verfolgung einer Weizencharge im Weizensilo	56
Abbildung 21: Zeitbestimmung im Produktfluss	56
Abbildung 22: Prozessabschnitt des Teigansatzes.....	58
Abbildung 23: Prozessabschnitt der Trommelfilter	60
Abbildung 24: Auswertungsbeispiel Verlauf des TS-Gehalts.....	62
Abbildung 25: Konzeptuelles Datenmodell	64
Abbildung 26: Benutzeroberfläche des Prototyps für die Nachverfolgung.....	72
Abbildung A-1: Generisches konzeptuelles Datenmodell	91

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Notationselemente des Prozessmodells.....	32
Tabelle 2: Messgrößen für Betriebszustände	34
Tabelle 3: Messgrößen für Stoff- und Produkteigenschaften	35
Tabelle 4: Eingesetzte IT-Systeme im Unternehmen	37
Tabelle 5: Geltungsbereich des Konzepts.....	40
Tabelle 6: Erweiternde Notationselemente des Prozessmodells.....	48
Tabelle 7: Relevante und verfügbare Daten für die prototypische Umsetzung.....	69
Tabelle 8: Stammdaten der Apparate (Beispiel)	71
Tabelle 9: Stammdaten der Rohrleitungen (Beispiel)	71
Tabelle 10: Stammdaten der Stoffe (Beispiel).....	71
Tabelle 11: Bewegungsdaten der Sensoren (Beispiel)	71
Tabelle 12: Prozesstabelle mit Verweilzeitberechnung (Beispiel)	73
Tabelle A-1: Vergleich von kontinuierlichem und diskontinuierlichem Prozess.....	89
Tabelle A-2: Vollständige Notationselemente des Prozessmodells	89
Tabelle A-3: Unterschiede zwischen Fertigungs- und Prozessindustrie	90

1. EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung lösen einen weitreichenden Wandel in der Gesellschaft aus. Sie verändert nicht nur das Alltagsleben der Menschen, sondern hat auch drastische Auswirkungen auf Unternehmen und die mit ihnen verbundenen Märkte, Geschäftsbeziehungen und Wertschöpfungsketten. Die Geschäftswelt wird in zunehmendem Maße von digitalen Technologien durchdrungen und dadurch nachhaltig verändert. Diesen Wandel bezeichnet man gemeinhin als die „digitale Transformation“. Wurde früher stets die Globalisierung dafür verantwortlich gemacht, dass Unternehmen sich einem hohen Wettbewerbsdruck ausgesetzt sehen, so sorgt heute die zusätzliche Herausforderung der digitalen Transformation dafür, dass die Unternehmen sich schneller denn je dem Wandel der Zeit anpassen und auf die aktuellen und bevorstehenden Veränderungen reagieren müssen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. (Roth 2016, S. 3)

Doch der Wandel ist Herausforderung und Chance zugleich und bietet neue Möglichkeiten zur Veränderung bestehender Geschäftsmodelle sowie auch zur Generierung neuer Geschäftspotentiale. Dadurch kann das Verhältnis zwischen Unternehmen und Kunden grundlegend weiterentwickelt werden. Als Schlüssel hierzu gilt das Zusammenwachsen von digitaler und produzierender Industrie. Die daraus entstehenden Chancen werden für die Zukunft als erfolgskritischer Faktor angesehen. (Roth 2016, S. 3)

Die antizipierten Veränderungen durch die Digitalisierung sind so weitreichend, dass man seit einigen Jahren von der vierten industriellen Revolution spricht. Um den digitalen Wandlungsprozess zu unterstützen, hat die Bundesregierung deshalb im Rahmen ihrer Hightech-Strategie 2020 das Zukunftsprojekt „Industrie 4.0“ (I4.0) ins Leben gerufen, das auf der Hannover Messe 2011 erstmalig der Öffentlichkeit präsentiert wurde. (Kagermann und Lukas 2011)

Auch wenn es für den Industrie-4.0-Begriff bisher keine allgemein anerkannte Definition gibt, so ist es doch Konsens, dass man darunter die digitale Transformation des produzierenden Gewerbes versteht. ROTH definiert den Begriff wie folgt:

„Industrie 4.0 umfasst die Vernetzung aller menschlichen und maschinellen Akteure über die komplette Wertschöpfungskette sowie die Digitalisierung und Echtzeitauswertung aller hierfür relevanten Informationen, mit dem Ziel die Prozesse der Wertschöpfung transparenter und effizienter zu gestalten, um mit intelligenten Produkten und Dienstleistungen den Kundennutzen zu optimieren.“ (Roth 2016, S. 5–6)

Die Digitalisierung und Vernetzung führen vor allem zu einer intensiveren Verbindung der realen mit der digitalen Welt. Ein wichtiges Kernkonzept von Industrie 4.0 zur Umsetzung dieser Verbindung ist der digitale Zwilling bzw. das digitale (Produkt-)Abbild.

Mit einem digitalen Abbild werden sowohl physische als auch nicht-physische Objekte aus der realen Welt digital repräsentiert. Das Ziel ist es, alle relevanten Informationen über diese Objekte über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg in einem einheitlichen Format

zu erfassen, zu speichern und somit einen übergreifenden Informationsaustausch zu ermöglichen. (Kuhn 2017) In der Fachwelt besteht weitestgehend Konsens darüber, dass dies in allen Branchen obligatorisch sein wird. (Grösser 2018)

Industrie-4.0-Konzepte wie das digitale Abbild werden zumeist mit dem klassischen Maschinen- und Anlagenbau und daher dem Gebiet der Fertigungstechnik in Verbindung gebracht, wo etwa Bauteile und Maschinen digital konstruiert bzw. abgebildet werden. Doch auch in der verfahrenstechnischen Industrie (Prozessindustrie) gibt es Gründe für die Anwendung eines digitalen Abbilds. Aufgrund der besonderen Eigenschaften der Produkte der Prozessindustrie bestehen bei der Umsetzung jedoch spezifische Herausforderungen.

1.2 PROBLEMSTELLUNG

Die Produkte der Fertigungsindustrie sind in der Regel unproblematisch digital erfassbar, da sie auf einer diskreten Fertigung beruhen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie als abzählbare Einheiten hergestellt werden. (Graef 2016, S. 75) Die Produkte selbst und auch die Teile, aus denen sie zusammengesetzt sind, sind eindeutig identifizierbar und als Stücke handhabbar. Identifikationstechnologien wie zum Beispiel Barcodes, Magnetstreifen oder RFID-Tags ermöglichen hier bei Bedarf die eindeutige Kennzeichnung und Verfolgung über den gesamten Produktlebenszyklus. Darüber hinaus sind auch intelligente Produktfunktionen realisierbar, die in der Nutzungsphase beim Kunden einen Nutzen stiften.

Die Produkte der verfahrenstechnischen Industrie basieren hingegen auf der Prozessherstellung. Auf diese Weise produzierte Einheiten sind nicht abzählbar und werden massen- oder volumenorientiert gemessen. (Graef 2016, S. 75) Die besondere Herausforderung für die Prozessindustrie besteht darin, dass ihre Produkte sowohl aufgrund ihrer physischen Beschaffenheit in Form von Flüssigkeiten, Gasen oder Schüttgütern als auch aufgrund ihrer Marktposition als Zwischenprodukte (z. B. Natronlauge, Zement, Stahl) oder Verbrauchsgüter (z. B. Nahrungsmittel, Kraftstoffe) nicht ohne Weiteres vollständig digital abbildbar sind. Fast immer werden solche Produkte später zu Endprodukten weiterverarbeitet oder einfach verbraucht. Es sind keine Technologien am Produkt selbst realisierbar, weshalb sich beispielsweise keine Sensor-, Identifikations- oder Rechentechnik montieren lässt, mit der eine direkte Verfolgung oder gar intelligente Produktfunktionen umgesetzt werden könnten. Dadurch kann man nicht direkt durch Datenerfassung und -auswertung einen Mehrwert erzeugen.

Dennoch besteht auch in der Prozessindustrie ein Bedarf an datengetriebenen Weiterentwicklungsansätzen. Über den grundsätzlichen Anspruch der Optimierung der Produktionsprozesse hinausgehend verlangen beispielsweise strenge regulatorische Auflagen die zunehmend detaillierte Dokumentation von Produktinformationen. (Pötter et al. 2017, S. 70) Dies rückt die Produktqualität weiter in den Vordergrund und betrifft zum Beispiel Lebensmittel, pharmazeutische Produkte und Gefahrenstoffe. Die möglichst genaue Nach- und Rückverfolgbarkeit von Produkten unter Erfassung von Qualitätseigenschaften spielt hierbei eine zentrale Rolle, um etwa die Verwendung und Herkunft von Rohstoffen für eine bestimmte Charge im Falle von Qualitätsproblemen oder die Einhaltung von Richtlinien und Grenzwerten während der Produktion nachweisen zu können. Selbst wenn bestimmte Produkte aus regulatorischer Sicht unkritisch sein sollten, so steigen doch die

Anforderungen der Kunden an den Qualitätsnachweis. Oftmals werden solche Aufgabenstellungen in der Praxis noch manuell bearbeitet. Deshalb müssen auch in der Prozessindustrie Wege gefunden werden, eine produktbezogene Datenerfassung und -verwertung umzusetzen und damit die Informationstransparenz in der Produktion zu erhöhen.

Die wachsenden Möglichkeiten, die sich durch die fortschreitende Digitalisierung ergeben, lassen zudem erwarten, dass sich die gesetzlichen wie auch die Kundenanforderungen entsprechend weiterentwickeln. Die Unternehmen sollten daher immer bestrebt sein, nicht den Anschluss zu verlieren und später in Zugzwang zu geraten. Ein digitales Produktabbild kann dabei helfen, die anfallenden Prozessdaten produktbezogen zu erfassen und so die Anforderungen der Kunden und des Gesetzgebers besser zu erfüllen.

Für einen Teil der Prozessindustrie ist das Problem der Produktverfolgung bereits gelöst. Man unterscheidet bei der Prozessherstellung grundsätzlich zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen (chargenbasierten) Prozessen. (Schenk et al. 2014, S. 685) In chargenbasierten Prozessen werden die produzierten Stoffmengen in diskreten Schritten hergestellt und sind dadurch voneinander unterscheidbar. Für diesen Prozesstyp gibt es umfangreiche Konzepte und Softwarelösungen, die eine lückenlose Nach- und Rückverfolgung inkl. Qualitätsdokumentation ermöglichen. (Schaudel et al. 2018, 870ff., 889ff.)

Für kontinuierliche Prozesse, in denen die Stoffflüsse stetig sind, besteht hingegen ein Bedarf an Lösungen. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Tatsache, dass in einigen Branchen, wie zum Beispiel der Pharmaindustrie, ein Trend zur Umstellung von chargenbasierter auf kontinuierliche Produktion zu beobachten ist.

1.3 FRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Die primäre Fragestellung dieser Arbeit lautet:

„Wie lässt sich von einem verfahrenstechnischen Produkt der kontinuierlichen Prozessherstellung ein digitales Produktabbild erzeugen?“

Zur weiteren Präzisierung werden mehrere sekundäre Fragestellungen abgeleitet:

- (1) *„Welche Informationen können an einem verfahrenstechnischen Produkt gefunden und wie können sie erfasst werden?“*
- (2) *„Wie können diese Informationen genutzt werden, um eine Verfolgung von Produkten durch den Produktionsprozess und die Erfassung ihrer Qualitätseigenschaften zu realisieren?“*
- (3) *„Welche IT-Lösungen sind für die praktische Umsetzung erforderlich?“*
- (4) *„Welchen Nutzen hat ein digitales Produktabbild und wem entsteht er?“*
- (5) *„Welche wirtschaftliche Verwertung des digitalen Produktabbilds ist absehbar?“*

Die konkrete Zielsetzung der Arbeit ist demnach der Entwurf eines Konzepts zur Erzeugung eines digitalen Produktabbilds für ein verfahrenstechnisches Produkt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Nach- und Rückverfolgung des Produkts während eines kontinuierlichen Produktionsprozesses und der Erfassung von Produktqualitätsmerkmalen in dessen Verlauf. Das bedeutet insbesondere, dass der Blick auf die Analyse des Informationsflusses innerhalb der Unternehmensgrenzen gerichtet wird. In diesem Zuge soll die

Sichtweise auf die Produktion von der Anlagensicht auf die Produktsicht geändert und ein Perspektivwechsel herbeigeführt werden, der neue Analyseansätze ermöglicht.

Als repräsentatives Beispiel wird ein aus Weizen hergestelltes Produkt eines Unternehmens aus der Lebensmittelindustrie herangezogen. Bei diesem Produkt handelt es sich um Weizenstärke, die nach dem kontinuierlichen Prozessparadigma in einer verfahrenstechnischen Großanlage hergestellt wird. Anhand der konkreten Verfahrensschritte des Weizenstärke-Produktionsprozesses und der vorhandenen technischen Ausstattung soll ein praxisnaher Lösungsentwurf erarbeitet werden.

Eine Einschätzung des Nutzens des digitalen Produktabbilds sowie der wirtschaftlichen Verwertbarkeit im Sinne der datengetriebenen Wertschöpfung (Datenökonomie) ergänzen die Betrachtung.

1.4 VORGEHENSWEISE UND AUFBAU DER ARBEIT

Zur Beantwortung der Fragestellungen werden in Kapitel 2 zuerst einige verfahrenstechnische *Grundlagen* geklärt, die für das Verständnis der Arbeit elementar sind. Zusätzlich wird die Terminologie um digitale Abbilder und der Verfolgbarkeit betrachtet.

Danach folgt in Kapitel 3 die *Analyse* des Weizenstärke-Produktionsprozesses und seiner unterstützenden informationstechnischen Systeme. Die daraus gewonnenen Informationen in Form eines Prozessmodells, der eingesetzten Messtechnik und der identifizierten Herausforderungen bilden die Grundlage für den Konzeptentwurf.

In Kapitel 4 wird das *Konzept* vorgestellt, wofür zuerst dessen Geltungsbereich und dann die Vorgehensweise zur Erzeugung des digitalen Produktabbilds beschrieben wird. Nach einer Zieldefinition wird dargelegt, welche Daten für die Realisierung des Abbilds benötigt und wie diese erfasst werden. Auf dieser Basis erfolgt die detaillierte Beschreibung der Nutzung dieser Daten, um den Weg des Produkts durch den Produktionsprozess abzubilden. Das in diesem Zuge entworfene konzeptuelle Datenmodell bildet die Grundlage für eine mögliche softwaretechnische Umsetzung, deren Optionen theoretisch diskutiert werden.

Kapitel 5 beschreibt eine *prototypische Umsetzung*, die im Unternehmen realisiert wurde. Sie dient als Evaluierungsobjekt, um das Konzept in der Praxis zu testen und zu bewerten.

Es folgt in Kapitel 6 die *Evaluierung* des erarbeiteten Konzepts mit der Verifizierung und Validierung anhand des Prototyps. In der anschließenden kritischen Diskussion werden die Schwächen und Optimierungspotentiale der Lösung gegenübergestellt. Des Weiteren wird eine Anspruchsgruppen- und Nutzenanalyse durchgeführt, um herauszufinden, welche Personengruppen einen Nutzen aus dem digitalen Produktabbild ziehen können.

Den *Abschluss* der Arbeit bildet Kapitel 7 mit der Zusammenfassung und einem Ausblick auf die mögliche Weiterentwicklung.

2. GRUNDLAGEN

2.1 VERFAHRENSTECHNIK

Diese Arbeit ist in einem Unternehmen der Prozessindustrie entstanden und befasst sich in weiten Teilen mit Konzepten des verfahrenstechnischen Umfelds. Zu Beginn erfolgt deshalb eine Einführung in dieses Fachgebiet, um dessen spezifische Terminologie und die relevanten Teilbereiche vorzustellen.

2.1.1 Terminologie

Die Verfahrenstechnik – auch Prozesstechnik genannt – ist Teil des übergeordneten Fachgebiets der Produktionstechnik, die in die drei Hauptgruppen der Fertigungs-, Verfahrens- und Energietechnik unterteilt wird. Die Fertigungstechnik beschäftigt sich mit der Formänderung von Werkstücken und ist eng verbunden mit dem Maschinenbau. Analog dazu beschäftigt sich die Verfahrenstechnik mit der Stoffumwandlung und ist eng verbunden mit dem Apparate- und Anlagenbau. Gegenstand der Energietechnik ist die Umwandlung von Energie. (Hemming und Wagner 2008, S. 9)

HEMMING & WAGNER definieren die *Verfahrenstechnik* als

„[...] selbstständige Ingenieurwissenschaft, die sich mit allen Vorgängen befasst, bei denen Stoffe hinsichtlich Zusammensetzung, Eigenschaften oder Stoffart verändert werden.“ (Hemming und Wagner 2008, S. 9)

Die *Stoffumwandlungen* können auf drei Arten realisiert werden:

- (1) Änderung der Zusammensetzung (z. B. durch Filtration)
- (2) Änderung der Eigenschaften (z. B. Feuchtigkeit durch Trocknen)
- (3) Änderung der Stoffart (z. B. durch chemische Reaktion)

Während die Zusammensetzung und die Eigenschaften nur durch physikalische Verfahren geändert werden, kann die Umwandlung der Stoffart nur durch chemische oder nukleare Reaktionen erfolgen. Folglich wird unterschieden zwischen der physikalischen, chemischen und nuklearen Verfahrenstechnik. (Hemming und Wagner 2008, S. 9) Die in dieser Arbeit betrachteten Vorgänge verwenden ausschließlich physikalische Stoffumwandlungsverfahren und sind deshalb der physikalischen Verfahrenstechnik zuzuordnen.

Der Ort, an dem eine Stoffumwandlung stattfindet, ist der *Apparat*:

„Apparate sind technische Gebilde, in denen Stoffe umgewandelt, behandelt, transportiert oder gelagert werden. Im Inneren des Apparats werden die für die Stoffumwandlung erforderlichen Betriebsbedingungen geschaffen.“ (Hemming und Wagner 2008, S. 10)

Beispiele für Apparate der physikalischen Verfahrenstechnik sind etwa Mischer, Siebe und Zentrifugen. Viele Apparate werden durch Maschinen angetrieben, wie beispielsweise der Mischer, dessen Mischwerk durch einen Elektromotor mit Energie versorgt wird. Apparate, in denen chemische Reaktionen ablaufen, werden Reaktoren genannt.

Als verfahrenstechnische *Anlage* bezeichnet man die

„[...] Gesamtheit aller Apparate, Maschinen und Geräte zur Durchführung eines Verfahrens [...].“ (Hemming und Wagner 2008, S. 10)

Eine Anlage ist ein komplexes technisches Gebilde aus miteinander gekoppelten Ausrüstungen (Apparaten) zur Verarbeitung der Stoffe, Verbindungs- und Fördereinrichtungen zum Stofftransport sowie Nebeneinrichtungen mit Betriebs-, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik. Die Anlage dient der Umsetzung aller Vorgänge zur Stoffumwandlung, Transport, Lagerung und Abfüllung. (Schenk et al. 2014, S. 685) Die Geräte der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik ermöglichen das Überwachen, Steuern und Regeln der Prozessgrößen, wie zum Beispiel Druck oder Temperatur, von einem zentralen Ort aus, dem Leitstand der Prozessleittechnik. (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 14) Eine Anlage kann aus mehreren Teilanlagen bestehen, die mit den Nebenanlagen – zum Beispiel ein Kraftwerk für die Energieerzeugung – den Anlagenkomplex bilden. Zusammen mit der Infrastruktur eines Standorts bilden sie das Werk. (Hemming und Wagner 2008, S. 180) Der Anlagenbau ist die Disziplin, die sich mit Konzeption, Planung und Bau einer Anlage befasst, um ein Verfahren produktionstechnisch umzusetzen.

HEMMING & WAGNER definieren ein *Verfahren* als einen

„[...] Ablauf von physikalischen, chemischen oder biologischen Vorgängen zur Gewinnung oder Beseitigung von Produkten. Verfahren bestehen aus einer Kombination austauschbarer Grundverfahren. Ein Grundverfahren ist der einfachste Vorgang bei der verfahrenstechnischen Durchführung.“ (Hemming und Wagner 2008, S. 10)

Mit Hilfe der *Grundverfahren* werden die verschiedenen Stoffumwandlungen – bisweilen auch Transformationen genannt – realisiert. Zu den physikalischen Grundverfahren zählen beispielsweise das Mischen, Filtrieren, Zentrifugieren, Verdampfen oder Agglomerieren. Man unterscheidet Grundverfahren zum Trennen und Vereinigen von Stoffen auf mechanische, elektrische/elektromagnetische sowie thermische Weise. (Hemming und Wagner 2008, S. 11)

Ein Verfahren wird auch als (verfahrenstechnischer) *Prozess* bezeichnet. Analog ist der Begriff der Prozessindustrie neben dem der verfahrenstechnischen Industrie gebräuchlich. Folgende Begriffe werden daher in dieser Arbeit jeweils synonym verwendet:

- Prozess, Verfahren, verfahrenstechnischer Prozess
- Prozessindustrie, verfahrenstechnische Industrie
- Prozesstechnik, Verfahrenstechnik
- Grundverfahren, Stoffumwandlung, Transformation

Dem eigentlichen (Kern-)Prozess sind in der Regel zahlreiche *Prozessstufen* vor- und nachgeschaltet, um die Rohstoffe vor- und die Produkte nachzubereiten. HEMMING & WAGNER beschreiben die Unterteilung in drei Verfahrensabschnitte: Aufbereitung der Rohstoffe, Stoffumwandlung und Aufarbeitung der Umwandlungsprodukte. (Hemming und Wagner 2008, S. 10)

Die Dokumentation verfahrenstechnischer Anlagen erfolgt unter anderem in Form von Fließbildern. Ein *Fließbild* ist „[...] die zeichnerische Darstellung von Aufbau und Funktion einer verfahrenstechnischen Anlage.“ (Hemming und Wagner 2008, S. 180) In der Verfahrenstechnik sind drei Arten definiert: das Grundfließbild, das Verfahrensließbild sowie das Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild (R&I), die sich in ihrem Informationsgehalt und Detailgrad unterscheiden.

Im *Grundfließbild* (engl. *block flow diagram*) werden die wesentlichen Verfahrensschritte, die Ein- und Ausgangsstoffe sowie die Stoffströme schematisch in Form eines Blockdiagramms eingezeichnet. Es wird deshalb alternativ auch als Blockfließbild bezeichnet. Die Detailstufe ist nicht vorgegeben. So kann ein Rechteck einzelne Grundverfahren, Verfahrensabschnitte, Teilanlagen oder eine ganze Anlage repräsentieren. Als Zusatzinformationen können Betriebsparameter wie beispielsweise Durchflussmengen oder Temperaturen annotiert werden. Es ist die einfachste Darstellungsform eines Verfahrens. (Ignatowicz und Fastert 2011, S. 114–115)

Auf dem Grundfließbild aufbauend stellt das *Verfahrensließbild* (engl. *process flow diagram*) ein Verfahren detaillierter mit genormten Symbolen und Kennzeichnungen für Apparate und Maschinen dar, die durch Linien für die Stoffströme verbunden sind. (Ignatowicz und Fastert 2011, S. 115)

Das *R&I-Fließbild* (engl. *pipng and instrumentation flow diagram*) bildet eine Anlage ebenfalls mit genormten grafischen Symbolen für die gesamte technische Ausrüstung ab, einschließlich Apparaten, Maschinen, Rohrleitungen, Armaturen sowie der Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen. Technische Bezeichnungen und kennzeichnende Größen der einzelnen Anlagenbestandteile sind hier ebenfalls zu finden. Es besitzt den höchsten Detailgrad aller Verfahrensließbilder. (Ignatowicz und Fastert 2011, S. 117)

Für die Darstellung des Weizenstärke-Produktionsprozesses ist in dieser Arbeit das Grundfließbild ausreichend. Die Analyse des Prozesses erfolgte allerdings ausführlich unter anderem anhand der R&I-Fließbilder der einzelnen Anlagenteile.

2.1.2 Prozess- und Anlagentypen

Wichtige Unterschiede beim Betrieb einer verfahrenstechnischen Anlage bestehen in der Art ihrer Arbeitsweise und ihrer Flexibilität. Diesbezüglich unterscheidet man verschiedene Prozess- und Anlagentypen, die an dieser Stelle voneinander abzugrenzen sind.

Es gibt zwei *Prozesstypen*, die sich in der Kontinuität ihres Ablaufes unterscheiden: den kontinuierlichen Prozess und diskontinuierlichen Prozess. (Schenk et al. 2014, S. 685)

Der *kontinuierliche Prozess*, auch Fließbetrieb, Conti- oder losgrößenloser Prozess genannt, arbeitet von Anfang bis Ende ohne Unterbrechungen. Das Befüllen eines Apparats, die Stoffumwandlung und das Ablassen des Produkts aus dem Apparat geschehen simultan und ununterbrochen, wobei die Verfahrensschritte örtlich nacheinander in den einzelnen Apparaten ablaufen. Die Mess- und Regeltechnik sorgt dafür, dass die Betriebsbedingungen, wie z. B. Temperatur und Druck, konstant gehalten werden. (Hemming und Wagner 2008, S. 11–12) (Schönsleben 2016, S. 350) Kontinuierlich arbeitende Anlagen

werden dort eingesetzt, wo große Stoffmengen nach einem fest vorgegebenen Verfahrensablauf verarbeitet werden müssen. (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 16) Sie sind gekennzeichnet durch einen sehr hohen Automatisierungsgrad bei hohen Investitionskosten, geringer Flexibilität jedoch hohen Durchsatzmengen und damit hohem Wertschöpfungsbeitrag pro Mitarbeiter. (Schenk et al. 2014, S. 685)

Beim *diskontinuierlichen Prozess*, auch Batch-, Chargen- oder losgrößenorientierter Prozess genannt, laufen das Befüllen, die Stoffumwandlung und das Ablassen nacheinander in einem periodischen Zyklus ab. Nach einem Arbeitszyklus wird der Apparat gegebenenfalls gereinigt und ist bereit für eine neue Charge. Eingesetzt wird diese Arbeitsweise vor allem dann, wenn kleine Stoffmengen, langsame chemische Reaktionen oder wechselnde Produkte mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren in derselben Anlage verarbeitet werden sollen. Für große Stoffmengen und gleichbleibendem Produktionsverfahren gilt diese Arbeitsweise jedoch als unwirtschaftlich und veraltet. (Hemming und Wagner 2008, S. 12) (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 16) Chargenprozesse sind aufgrund der überwiegend in Reaktoren stattfindenden chemischen Stoffumwandlungen vor allem in der Chemie- und der Pharmaindustrie vorzufinden.

Die Eigenschaften beider Arbeitsweisen sind zusammenfassend in Tabelle A-1 im Anhang auf Seite 89 gegenübergestellt. Es gibt darüber hinaus auch *semi-kontinuierliche Prozesse* (engl. *semi-batch*), die die Anteile beider vorgenannter Prozessarbeitsweisen kombinieren. Das heißt, sie besitzen kontinuierliche sowie auch diskontinuierliche Verfahrensschritte, die in einer beliebigen Abfolge auftreten können. (Schenk et al. 2014, S. 685)

Zusätzlich zum Prozesstyp lassen sich Anlagen noch bezüglich ihrer Flexibilität kategorisieren. Man unterscheidet drei *Anlagentypen*: die Mono-, Mehrprodukt- und die Mehrzweckanlage. (Yang 2005, 19ff.)

Eine *Monoanlage* ist für die Herstellung eines Produkts bzw. einer festen Gruppe von Produkten konzipiert. Dabei ist der Herstellungsprozess fest vorgegeben und kann nur unter großem Aufwand umgerüstet werden, um die Produktpalette zu ändern. Derartige Anlagen verfügen über eine Einwegstruktur und werden in der Regel kontinuierlich betrieben. (Yang 2005, 19ff.)

Mehrproduktanlagen hingegen zeichnen sich durch eine größere Flexibilität aus. Sie verwenden ein weitgehend gleichbleibendes Verfahren und können nacheinander verschiedene, aber ähnliche Produkte aus einer Produktfamilie herstellen. Die Anpassung an wechselnde Anforderungen erfordert nur relativ geringen Aufwand. (Yang 2005, 19ff.)

Mehrzweckanlagen schließlich besitzen die größte Flexibilität und verfügen über unabhängige Teilanlagen, die große Freiheitsgrade bei der prozesstechnischen Verschaltung zur Produktion verschiedener Produkte erlauben. Mehrprodukt- und Mehrzweckanlagen werden in der Regel diskontinuierlich betrieben. (Yang 2005, 19ff.)

Die Anlage, in der der in dieser Arbeit betrachtete Weizenstärke-Produktionsprozess betrieben wird, gehört zur Klasse der Monoanlagen.

2.1.3 Abgrenzung von der Fertigungstechnik

Die Verfahrenstechnik unterscheidet sich in vielen grundlegenden Aspekten von der Fertigungstechnik. Um die Unterschiede im Hinblick auf die Herausforderungen für die Erzeugung eines digitalen Produktabbilds herauszustellen, sollen diese beiden Gebiete der Produktionstechnik charakterisiert und voneinander abgegrenzt werden. Dies erfolgt anhand von Merkmalen wie verarbeitete Materialart, Produktstruktur, Art der Verarbeitung, Transport, Lagerung und Speicherung der Erzeugnisse.

MÜLLER ET AL. definieren die *Fertigungstechnik* als das

„[...] Teilgebiet der industriellen Produktionstechnik, welches die Gesamtheit der Produktionsverfahren und Mittel zur Herstellung geometrisch bestimmter Körper (Teile, Gruppen, Erzeugnisse) aus zubereiteten formlosen Stoff und/oder festen Körpern umfasst.“ (Müller 1992, S. 188)

Die Fertigungstechnik befasst sich vorwiegend mit technischen Fertigungsverfahren zur Herstellung fester Körper. Sie zeichnet sich also durch die Handhabung von Stückgut aus. Das heißt, die Produkte werden als abzählbare Einheiten hergestellt, weshalb man auch vom Produktionstyp der diskreten Fertigung spricht. Diese Stücke – Material oder Teile genannt – bilden die Grundlage für die Fertigung der Endprodukte. Ein Endprodukt ist in der Regel durch eine hierarchische Produktstruktur bestehend aus Roh-/Kaufteilen, Einzelteilen, Baugruppen, Hauptbaugruppen und Erzeugnis definiert. Die Produktstruktur wird anhand von Stücklisten festgelegt, die zu den wichtigsten Datenstrukturen in der Fertigung zählen. (Graef 2016, S. 75) (Schenk et al. 2014, 679ff.)

Der angewandte Fertigungsprozess, dessen Ablauf durch Arbeitspläne festgelegt wird, bestimmt über mehrere Fertigungsstufen hinweg die auszuwählenden Transformationen, die Logistik und das Prüfen. Transformationen kommen in Form von Fertigungsverfahren zur Anwendung. Dazu gehören typischerweise etwa das Umformen, Fügen, Trennen und Beschichten. Ihre Ausführung findet zumeist mit Hilfe geeigneter Maschinen statt. Die Logistik beinhaltet den Transport, den Umschlag und die Lagerung, was auch abkürzend als TUL-Kette bezeichnet wird. Zu den Transportarten zählen das Handhaben, Fördern, Umschlagen und Kommissionieren. Die Lagerung von Teilen und Erzeugnissen erfolgt beispielsweise in Behältern, Hochregallagern oder auf Freiflächen. Der letzte Prozessschritt der Produkterstellung umfasst zumeist das Prüfen und ggf. Justieren des Erzeugnisses. (Schenk et al. 2014, S. 680–682)

Im Verlauf des Fertigungsprozesses werden so aus dem Rohmaterial bzw. den Rohteilen die Einzelteile erzeugt, die zu Unter- und Hauptbaugruppen zusammengesetzt werden. In der Endmontage entsteht aus diesen Baugruppen das Erzeugnis, das als Endprodukt verkauft oder als Zwischenprodukt in einem anderen Fertigungsprozess weiterverarbeitet werden kann. (Schenk et al. 2014, S. 681)

In vielen Branchen ist die Fertigung heutzutage zu großen Teilen durch automatisierte Montagesysteme (Robotik), CNC-Steuerungen und speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) automatisiert. Ergänzt werden solche Systeme durch CAD- (Computer-Aided Design) und CAM- (Computer-Aided Manufacturing) Programme, die dem technischen Entwurf von Modellen und Fertigungsprozessen dienen. (Schenk et al. 2014, S. 683–684)

Industriebranchen, die der Fertigungsindustrie zugeordnet werden, sind zum Beispiel die Maschinenbau-, Fahrzeugbau-, Elektro/Elektronik-, Kunststoff-, Anlagenbau-, Luft- und Raumfahrtindustrie. (Schenk et al. 2014, S. 679)

MÜLLER ET AL. definieren die *Verfahrenstechnik* analog zur Fertigungstechnik als das

„[...] Teilgebiet der industriellen Produktionstechnik, die die Gesamtheit der Produktionsverfahren und -mittel zur Herstellung von Produkten umfasst, die durch bestimmte chemische und physikalische Eigenschaften charakterisiert sind, wobei vorwiegend eine Stoffumwandlung durch chemische und physikalische Prozesse erfolgt.“ (Müller, et al., 1992, p. 631)

Die Verfahrenstechnik befasst sich mit technischen Verfahren zur Umwandlung flüssiger, fester und gasförmiger Stoffe. Sie zeichnet sich überwiegend durch die Handhabung von Fließgut aus. Das heißt, die Produkte werden massen- oder volumenorientiert gemessen und sind nicht abzählbar. Man spricht hier vom Produktionstyp der Prozessfertigung. Da die Produkte der Verfahrenstechnik in der Regel keine feste Form haben, ist die Produktstruktur sehr unterschiedlich ausgeprägt. Anstelle von Stücklisten gibt es hier Rezepturen und Formeln, die den Einsatz verschiedener Verfahren zur Veränderung der Stoffeigenschaften bis zum gewünschten Zwischen- oder Endprodukt festlegen und sehr vielfältig sind. (Graef 2016, S. 75) (Schenk et al. 2014, 685f.) Eine Rezeptur oder Formel gibt außerdem an, in welchen Mengen und Mischungsverhältnissen die Rohstoffe und Zwischenprodukte in Apparaten bzw. Reaktoren zusammengeführt werden, um eine neue Produktionsstufe zu erzeugen. (Vahrenkamp und Siepermann 2008, S. 86)

Das angewandte Verfahren bestimmt die Transformationsschritte, mit denen die Stoffumwandlung durchgeführt wird. Seine Struktur ist in Fließbildern und Verfahrensbeschreibungen, ergänzt durch Mengen- und Energiebilanzen, fixiert. Die Umwandlung erfolgt in Form von chemischen, mechanisch/physikalischen, thermischen, elektrischen oder biologischen Reaktionen in Apparaten bzw. Reaktoren. Eine Kombination aus mehreren Transformationsarten ist ebenfalls möglich. Typische Transformationsoperationen sind beispielsweise die Änderung der Stoffeigenschaften durch Zerkleinern, Kühlen oder Trocknen, die Änderung der Stoffzusammensetzung durch Filtration oder Destillation, sowie die Änderung der Stoffart durch Oxidation, Hydrierung oder Polymerisation. Die aufgezählten Operationen stellen dabei nur eine kleine Auswahl der möglichen Umwandlungsverfahren dar. (Schenk et al. 2014, 685, 687, 692f.)

Während der Transport von Schüttgut und anderen Feststoffen wie in der Fertigungstechnik durch Stetig- und Unstetigförderer jeglicher Art erfolgt, erfordert der Transport von Fließgut und Gasen das Pumpen durch geeignete Rohrleitungen, durch die die verschiedenen Apparate der Anlage fest miteinander verbunden sind. Zur Lagerung der Stoffe werden Tanks (für Flüssigkeiten), Silos (für Schüttgüter), Bunker, Unter-, Normal- oder Überdruckbehälter genutzt. Für unkritische Stoffe kommen wie in der Fertigungstechnik auch Freilager und Lagerhallen zum Einsatz. (Schenk et al. 2014, S. 688) Der letzte Prozessschritt ist meist das Abfüllen in Gebinde oder Tankwagen zur Lieferung an den Kunden, was auch ein zeitkritischer Vorgang sein kann, da Lagerkapazität eine knappe Ressource ist und viele (Zwischen-)Produkte im Gegensatz zur Fertigungsindustrie nicht auf

dem Fabrikboden zwischengelagert werden können. Zudem ist deren Haltbarkeit häufig begrenzt. (Vahrenkamp und Siepermann 2008, 86f.)

Die Erzeugnisse der Verfahrenstechnik erfordern im Allgemeinen eine Vorbehandlung der Ausgangsstoffe sowie eine Nachbehandlung der Endprodukte. Entsprechende Ausrüstungen für die Vor- und Nachbehandlung nehmen dabei oft einen größeren Raum ein als die Anlagenteile für den verfahrensbestimmenden Prozess selbst und sind aufgrund der Branchen- und Produktvielfalt sehr unterschiedlich. (Schenk et al. 2014, S. 686)

Aus dieser erhöhten Vielfalt der verfahrenstechnischen Technologien und eingesetzten Stoffe resultiert zusammenfassend das Wesen der Prozessindustrie: industriell angewandte Stofftransmutationsverfahren zur „[...] Veränderung von Stoffeigenschaften durch mechanische, physikalische und chemische Einwirkungen zur Erstellung vorwiegend formloser bzw. nicht definierter formhafter Stoffe“ mit unter Umständen mehrfachem Wechsel der Transformation innerhalb der Prozesskette. Die Prozesse laufen oft mit hoher Geschwindigkeit innerhalb geschlossener Kreisläufe ab. (Schenk et al. 2014, S. 693–695)

Industriebranchen, die der Prozessindustrie zugeordnet werden, sind die Chemie-, Pharma-, Energie-, Brennstoff-, Baustoff-, Nahrungs-/Lebensmittel- und Wasserversorgungsindustrie sowie die Petro- und anorganische Chemie. (Schenk et al. 2014, S. 685)

Aus der Gegenüberstellung der Merkmale der Fertigungs- und Verfahrenstechnik wird ersichtlich, dass sich die Herstellungsprozesse in der Prozessindustrie deutlich von denen der Fertigungsindustrie unterscheiden. In Tabelle A-3 im Anhang auf Seite 90 sind die Merkmale noch einmal aggregiert und in ausführlicher, ergänzender Form bereitgestellt.

Der wichtigste Unterschied zwischen beiden, der an dieser Stelle zusammenfassend herausgestellt werden soll, liegt in der Produkt- und Prozessstruktur. In der Fertigungstechnik sind diese über Stücklisten und Arbeitspläne festgelegt. Dabei ist die separate Beschreibung beider Strukturen möglich. In der Verfahrenstechnik hingegen werden die Produkt- und Prozessstruktur in Form von Rezepturen, Verfahrensbeschreibungen oder Fließbildern gemeinsam fixiert, da der Herstellungsprozess nicht unabhängig von den eingesetzten Stoffen und Mengen beschrieben werden kann. Es besteht demnach eine starke Kopplung zwischen diesen beiden Strukturen. (Schenk et al. 2014, S. 688) (Kölbel und Schulze 1967, 74f.)

2.1.4 Mess-, Steuer- und Regeltechnik

Die Prozessabläufe in einer verfahrenstechnischen Anlage unterliegen einer permanenten Überwachung. Ziel ist es, bestmögliche Betriebsbedingungen für den gesamten Prozess sicherzustellen. Es ist die Aufgabe der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR-Technik), dies zu gewährleisten. Falls es der Betriebszustand eines Apparates erfordert, wird manuell oder automatisiert eingegriffen. (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 234)

Die Feststellung von Betriebszuständen ist Gegenstand des Messens:

„Messen ist ein Vorgang, bei dem der Wert einer physikalischen Größe – Messgröße genannt – erfasst und als Vielfaches seiner Einheit ermittelt wird.“ (Hemming und Wagner 2008, S. 21)

Das Messen einer Messgröße wird mit einem Messgerät durchgeführt, das zum Beispiel an einem Apparat oder einer Leitung montiert ist. Man unterscheidet die Online- und die Offline-Messung. Bei der Offline-Messung muss die Messgröße manuell am Messgerät abgelesen und notiert werden. Hierzu gehört vor allem die Entnahme von Proben und deren Analyse im Labor mittels geeigneter Analysegeräte. Bei der Online-Messung hingegen wird die Messgröße durch einen Sensor erfasst, der sein Signal an ein Prozessleitsystem sendet. (Kessler 2006, 14ff.) Beispiele für Messgrößen sind etwa die Temperatur und die Durchflussmenge. Die in dieser Arbeit relevanten Messgrößen werden in Abschnitt 3.4.5 im Rahmen der Analyse des Produktionsprozesses vorgestellt.

Messwerte haben vielfachen Nutzen. Sie dienen primär als Eingangsgrößen für die Steuerungs- und Regelungstechnik, die mit Hilfe von Aktoren den Prozessablauf beeinflussen. Sie werden aber andererseits auch für weitergehende Analysen und Optimierungen der Prozesse sowie beispielsweise für Betriebsabrechnungen anhand von Zählerständen verwendet. (Hemming und Wagner 2008, S. 22)

Im Gegensatz zum Messen sind das Steuern und das Regeln aktive Eingriffe in den Verfahrensablauf. Sie haben jeweils eine unterschiedliche Zielsetzung:

„Steuern heißt, den Ablauf eines Prozesses schrittweise durch eine Folge von Änderungsvorgängen (Steuervorgänge) zu beeinflussen.“ (Hemming und Wagner 2008, S. 22)

„Regeln heißt, den Ablauf eines Prozesses dauernd und kontinuierlich durch stetig überwachendes Messen, Vergleichen und Verstellen mit dem Ziel [zu] beeinflussen, einen vorgegebenen Sollzustand einzuhalten.“ (Hemming und Wagner 2008, S. 23)

Beim Steuern soll also ein angestrebter Zustand herbeigeführt werden, während durch das Regeln ein bestimmter Zustand erhalten werden soll.

2.1.5 Automatisierungs- und Prozessleittechnik

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wird angestrebt, das Messen, Steuern und Regeln in einer Anlage über das koordinierte Zusammenspiel von Sensorik und Aktorik weitgehend zu automatisieren. Die Grenzen der Automatisierbarkeit werden durch zwei Faktoren bestimmt: einerseits die technischen Möglichkeiten der MSR-Technik und andererseits das Wissen über die quantitativen Zusammenhänge zwischen den Betriebsbedingungen eines Apparats und der Qualität des entsprechenden Endprodukts. (Hemming und Wagner 2008, S. 21) Die Verknüpfung der MSR-Technik ganzer Anlagen oder von Anlagenteilen mittels der Rechentechnik ist Gegenstand der Automatisierungstechnik. Ihr Kostenanteil an den Gesamtkosten einer Anlage beträgt etwa 10-20%, was ihre Bedeutung hervorhebt. (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 234)

Die *Automatisierungstechnik* umfasst alle technischen Einrichtungen zur Automatisierung wie Feldgeräte, Leittechnikkomponenten, deren Verkabelung sowie Programmierung bzw. Parametrierung. Ihre Aufgabe ist das „[...] Steuern, Regeln, Führen und Optimieren eines technischen Prozesses durch Beeinflussung der Eingangsgrößen unter Berücksichtigung der Ausgangsgrößen“. (Heimbold 2015, S. 16–21)

Die zentrale Aufgabe bei der Steuerung einer Anlage ist das *Leiten*. Es bezeichnet

„[...] alle Maßnahmen, die einen im Sinne festgelegter Ziele erwünschten Ablauf eines Prozesses bewirken. Die Maßnahmen werden mit Hilfe der Leiteinrichtung, vorwiegend unter Mitwirkung des Menschen, aufgrund der aus dem Prozess oder auch aus der Umgebung erhaltenen Daten getroffen.“ (Maurer 2012, S. 272)

Zur Realisierung dieser Aufgabe wird ein *Prozessleitsystem* (PLS) als Leiteinrichtung genutzt, welches die prozessbezogenen Aufgaben einer Anlage steuert und überwacht:

„Ein Prozessleitsystem umfasst alle für die Aufgabe des Leitens erforderlichen Geräte und Programme zur Ausübung der Funktionen Messen, Steuern, Regeln, Rechnen, Überwachen, Positionieren, Anzeigen, Bedienen, Dokumentieren und Protokollieren.“ (Hemming und Wagner 2008, S. 188)

Hierfür kommen leistungsfähige Rechner mit prozessspezifischen, visualisierten Regelprogrammen zum Einsatz, die für die Steuerung, Sicherheit und Qualität der Prozessabläufe sorgen. Im Mittelpunkt steht dabei die anspruchsvolle Regelung vieler chemischer und physikalischer Größen wie zum Beispiel Zeit, Temperatur, Arbeitsdruck, Menge, Drehzahl, pH-Wert, Farbe/Trübung und Viskosität. (Schenk et al. 2014, S. 694–695)

Zur besseren Beherrschung der Komplexität von Automatisierungssystemen wird in der Literatur oft die Darstellung in Form der *Automatisierungspyramide* gewählt. Sie strukturiert die Funktionsbereiche innerhalb eines hierarchischen Ebenenmodells. Es gibt allerdings keine konsensuelle Darstellung dieser Pyramide. Detaillierte Varianten weisen bis zu sieben Ebenen auf während stärker aggregierte Ausprägungen nur drei Ebenen umfassen. (Meudt et al. 2017, S. 1)

Das für die folgenden Erläuterungen gewählte und in Abbildung 1 dargestellte Modell der klassischen Automatisierungspyramide teilt die Architektur in sechs (5+1) Ebenen ein (Siepmann 2016b, S. 49–50) (Schaudel et al. 2018, 58ff.) (Maurer 2012, S. 279):

Ebene 0: Prozessebene – Die unterste Ebene stellt den physischen Produktionsprozess dar. Hier sind die im Prozess verarbeiteten Produkte zu finden.

Ebene 1: Feldebene – Auf dieser Ebene befinden sich die Geräte der MSR-Technik, die produktionsrelevante Informationen über Sensorsignale erfassen und an höhere Ebenen senden. Dort werden sie ausgewertet und entsprechende Reaktionen über die Aktoren der Feldebene veranlasst. Hohe Echtzeitanforderungen zeichnen diese Ebene aus.

Ebene 2: Steuerungsebene – Die Steuerungsebene wertet die Sensordaten der Feldebene über speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) aus und sendet gegebenenfalls Ausgangssignale zurück, die im Feld zu Aktorauslösungen führen. Sie sind meist in die Feldgeräte direkt integriert und verleihen diesen eine teilweise Autonomie.

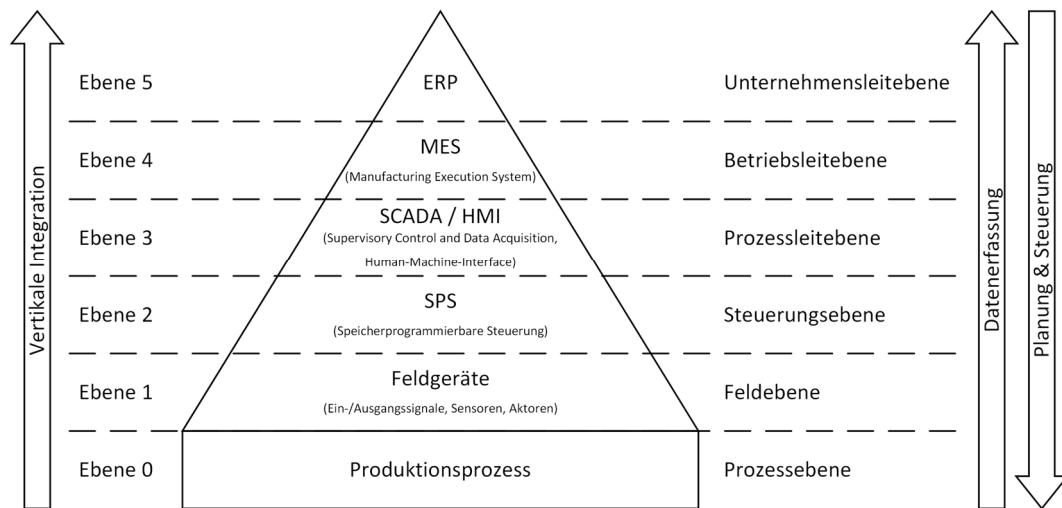


Abbildung 1: Klassische Automatisierungspyramide

Quelle: In Anlehnung an (Siepmann 2016b, S. 49)

Ebene 3: Prozessleitebene – Die Prozessleitebene befindet sich in der Mitte der Automatisierungspyramide und repräsentiert damit die Zentralität dieser Funktion. Ihre Systeme dienen vor allem der Visualisierung der produktionsrelevanten Vorgänge und ermöglichen manuelle Eingriffe wie zum Beispiel Sollwertvorgaben durch die menschlichen Operatoren im Leitstand sowie deren Alarmierung bei kritischen Zuständen. Als Mensch-Maschine-Schnittstelle zu den tiefergelegenen Ebenen ermöglichen SCADA-Systeme (*Supervisory Control and Data Acquisition*) über grafische Benutzeroberflächen die leicht verständliche Bedienung und Beobachtung einer Anlage. Während SCADA-Systeme lediglich Visualisierungs- und Bedienungsfunktionen bereitstellen und dafür mit der Automatisierungstechnik der Steuerungs- und Feldebene, die von verschiedenen Herstellern stammen kann, zusammenarbeiten, gibt es noch die *Prozessleitsysteme*. Diese Systeme integrieren alle Funktionen der Feld-, Steuerungs- und Prozessleitebene in einer ganzheitlichen Lösung aus der Hand eines Herstellers (z. B. Siemens SIMATIC PCS 7). Bei Neubauten kommen heute überwiegend nur noch PLS zum Einsatz. Weiterhin sind in dieser Ebene auch höhere Prozessleitfunktionen für komplexere Verknüpfungs- und Ablaufsteuerungen sowie Prozessdaten-Server angesiedelt, die Informationen über den Produktionsprozess (Zustände, Ereignisse, Parameter etc.) speichern, archivieren und übergeordneten Systemen zur Verfügung stellen.

Ebene 4: Betriebsleitebene – Die Funktionen der Betriebsleitebene – oft auch Produktionsleitebene genannt – werden durch *Manufacturing Execution Systems* (MES) realisiert. Als Verbindungsglied zwischen Anlagensteuerung und Unternehmensebene liegen die Hauptaufgaben eines MES in der Produktionsfeinplanung und -datenerfassung sowie der Steuerung und Kontrolle der Produktion und Logistik. Für zukünftige Planungen leitet es die entsprechenden Daten an die Unternehmensebene weiter.

Ebene 5: Unternehmensleitebene – Das *Enterprise-Resource-Planning-System* (ERP) auf der Unternehmensleitebene ist unter anderem für die Bestellabwicklung inkl. der Kunden- und Lieferantenbeziehungs-pflege, Rechnungslegung sowie die Produktionsgrobplanung zuständig, wofür es auch die Daten des untergeordneten MES nutzt. Eigentlich gehört es nicht mehr zur Automatisierungs- und Prozessleittechnik, wird aber dennoch mit

aufgeführt, weil es für die Unternehmensplanung und -steuerung wichtig ist die Produktion an die Unternehmensleitebene anzubinden.

Die beschriebene Automatisierungspyramide wird klassisch genannt, weil sie auf den technischen Grundlagen basiert, die in den siebziger und achtziger Jahren geschaffen und bis Ende der neunziger Jahre weiterentwickelt wurden. Daraus entstand das derzeit vorherrschende und oben beschriebene Automatisierungsmodell. Im Zuge der digitalen Transformation und Industrie 4.0 befindet sich dieses Modell bereits im Wandel. Gab es in der Vergangenheit relativ wenige Schnittstellen zwischen den Automatisierungsebenen und nur sehr begrenzte Datenintegration aus einzelnen Teilsystemen („Datensilos“), so ist in Zukunft die Weiterentwicklung zu umfangreicher Vernetzung und mehr Schnittstellen auf allen Ebenen zu erwarten. Die starre Struktur der Automatisierungspyramide wird zunehmend aufgeweicht und von einer flexiblen, dezentralen Netzwerkstruktur abgelöst werden, die die zentrale Steuerung und Organisation verdrängt. (Siepmann 2016b, S. 49) (Meudt et al. 2017, S. 7)

Dennoch ist in der Prozessindustrie keine schnelle Entwicklung dieses Trends zu erwarten, da verfahrenstechnische Anlagen in der Regel eine sehr lange Lebensdauer haben und ein Anlagenbetreiber mit seiner Entscheidung für ein bestimmtes Prozessleitsystem etwa 15 bis 20 Jahre oder länger leben muss. Deshalb wird das klassische Automatisierungsmodell auf absehbare Zeit weiterhin Gültigkeit besitzen. (Maurer 2012, S. 271)

2.2 DAS DIGITALE ABBILD

2.2.1 Definitionen, Begriffsabgrenzung und Funktion

Das digitale Abbild ist ein zentrales Konzept von Industrie 4.0. Der bereits vorgestellte Begriff des digitalen Zwillinges ist ein in der wissenschaftlichen Literatur und der industriellen Berichterstattung weit verbreiteter Begriff für digitale Abbilder.

GRÖSSER definiert den *digitalen Zwilling* (engl. *digital twin*) wie folgt:

„Ein digitaler Zwilling ist ein virtuelles Modell z.B. eines Prozesses, eines Produkts oder einer Dienstleistung, welches die reale und virtuelle Welt verbindet.“ (Grösser 2018)

KUHN betont in seiner Definition zusätzlich den Aspekt des Informationsaustausches:

„Digitale Zwillinge sind digitale Repräsentanzen von Dingen aus der realen Welt. Sie beschreiben sowohl physische Objekte als auch nicht-physische Dinge wie zum Beispiel Dienste, indem sie alle relevanten Informationen und Dienste mittels einer einheitlichen Schnittstelle zur Verfügung stellen.“ (Kuhn 2017)

Viele weitere Autoren verwenden ähnliche Definitionen, die letztlich jedoch die gleichen Kernaspekte vermitteln: die Abbildung realweltlicher Objekte materieller oder immaterieller Form in einem einheitlichen digitalen Format zum Zwecke des übergreifenden, vernetzten Informationsaustauschs, wobei zu den abbildbaren Objekten vor allem Produkte, Prozesse und Dienste gezählt werden. (Grösser 2018; Kuhn 2017)

Es gibt eine Reihe weiterer Begriffe in diesem Zusammenhang, die entweder dieselbe Bedeutung haben oder einen anderen Aspekt hervorheben. Seltener verwendete Synonyme für den digitalen Zwilling sind unter anderem der virtuelle Stellvertreter oder der digitale Avatar. (Schulte 2018; Grösser 2018)

Für die Realisierung eines digitalen Zwillings sind drei grundlegende Elemente erforderlich (Grösser 2018):

- (1) das abzubildende reale Objekt
- (2) der digitale Zwilling als Repräsentanz in einem IT-System
- (3) die Informationen, durch welche beide miteinander verbunden sind

Das Objekt verwendet Echtzeitdaten von Sensoren oder manuell eingegebene Daten, um Informationen über seinen Zustand zu sammeln. Diese werden in seiner digitalen Repräsentanz gespeichert, verarbeitet und ausgewertet mit dem Ziel, seine operative oder finanzielle Leistungsfähigkeit zu verbessern. (Grösser 2018) Dabei ist es unerheblich, ob das reale Objekt bereits existiert oder erst in Zukunft existieren wird. So kann beispielsweise ein Produkt bereits einen digitalen Zwilling besitzen, der alle Eigenschaften dessen finalen Zustands beschreibt, noch bevor es gefertigt wird. (Kuhn 2017)

Der digitale Zwilling in seiner konsequenten Ausgestaltung gilt nach aktuellem Stand der Technik bisher noch als Zukunftsvision, da viele der bestehenden technischen Lösungen nicht ausreichend interoperabel sind. Insbesondere fehlen einheitliche Schnittstellen für den übergreifenden Datenaustausch über Werkzeug- und Plattformgrenzen hinweg, so dass oft noch mehrere digitale Repräsentanzen eines Objekts für verschiedene Anwendungsfälle genutzt werden müssen. (Kuhn 2017)

Ein verwandter Ansatz ist der *digitale Schatten*, der der gegenwärtigen Situation in den Unternehmen Rechnung trägt und als Übergang zum digitalen Zwilling verstanden werden kann. BAUERNHANSL ET AL. definieren den digitalen Schatten als

„[...] das »hinreichend genaue« Abbild der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu schaffen.“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 23)

Mit dem digitalen Schatten wird der reale Produktionsprozess zunächst in die virtuelle Welt überführt. Darauf aufbauend soll dann der digitale Zwilling mittels eines Prozessmodells und Simulationsfunktionen ein möglichst exaktes Abbild der Realität generieren. (Bauernhansl et al. 2016, S. 23) Insofern kann der digitale Schatten als ein Bottom-Up-Ansatz verstanden werden, da er die Digitalisierung aus der praktischen Anwendung heraus vornimmt. Der digitale Zwilling folgt hingegen eher einem Top-Down-Ansatz, denn die Vision ist hier so angelegt, dass Objekte bereits virtuell entworfen und getestet werden noch bevor deren Herstellung und Nutzung erfolgt.

Im Kontext dieser Arbeit ist das *digitale Produktabbild* als eine Ausprägung des digitalen Schattens zu verstehen, da ein hinreichend genaues Abbild zu Auswertungszwecken für die Produktverfolgung und Qualitätserfassung geschaffen werden soll. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Abbildung von Produkten innerhalb des Herstellungsprozesses und

damit materiellen Objekten im Sinne von Erzeugnissen der industriellen Prozessproduktion.

Die Ansätze des digitalen Zwillings sowie des digitalen Schattens ähneln sich und haben grundsätzliche Überschneidungspunkte. Allerdings beziehen sich die Ausführungen in der Literatur zum überwiegenden Teil nur auf den digitalen Zwilling, wobei die Begriffe dort oft nicht trennscharf oder sogar synonym verwendet werden. Aufgrund der Allgemeingültigkeit der grundlegenden Ausführungen dieses Kapitels wird zunächst weiter auf den Begriff des digitalen Zwillings Bezug genommen und an den entsprechenden Stellen die relevanten Verbindungen zum Konzept dieser Arbeit gezogen.

2.2.2 Herkunft und Neuartigkeit des Ansatzes

Ebenso wie viele andere Konzepte und Technologien, die mit Industrie 4.0 verbunden werden, ist das digitale Abbild kein grundlegend neuer Ansatz. Bereits in den 1970er Jahren wurden in der Fertigungsindustrie digitale Abbilder in Form von CAD-Modellen (*computer-aided design*) und digitalen Stücklisten zur rechnergestützten Konstruktion in der Produktentwicklung und CAM-Software (*computer-aided manufacturing*) zur rechnergestützten Fertigung verwendet. Beides mündete damals mit CIM (*computer-integrated manufacturing*) zur rechnerintegrierten Fertigung in dem Versuch, die Fertigung vollständig zu automatisieren, was jedoch unter anderem an der Verfügbarkeit geeigneter und leistungsfähiger Informationstechnologien scheiterte. CIM wird heute häufig als Vorläufer von Industrie 4.0 gesehen. (Roth 2016, S. 6) (Siepmann 2016a, S. 21)

Im Zuge von Industrie 4.0 ist der Begriff des digitalen Zwillings in den Mittelpunkt der Aufmerksamkeit gerückt. Das I4.0-Marketing lässt diese Idee manchmal als etwas revolutionär Neues erscheinen. Doch der Ursprung lässt sich bis 2002 zurückverfolgen, wo es in einer Präsentation an der University of Michigan als konzeptuelles Ideal für das Produktlebenszyklusmanagement („*Conceptual Ideal for PLM*“) vorgestellt wurde. Die Idee sah vor, dass eine Entität von einem physischen System in Form eines digitalen Informationskonstrukts erzeugt werden könnte. Diese digitalen Informationen seien eine Spiegelung der inhärenten physischen Informationen des Systems und über seinen gesamten Lebenszyklus dynamisch mit ihm verbunden. Damals schon wurden als Grundelemente einer solchen Spiegelung die reale Welt („*Real Space*“), die virtuelle Welt („*Virtual Space*“) sowie der bidirektionale Informationsfluss („*Data Link*“) zwischen beiden benannt. (Grieves und Vickers 2017, 92f.)

Die digitale Spiegelung wurde seinerzeit noch nicht als „digitaler Zwilling“ bezeichnet. Über die Jahre hinweg hat sich die Begrifflichkeit mit der Weiterentwicklung des Konzepts gewandelt vom anfänglichen „Mirrored Spaces Model“ über „Information Mirroring Model“ bis hin zum heute vorherrschenden Begriff, den die damaligen Autoren etwa zur Zeit der Entfaltung der I4.0-Initiative auch für ihren Ansatz übernommen haben. (Grieves und Vickers 2017, S. 93)

Nach heutiger Ansicht und Stand der Technik liegt das Revolutionäre nicht in der Digitalisierung begründet, sondern vielmehr in den Möglichkeiten der Echtzeitvernetzung aller technischen Systeme, der Kommunikation und Datenhaltung unter Nutzung von Internet-technologien sowie des exponentiellen Anstiegs der Rechenleistung. (Bauernhansl et al.

2016, S. 6) Erst dadurch werden digitale Abbilder als virtuelle Echtzeitabbilder der Realität ihren vollen Nutzen entfalten können.

2.2.3 Zweck und Nutzen

Der Hauptzweck eines digitalen Zwillings ist die Ermöglichung eines übergreifenden Informationsaustausches. In der Idealvorstellung soll dies über den gesamten Produktlebenszyklus sowie die gesamte Wertschöpfungskette eines Produkts möglich sein. Damit wird der digitale Zwilling zum Kernkonzept von Industrie 4.0 für die Realisierung der horizontalen und vertikalen Integration innerhalb von Unternehmen und über die Unternehmensgrenzen hinaus. (Kuhn 2017) Die Analysten von Gartner zählen digitale Zwillinge zu den Top 10 der strategischen Technologie-Trends im Jahr 2018, wie auch bereits 2017. (Panetta 2017)

Der allgemein erwartete Nutzen erstreckt sich über alle Lebenszyklusphasen eines Produkts (Grösser 2018; Kuhn 2017):

- In der *Entwurfsphase* kann beispielsweise mit Hilfe von virtuellen Simulationen und Tests vorab überprüft werden, ob alle Produkthanforderungen erfüllt werden, was zu schnelleren und kostengünstigeren Entwicklungszyklen führen soll. Darüber hinaus ist es möglich, die Auswirkungen alternativer Designentscheidungen zu testen und zu bewerten.
- In der *Herstellungsphase* können mit Hilfe von Sensordaten und der hinterlegten Produktionsschritte sämtliche Parameter der Herstellung live erfasst und auf Einhaltung von Vorgabewerten geprüft werden. Die Auswertung solcher Daten und anschließende Prozessoptimierung sollen zu einer verbesserten Effizienz und Qualität führen. Die erfassten Daten können zudem als Qualitätsnachweis oder für die Nach- und Rückverfolgung dienen.
- In der *Nutzungsphase* kommen vor allem in der Fertigungsindustrie Ansätze wie etwa die vorausschauende Wartung zur Verbesserung der Verfügbarkeit von Produkten zum Einsatz.
- Die *Wiederverwertungsphase* kann zum Beispiel im Rahmen der Ersatzplanung oder Bewertung von Upcycling-Potentialen profitieren.

In der Fertigungsindustrie bezieht sich der Kerngedanke der vernetzten Produktion auf die Erwartungshaltung, dass sich das Produkt innerhalb der intelligenten Fabrik in Zukunft selbst durch die Produktion steuert. (Kagermann et al. 2013, S. 108) Dies wird in der Prozessindustrie in dieser Form jedoch nicht möglich sein, da die Produkte keinerlei eigene Informationsträger oder gar Intelligenz besitzen können. Die Potentiale sind hier seitens der gesteigerten Datendurchgängigkeit zu erwarten, auf deren Basis sich die Produktionsanlage selbst optimiert und eine umfassende Datenaggregation für Analysezwecke erlaubt. (Pötter et al. 2017, S. 69–72)

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Konzept wird eine Annäherung an die Nutzenerwartungen der Herstellungsphase angestrebt.

2.3 VERFOLGBARKEIT VON STOFFEN

Die Thematik der Nach- und Rückverfolgung von Stoffen wird in der Literatur unter dem Begriff der Rückverfolgbarkeit (engl. *traceability*) zusammengefasst. In der Praxis ist es eine häufige Fragestellung, die genaue Herkunft der Bestandteile eines Produkts festzustellen. Die Motivation dazu entstammt nicht nur dem Gedanken der Qualitätssicherung, um die Kundenzufriedenheit sicherzustellen, sondern gründet auch auf umfassenden regulatorischen Anforderungen, die auf Richtlinien, Verordnungen und Normen zurückzuführen sind.

So schreibt EU-Verordnung VO EU 178/2002 Art. 18 die Rückverfolgbarkeit von Lebens- und Futtermitteln vor und ist damit für das hier betrachtete Unternehmen verbindlich. Die EU-Verordnung definiert den Begriff der Rückverfolgbarkeit als

„[...] die Möglichkeit, ein Lebensmittel oder Futtermittel, ein der Lebensmittelgewinnung dienendes Tier oder einen Stoff, der dazu bestimmt ist oder von dem erwartet werden kann, dass er in einem Lebensmittel oder Futtermittel verarbeitet wird, durch alle Produktions-, Verarbeitungs- und Vertriebsstufen zu verfolgen.“ (Europäische Union 2002, S. 8)

Entsprechend ist nach VO EU 178/2002 Art. 18 (2) vorgeschrieben, dass Systeme und Verfahren einzurichten sind, *„[...] mit denen diese Informationen den zuständigen Behörden auf Aufforderung mitgeteilt werden können.“* (Europäische Union 2002, S. 11) Ähnliche regulatorische Anforderungen zur Rückverfolgbarkeit bestehen beispielsweise auch in der Gefahrenstoffindustrie (z. B. EU-Richtlinie 2008/43/EG) oder der Pharmaindustrie (z. B. EU-Richtlinie 2011/62/EU). Allgemein lässt sich auch aus dem Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG) eine Notwendigkeit zur Rückverfolgung ableiten.

Eine allgemeine und branchenneutrale Definition für den Begriff der Rückverfolgbarkeit entstammt der DIN EN ISO 9000:2005:

„Rückverfolgbarkeit ist die Möglichkeit den Werdegang, die Verwendung oder den Ort des Betrachteten zu verfolgen.“ (DIN EN ISO 9001:2005, S. 26)

Der englische Begriff der *Traceability* bezeichnet eigentlich die Verfolgbarkeit im Allgemeinen, was neben der Rückwärts- auch die Vorwärtsverfolgung beinhaltet. Man unterscheidet dementsprechend das vorwärts gerichtete *Tracking* und das rückwärts gerichtete *Tracing* durch die Wertschöpfungskette oder die Produktion. Eine weitere Unterscheidungsdimension ist die zwischen interner und externer Verfolgbarkeit. Die Interne ist auf den Waren- und Informationsfluss innerhalb des Unternehmens gerichtet und die Externe bezieht sich auf den zwischen mehreren Unternehmen bzw. einem Unternehmen und seinen Kunden. (Weckenmann et al. 2014, 841ff.)

In dieser Arbeit wird der Blick ausschließlich auf die internen Flüsse gerichtet, worauf sich auch alle weiteren Erläuterungen beziehen.

Beim internen Tracking – im Folgenden *Nachverfolgung* genannt – werden alle Elemente und Behandlungsparameter vom Rohstoffeingang bis zur Auslieferung des Endprodukts

über alle Prozessschritte hinweg verfolgt und dokumentiert. Die dabei gesammelten Informationen werden häufig zur Optimierung von Produktionsprozessen und logistischen Warenflüssen genutzt.

Beim internen Tracing – im Folgenden *Rückverfolgung* genannt – erfolgt die umgekehrte Verfolgung vom Endprodukt hin zu den für dessen Herstellung eingesetzten Rohstoffen und ihren Lieferanten. Die Informationen werden vor allem für die Qualitätssicherung genutzt. So kann zum Beispiel der Grund für ein fehlerhaftes Produkt ermittelt und ein zielgerichteter Warenrückruf durchgeführt werden. (Weckenmann et al. 2014, 841ff.) Das Prinzip der Nach- und Rückverfolgung ist in Abbildung 2 illustriert.

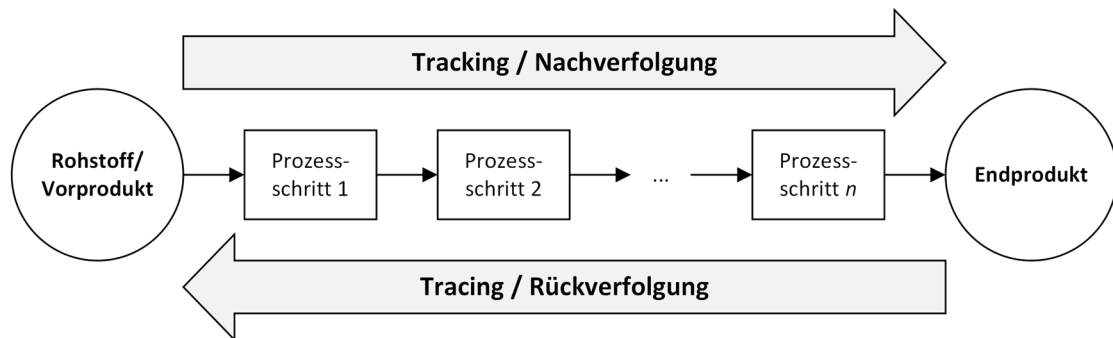


Abbildung 2: Tracking und Tracing

Quelle: In Anlehnung an (Weckenmann et al. 2014, S. 842)

Die Motivation für die Rückverfolgbarkeit von Produkten steht also in direktem Zusammenhang mit der Produktqualität und deren Nachweisbarkeit. Um etwa im Rahmen der Erfüllung gesetzlicher Vorgaben die zuvor beschriebene Auskunftsfähigkeit gegenüber Behörden zu gewährleisten, ist ein Herkunftsnachweis erforderlich. SCHÖNSLEBEN definiert diesen als „[...] Nachweis über die Produktion und Beschaffung eines Produkts, insbesondere über die darin verwendeten Komponenten.“ (Schönsleben 2016, S. 203)

Hierzu ist die Verwaltung von Chargen notwendig, die eine Basiseinheit für die Verfolgbarkeit darstellen. Unter einer Charge versteht man die „[...] Anzahl bzw. Menge von zusammen produzierten oder beschafften Gütern, die zum Zweck und aus der Sicht eines Herkunftsnachweises nicht voneinander unterscheidbar sind.“ (Schönsleben 2016, S. 203)

Das digitale Produktabbild soll dabei helfen, den Qualitäts- und Herkunftsnachweis für Produkte der kontinuierlichen Produktion zu ermöglichen, indem es die Dokumentation und die Zuordnung zwischen den Chargen der Rohstoffanlieferungen und denen der Produktauslieferungen gewährleistet.

3. ANALYSE DES PRODUKTIONSPROZESSES

Im folgenden Kapitel wird das Herstellungsverfahren eines Unternehmens der Prozessindustrie vorgestellt mit dem Ziel, die Eigenschaften eines ausgewählten Produkts über den gesamten Produktionsprozess hinweg abzubilden und zu verfolgen. Das betrachtete Unternehmen ist in mehreren Industriezweigen der verfahrenstechnischen Industrie aktiv und nutzt das Getreide Weizen als Ausgangsstoff, um daraus eine vielfältige Produktpalette herzustellen. Das Weizenstärke-Verfahren ist ein typischer und damit repräsentativer kontinuierlicher Prozess, der in einer Mono-Großanlage betrieben wird.

3.1 WEIZEN ALS VERFAHRENSTECHNISCHER ROHSTOFF UND SEINE PRODUKTE

Wie einleitend erwähnt stellt Weizen die Hauptrohstoffquelle des Verfahrens dar. Unter Nutzung einiger Hilfsstoffe wird eine Vielzahl von Produkten hergestellt, die ihrerseits als Ausgangsstoffe in den Verfahren der Kunden verwendet werden. Daher kann das Unternehmen selbst auch der Grundstoffindustrie zugeordnet werden, da es aus einem Rohstoff weiter verarbeitbare Zwischenprodukte herstellt. Es steht nach den Landwirten, die diesen Rohstoff anbauen und ernten, mit am Anfang mehrerer Wertschöpfungsketten. Möglichst genaue Informationen über die Herkunft und Qualität der Produkte haben daher einen hohen Stellenwert für das Unternehmen und seine Kunden.

Folgende Produkte stellt das Unternehmen aus Weizen her (Intern 2017):

- (1) *Vitalkleber* (Trockenkleber/Weizengluten) in pulveriger Form für die Lebensmittelindustrie, insbesondere die Backindustrie
- (2) *Trockenstärke* in pulveriger Form für die Papier- und Druckindustrie (Industriequalität, nicht für Lebensmittel geeignet)
- (3) *Tierfutter* in flüssiger und pelletierter Form für die Futtermittelindustrie
- (4) *Ethanol* (Alkohol) in flüssiger Form für die Lebensmittel-, Spirituosen-, Arzneimittel-, Kosmetik- und Chemieindustrie
- (5) *Glukose/Fruktose* in Sirup-Form für die Lebensmittel-, Getränke und Milchindustrie sowie Brauereien

In Abbildung 3 sind die Hauptprodukte dargestellt, die während des Weizenstärke-Prozesses entstehen. Die prozentualen Verhältnisse geben an, welche durchschnittliche Menge eines bestimmten Produkts aus einem Weizenkorn gewonnen wird. Das Korn wird dabei vollständig verarbeitet. Selbst das Abwasser hat noch einen Nutzen, da die darin enthaltenen organischen Stoffe als Nahrung für die Mikroorganismen in der kommunalen Kläranlage dienen und so deren Effizienz erhöhen. (Intern 2017)

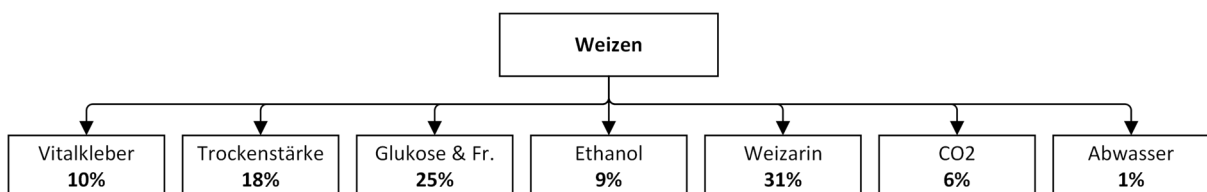


Abbildung 3: Hauptprodukte und Bilanz des Weizenstärke-Prozesses

Quelle: In Anlehnung an (Intern 2017)

Anhand dieser Aufstellung wird deutlich, dass Weizen ein sehr vielseitiger Rohstoff ist, dessen Produkte im Alltag allgegenwärtig sind.

3.2 VORGEHENSWEISE BEI DER PROZESSANALYSE

Um ein Konzept für ein digitales Produktabbild eines ausgewählten Weizenprodukts erstellen zu können, ist zunächst die Analyse des Produktionsprozesses erforderlich. In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise zur Erhebung der benötigten Informationen beschrieben und welche Informationsquellen hierfür herangezogen wurden. Das Ziel der Prozessanalyse ist es, den Produktionsprozess und damit den Produktweg aufzunehmen und vollständig zu erfassen, um auf dieser Basis die produktionstechnischen Merkmale und erforderlichen Berechnungen identifizieren zu können, die in das Produktabbild einfließen. Die im Detail durchgeführten Aktivitäten waren wie folgt:

- (1) Eingrenzung des Untersuchungsbereichs
- (2) Ermittlung der Produkt-/Prozessbestandteile:
 - (a) eingesetzte Grundverfahrensschritte
 - (b) Fließwege der Haupt-, Neben- und Hilfsstoffe
 - (c) zum Einsatz kommende Apparate und verbindende Rohrleitungen
 - (d) verwendete Messgrößen und Messstellen
- (3) Einteilung des Prozesses in drei Stufen nach HEMMING & WAGNER
- (4) Darstellung des Prozesses in einem Grundfließbild und Prozessmodell

Zu Beginn der Analyse war es zweckmäßig, den Untersuchungsbereich einzugrenzen, um eine zielgerichtete Erhebung durchführen zu können. Da die Anlage zur Klasse der Großanlagen zählt und dementsprechend sehr komplex ist, konnten für diese Arbeit nicht alle Produktwege und Betriebsmodi betrachtet werden.

Auf die Eingrenzung folgte die Identifizierung und Untersuchung der im Prozess eingesetzten Grundverfahrensschritte zur Herstellung des Produkts, der Fließwege der Haupt-, Neben- und Hilfsstoffe sowie der zum Einsatz kommenden Apparate. Im nächsten Schritt wurden die Messstellen lokalisiert, die dazu dienen, Betriebszustandsgrößen und Stoff- bzw. Produkteigenschaften zu erfassen. Hierzu gehören die Positionen von Sensoren der MSR-Technik als auch die Messstellen für Laboranalysen, die regelmäßig durchgeführt werden. Zuletzt wurde der aufgenommene Produktionsprozess in drei Prozessstufen nach HEMMING & WAGNER eingeteilt und in Form von Grundfließbildern modelliert.

Für die analytische Betrachtung wurden im Wesentlichen vier Methoden zur Informationsgewinnung angewandt:

- (1) Interviews (Expertenbefragung)
- (2) Dokumentenanalyse
- (3) Eigene Beobachtungen
- (4) Empirische Analyse

Zur Ermittlung der benötigten Informationen wurden der Prozessverantwortliche sowie die Prozessingenieure und Operatoren in vielen *Einzelinterviews* zu ihrem verfahrenstechnischen und prozessspezifischen Wissen befragt. Hierfür wurden Fragenkataloge

vorbereitet, die in den Expertengesprächen als Leitfaden dienten. Viele Experten haben einen spezifischen Erfahrungsbereich, in dem sie besondere Expertise aufweisen.

Weitere Informationsquellen bestanden aus einer Vielzahl an *Dokumenten* wie R&I-Diagrammen, Schulungsunterlagen, Prozess- und Apparatedokumentationen. Ergänzt wurden diese durch *eigene Beobachtungen* im Produktionsbereich, wo das angeeignete prozess- und anlagentechnische Wissen am Objekt durch Nachvollziehen von Apparatefunktionsweisen und Leitungsverläufen vertieft wurde. Auf diese Weise konnte der Produktweg auch physisch nachverfolgt werden.

Darüber hinaus wurde die Gelegenheit zur selbstständigen *empirischen Analyse* anhand des Prozessleitsystems der Anlage wahrgenommen. An diesem zentralen Punkt im Leitstand konnten die Produktionsabläufe online nachvollzogen und Prozessdaten in Echtzeit sowie in Retrospektive beobachtet und abgelesen werden. So war es beispielsweise auch möglich, Füllstands- oder Durchflussmengenverläufe zu analysieren und zu vergleichen.

Bei der Prozessanalyse wurde ein *iteratives Vorgehen* angewandt, sodass einige Analyse-schritte mehrfach durchlaufen wurden. Das Produktionsverfahren ist im Detail komplex und dementsprechend komplex sind auch die R&I-Diagramme, da hier sämtliche alternativen Rohr- und Signalverbindungen eingezeichnet sind, von denen nur ein Teil während des Normalbetriebs tatsächlich aktiv ist. Dieser Teil des Normalbetriebs war für das betrachtete Produkt zu identifizieren und in eine fehler- und widerspruchsfreie Abbildung des isolierten Prozesses zu überführen. Daher wurden einige Analyseaktivitäten mit anschließenden Expertenreviews in mehreren Iterationen vollzogen.

Die Ergebnisse der Prozessanalyse werden in den nachfolgenden Abschnitten präsentiert. Dabei ist zu beachten, dass den einzelnen Analyseschritten keine dedizierten Abschnitte in Reihenfolge der Analyseaktivitäten zugeordnet sind. Vielmehr wird zugunsten der besseren Nachvollziehbarkeit zuerst ein Überblick in Form eines Grundfließbildes gegeben und dann die einzelnen Prozessstufen im Detail erläutert. Zuletzt werden die verfahrenstechnischen Messgrößen beschrieben, die im Prozess und für das digitale Produktabbild von zentraler Bedeutung sind.

3.3 EINGRENZUNG UND PROZESSÜBERBLICK

Der zugrunde liegende Untersuchungsbereich umfasst zunächst theoretisch das gesamte Produktionsspektrum der Anlage. In einem ersten Schritt wird dieser dahingehend eingegrenzt, dass aus der vorliegenden Bandbreite eines der fünf Weizenderivate als zu betrachtendes Produkt ausgewählt wird, dessen Produktionsprozess im Normalbetrieb der Anlage nachvollzogen werden soll.

Für die Konzeption eines digitalen Produktabbilds für die Nach- und Rückverfolgbarkeit durch den gesamten Produktionsprozess wird die *Trockenstärke* als Produkt in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt. Diese Auswahl gewährt einen guten Kompromiss zwischen angemessener, repräsentativer Komplexität und Machbarkeit innerhalb des begrenzten Zeitrahmens, der für die Analyse zur Verfügung stand. Die Produktwege des Vitalklebers und Tierfutters erfüllen diese Anforderung beispielsweise nicht, da sie zu kurz

sind und den Kernbereich der Anlage kaum abdecken. Der Ethanol-Teil sowie die Raffinerie (Glukose/Fruktose) hingegen sind weit komplexer als es für die Diskussion der vorliegenden Fragestellung erforderlich ist und zudem teilweise chargenbasiert.

Eine weitere Eingrenzung des Untersuchungsbereichs besteht im weitgehenden Ausschluss von Zyklen in der Anlagenstruktur. Die Fließwege der Stoffe sind innerhalb gewisser Grenzen variabel, sodass mehrere Betriebsmodi in Form alternativer Fließwege existieren, um dasselbe Produkt herzustellen. Andere Zyklen entstehen durch Rückflüsse, die etwa aus abgefilterten und wiederverwendeten Prozesswässern bestehen. Sie enthalten zwar Rückstände des Produkts, können aber für die Untersuchung mengenmäßig vernachlässigt werden. Der zu untersuchende Kontext wurde daher insofern eingegrenzt, dass nur der Weg eines Endprodukts analysiert und dies auf den zyklensfreien Normalbetriebsmodus der Anlage beschränkt wird.

Bevor die einzelnen Prozessstufen und -schritte näher beschrieben werden, wird zunächst ein Überblick über den Prozess gegeben. Hierfür wird die Darstellung des Grundfließbildes gewählt, das einen hinreichend detaillierten Einblick in Form eines leicht nachvollziehbaren Blockdiagramms gewährt. Auf eine Darstellung mittels der R&I-DIN-Symbole wurde bewusst verzichtet, da der zusätzliche Detailgrad für den Zweck der Erläuterung keinen Nutzensgewinn beiträgt.

Das Grundfließbild der Anlage ist in Abbildung 4 dargestellt. Es enthält alle wesentlichen Prozessabschnitte, die zu den Endprodukten führen, jedoch keine Nebeneinrichtungen wie zum Beispiel das Kraftwerk oder die Wasseraufbereitung, da dies für die Nachvollziehbarkeit der Produktwege nicht erforderlich ist. Der Detailgrad ist vorerst niedrig gewählt, um einen einfachen Überblick über die gesamte Anlage zu gewährleisten. Ein detailliertes Grundfließbild wird im Anschluss an die Prozessbeschreibung in Form des Prozessmodells präsentiert.

Da der Produktweg der Trockenstärke den Schwerpunkt der Analyse bildet, ist dieser in Abbildung 4 farblich hervorgehoben. Die unterschiedlichen Farben kennzeichnen dabei die Einteilung in die drei Prozessstufen nach HEMMING & WAGNER:

- | | |
|--|--------|
| (1) Aufbereitung des Rohstoffs | (grün) |
| (2) Stoffumwandlung | (blau) |
| (3) Aufarbeitung des Umwandlungsprodukts | (rot) |

Zur Aufbereitung des Weizens und dessen Verarbeitung zu Weizenmehl zählen vor allem die Weizenreinigung und die Mühle. Diese Phase ist im Grundfließbild grün hervorgehoben. Die wesentlichen Stoffumwandlungen, bei denen der Rohstoff in seine einzelnen Bestandteile aufgetrennt wird, finden im sogenannten Nassprozess statt, der im Fließbild blau markiert ist. Die Bezeichnung Nassprozess ist charakterisierend für den hohen Feuchtegehalt der Stoffe, der einem flüssigen Aggregatzustand entspricht. Dieser Abschnitt stellt den Kernprozess der Anlage dar. Die Aufarbeitung des Umwandlungsprodukts findet schließlich im rot gefärbten Anlagenteil der Stärketrocknung statt, deren Ergebnis das fertige Produkt Trockenstärke ist.

In Analogie zum Nassprozess kann man die Rohstoffaufbereitung auch als Trockenprozess bezeichnen und die Produktaufarbeitung als Trocknungsprozess.

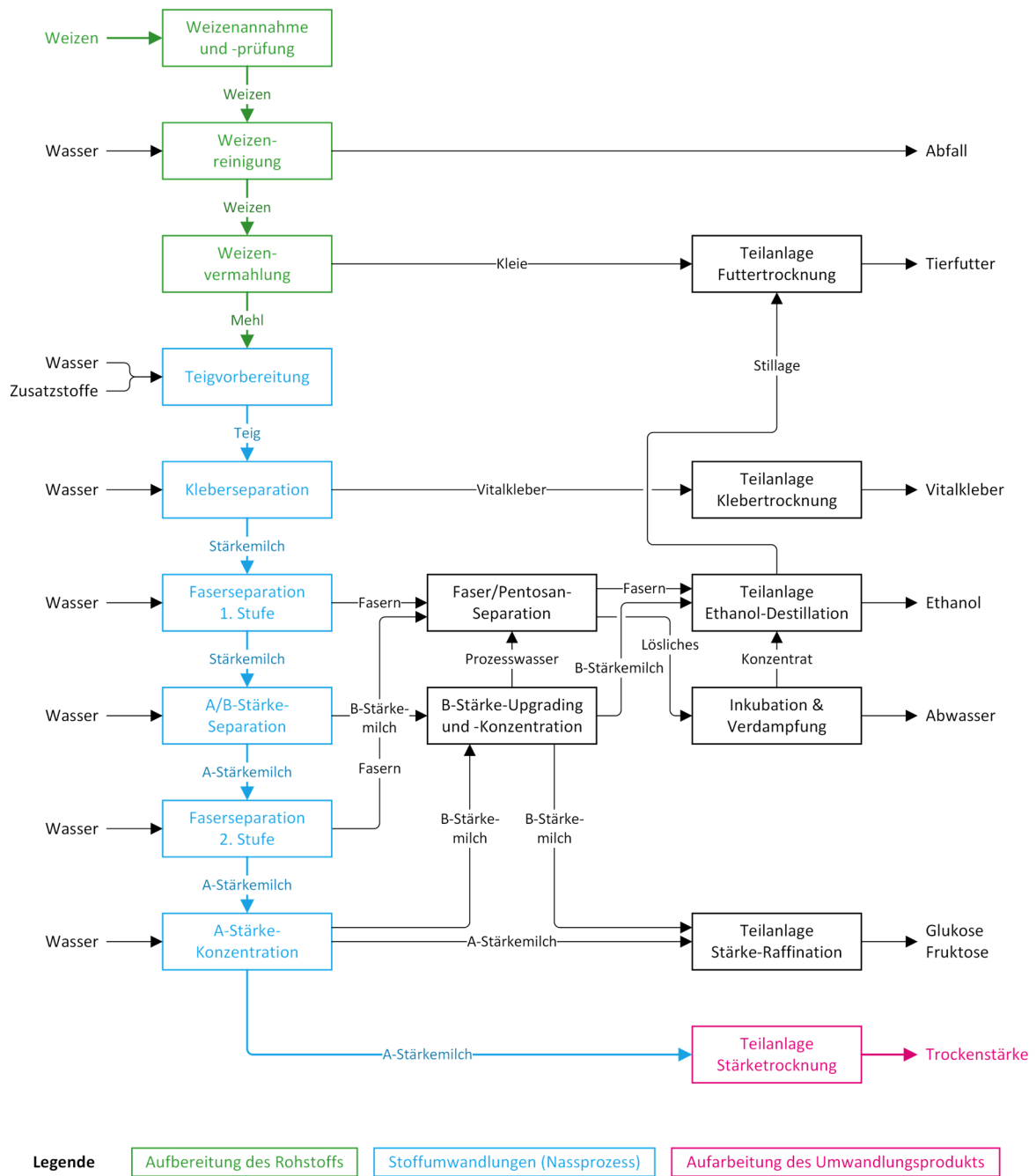


Abbildung 4: Grundfließbild der Anlage

Die Ergebnisse der Analyse des Trockenstärke-Produktionsprozesses werden in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt. In diesem Zuge sollen zum Verständnis des Verfahrens folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Grundverfahrensschritte werden angewendet?
- Welche Stoffumwandlungen finden statt und welche Haupt-, Zwischen- und Nebenprodukte entstehen dabei?
- Welche Apparate werden dafür eingesetzt und was bewirken diese?
- Welche Softwaresysteme unterstützen den Prozess?

3.4 BESCHREIBUNG DES PROZESSES

3.4.1 Stufe 1: Aufbereitung des Rohstoffs

Der Teilprozess der Aufbereitung des Rohstoffs Weizen zu Weizenmehl – auch Trockenprozess genannt – vollzieht sich in fünf Schritten, die in Abbildung 5 abgebildet sind.

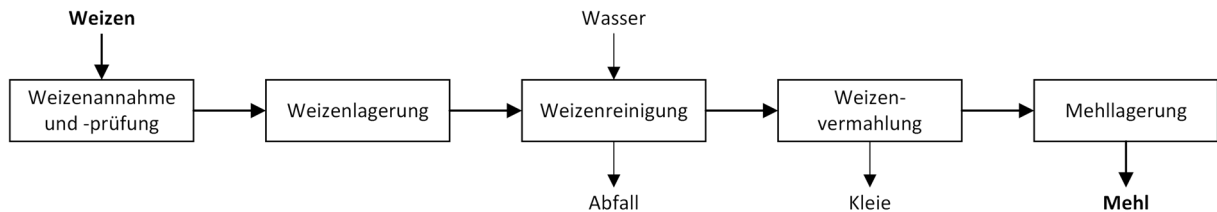


Abbildung 5: Prozessstufe 1: Aufbereitung des Rohstoffs

Die erste Stufe beginnt mit der Anlieferung des Weizens durch die Lieferanten. An der Werkseinfahrt werden die LKW zunächst gewogen und fahren dann zu einer sogenannten Schüttgasse. Dort wird manuell eine Rohstoffprobe entnommen, die sich aus acht Teilproben von verschiedenen Stellen der Ladung zusammensetzt. Die Probe wird per Rohrpost zum Labor transportiert und dort anhand von getreidespezifischen Qualitätskriterien geprüft, wie zum Beispiel Feuchte, Besatz, Schädlingsbefall, Proteingehalt und Hektolitergewicht. Weichen die Werte von den Qualitätsvorgaben des Unternehmens ab, wird die komplette Ladung abgewiesen, ansonsten wird sie entladen. Die Laborergebnisse werden in einem Labor-Informations- und Management-System (LIMS) gespeichert und die Proben als Rückstellproben zwei Jahre lang archiviert. An der Werksausfahrt wird der LKW erneut gewogen. Die Gewichts Differenz zwischen der Ein- und Ausfahrt wird von einem Softwaresystem, genannt „Weizenannahme“, erfasst und der Lieferung als Liefermenge zugeordnet. Die gesamten Daten des Annahmeprozesses werden inklusive Datum, Losnummer, Lieferant, Gewicht, Laborergebnissen sowie der Zeitdauer der Entladung mit Anfangs- und Endzeit im Weizenannahmeprotokoll verzeichnet. (Intern 2018a, 2018b)

Mittels geeigneter Fördertechnik wird der Weizen auf drei Silos mit einem Fassungsvermögen von jeweils 1700 Tonnen verteilt und dort zwischengelagert. Auf dem Weg dorthin wird der Rohstoff mit einem Trommelsieb grob vorgereinigt. Über weitere Transporteinrichtungen folgt ein Kreissieb, mit dem Besatz abgetrennt wird, wozu beispielsweise beschädigte Körner, Fremdgetreide, Unkrautsamen und Insekten gehören. Der Transport mündet in einem Vorlagebehälter, womit die Weizenlagerung abgeschlossen ist. (Intern 2018a, 2018b)

Auf Basis des gemessenen Stoffstroms wird die benötigte Wassermenge für die spätere Benetzung errechnet. Mit Magnetabscheidern in den Durchlaufwaagen werden magnetische Metalle abgetrennt. Danach fällt der Weizen in sogenannte Klassierer. Dies sind mehrstufige Separatoren, in denen alle Bestandteile abgetrennt werden, die nicht der spezifischen Größe und des spezifischen Gewichts eines Weizenkorns entsprechen. Nach den Klassierern wird der Weizen in Mixerschnecken mit der berechneten Wassermenge in einer ersten Benetzung vermischt und nacheinander in mehrere Abstehzellen gefüllt. Dort verweilt er mehrere Stunden, damit das Korn genug Wasser bis zu einer Feuchte von ca.

15% aufnehmen kann, um später leichter vermahlen werden zu können. Aus den Abstezellen führt der Weg über ein Silo zur zweiten Benetzung. Diesmal wird nur die Oberfläche des Korns benetzt, um die Sprödigkeit der Schale herabzusetzen, damit bei der späteren Vermahlung weniger Feinfasern im Mehl enthalten sind. Zuletzt wird der Weizen in ein Vorlagesilo gefüllt, das den Übergang zur Mühle markiert. Die Reinigung des Weizens stellt einerseits sicher, dass nachfolgende Apparate nicht durch Fremdkörper beschädigt werden und dass andererseits eine hohe Mehlqualität gewährleistet werden kann. (Intern 2018a, 2018b)

Im Anschluss an die Reinigung folgt die Vermahlung der Körner. Ein Weizenkorn besteht im Wesentlichen aus dem Keimling (2-3%), dem Mehlkörper (80-85%) sowie der Frucht- und Samenschale (5,2-7%). (Kirsch und Odenthal 1999) Das Ziel der Vermahlung ist die Abtrennung der Kleie vom Mehlkörper, die sich aus den Stoffen zusammensetzt, die nach der Absiebung des Mehls zurückbleiben. Hierzu wird ein mehrstufiges Walzen- und Siebssystem eingesetzt. Der Weizen wird aus dem Vorlagesilo wieder über Dosierwaagen geführt, gewogen und zu den ersten Weizenstühlen transportiert. Dort wird er vermahlen und in sogenannte Plansichter geleitet. Dies sind freischwingend angetriebene Apparate, die in mehreren Ebenen übereinander gestapelte Siebkästen mit nach unten hin abnehmender Maschenweite enthalten, mit denen die unterschiedlichen Teilchengrößen (Fraktionen) des Walzgutes voneinander abgetrennt werden. In den Plansichtern erfolgt so die Trennung des Walzgutes in die Mehlfraktion, die Kleiefraktion und mehrere Restfraktionen, die zur erneuten Verarbeitung bestimmt sind. Die Restfraktionen werden zurück auf die Weizenstühle geleitet, wo sie mit zur Teilchengröße passenden Walzen weiter vermahlen werden. Nach den Mahlstufen gelangt das Walzgut wieder auf die Plansichter. So entsteht ein kontinuierlicher offener Kreislauf an dessen Ende ein Mehl- und ein Kleiestrom stehen. (Intern 2018a, 2018b)

Das Mehl wird über Zyklone (im nächsten Abschnitt beschrieben) von der zum Transport verwendeten Luft abgetrennt und ins Mehllagersilo befördert, welches den Übergang zum Nassprozess bildet. Die Kleie hingegen wird in einem anderen Anlagenteil zu Tierfutter weiterverarbeitet. Damit ist die erste Prozessstufe abgeschlossen. (Intern 2018a, 2018b)

3.4.2 Stufe 2: Stoffumwandlung

In der zweiten Prozessstufe – dem Nassprozess – finden alle wesentlichen Stoffumwandlungen statt, um den aufbereiteten Rohstoff für die Nachbehandlung vorzubereiten. Hier werden die Zusammensetzung und die Eigenschaften der Stoffe mit Hilfe von Grundverfahren der physikalischen Verfahrenstechnik geändert. Dabei kommen insbesondere Verfahren der mechanischen Flüssigkeitsabtrennung zum Einsatz: *„Ziel der mechanischen Flüssigkeitsabtrennung ist die Trennung von Suspensionen [...] durch den Einfluss mechanischer Kräfte.“* (Hemming und Wagner 2008, S. 42) Dabei versteht man unter einer Suspension ein heterogenes Stoffgemisch, das aus einer Flüssigkeit mit fein darin verteilten Feststoffpartikeln besteht. (Hemming und Wagner 2008, S. 42) Dieser Abschnitt wird deshalb auch Nassprozess bzw. Nassteil genannt, da die verwendeten Stoffumwandlungsverfahren auf der Trennung von Suspensionen beruht. Der Nassprozess ist in Abbildung 6 dargestellt.

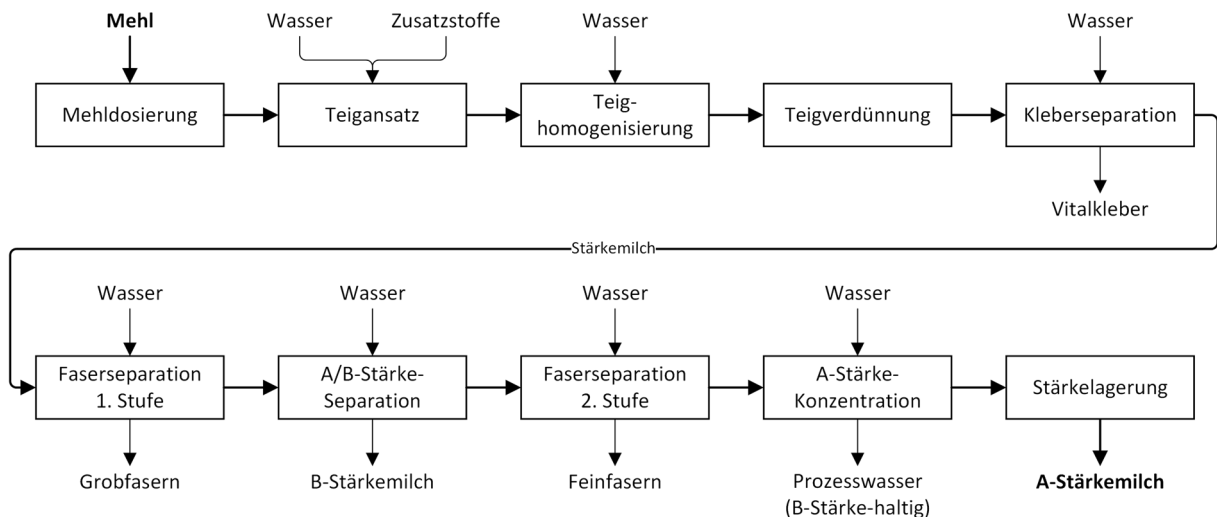


Abbildung 6: Prozessstufe 2: Stoffumwandlungen (Nassprozess)

Das Ziel des Nassprozesses ist es, das Weizenmehl in seine einzelnen Bestandteile aufzuspalten, um daraus die zuvor aufgeführte Vielzahl an Endprodukten herstellen zu können. Die Hauptprodukte dieses Teilprozesses sind A- und B-Stärke sowie Vitalkleber, die in einer ausreichenden Reinheit aus dem Weizenmehl gewonnen werden sollen. Als Nebenprodukte fallen Fasern, Pentosane (pflanzliche Schleimstoffe) und Lösliches (vollständig gelöste, nicht weiter physikalisch trennbare Stoffe) an, die ebenfalls Verwendung finden. (Intern 2018a)

Der Unterschied zwischen A- und B-Stärke besteht in ihrer Korngröße, deren Verhältnis sich wie folgt angeben lässt: $B < 10 \mu m < A$. Die A-Stärke wird einerseits zu Trockenstärke verarbeitet und andererseits für die Verzuckerung zu Glukose und Fruktose in der Raffinerie verwendet, wo sie als höherwertig gilt. (Intern 2018a) Für die aktuelle Analyse steht der Weg der A-Stärke im Vordergrund, da nur diese in das Endprodukt Trockenstärke eingeht. Die Wege anderer Stoffe werden deshalb aus Gründen mangelnder Relevanz nicht weiter erläutert. In Abbildung 4 (Grundfließbild der Anlage) sind diese jedoch ersichtlich.

Der Nassprozess beginnt mit der Mehldosierung. Hierfür wird das Weizenmehl vom Mehllagersilo wechselseitig in zwei Mehl-Wägesilos befördert. Es wird regelmäßig ein Wägesilo befüllt während das andere über die Messung des Gewichtsverlusts beim Materialaustrag das Mehl in den Teigmischer dosiert. Auf diese Weise kann ein gleichmäßiger Mehlstrom von etwa 50 Tonnen pro Stunde in den Teigmischer sichergestellt werden. (Intern 2018a, 2018b)

Es folgt der Teigansatz. Diesen Vorgang bezeichnet man allgemein auch als Anteigen. Dabei wird „[...] aus einem meist pulverigen Feststoff durch Zugabe einer Flüssigkeit unter stetigem Kneten eine teigige oder pastenartige Masse hergestellt.“ (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 323) In einem Teigmischer wird das Mehl unter kontinuierlicher Zugabe von vorgewärmtem Wasser und Additiven zu einem Teig vermischt und geknetet. Dadurch wird ein Trockensubstanzgehalt (TS-Gehalt) des Teigs von ca. 50% erreicht. Der Knetvorgang zieht den um die Stärkepartikel liegenden Vitalkleber auseinander. Er beginnt zu agglomerieren, was durch die Additive unterstützt wird. (Intern 2018a, 2018b)

Der nächste Schritt führt den Teig über einen Teigreifetank in einen Homogenisierer. In diesem als Gorator bezeichneten Gerät sorgen ineinandergreifende, taumelnd rotierende Zahnscheiben für eine Homogenisierung des Teigs. (Himmel 2016, S. 4) Unter Homogenisieren versteht man das „[...] Herstellen einer gleichverteilten Mischung mit dem Aussehen eines einheitlichen Stoffes“. (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 320) Der unter Zugabe von erwärmtem Verdünnungswasser homogenisierte Teig wird so zu einem TS-Gehalt von ca. 25% weiter verdünnt und in den Teigverdünnungstank gefördert, wo er weiter verrührt wird. Dadurch agglomeriert der Vitalkleber zu größeren Klumpen, die im nächsten Schritt mittels Siebung einfach abgetrennt werden können. Bereits geringe Veränderungen der Temperatur des Teigs haben hier signifikante Auswirkungen auf die Kleberqualität. Gleichmaßen von großer Bedeutung ist die Überwachung und Einstellung des pH-Werts, da der Teig versauern kann und die mikrobiologische Kontamination dann rapide zunimmt. (Intern 2018a, 2018b)

Für die Separation des Vitalklebers aus dem verdünnten Teig werden Bogensiebe genutzt. Diese Siebe sind schräggestellte, statische Überlaufsiebe mit Schlitzlöchern, über deren Siebfläche der verdünnte Teig geschwemmt wird. Dabei verbleiben die Agglomerate des Vitalklebers als Rückstand am Siebüberlauf und werden in einen Vorlagetank für die weitere Verarbeitung im entsprechenden Anlagenteil zwischengelagert. Die restlichen Stoffe passieren den Siebdurchgang als Filtrat – im Folgenden als Stärkemilch bezeichnet – mit anschließender Förderung zur ersten Stufe der Faserseparation. Die Stärkemilch enthält neben der A- und B-Stärke noch Fasern, Pentosane und lösliche Stoffe, die in den nachfolgenden Schritten weiter aufgetrennt werden. Die Zugabe von Wasser während der Kleberseparation dient der regelmäßigen Abreinigung der Siebe. (Intern 2018a, 2018b)

Es folgt die erste Stufe der Faserseparation. Sie dient der Abtrennung der Grobfasern (zusammen mit Pentosanen und Löslichem) aus der Stärkemilch mit Hilfe von Sieben mit Maschenweiten im Mikrometer-Bereich. Die Faserabtrennung ist zweiphasig ausgelegt: in der ersten Phase werden die Grobfasern mit Bogensieben abgetrennt und in der zweiten Phase in rotierenden Strahlsieben nochmals gesiebt und gleichzeitig gewaschen. Dies sorgt für eine bessere Ausbeute und sauberere Trennung als bei einer einfachen Siebung. Die abgetrennten Fasern fallen in einen Sammel tank und die verbleibende Stärkemilch wird in einen Vorlagetank für den nächsten Schritt zwischengelagert. (Intern 2018a)

Anschließend wird die Stärkemilch, die eine Suspension darstellt, mit Hilfe von Hydrozyklonen in ihre A- und B-Stärkeanteile aufgetrennt. (Intern 2018a) Zyklone sind Apparate aus der Gruppe der Zentrifugalabscheider. Sie nutzen die Fliehkraft zur Stofftrennung indem durch tangentielle Zuführung eines Stoffgemisches in ein zuerst zylindrisches und dann konisch zulaufendes Gehäuse eine Drehströmung erzeugt wird. Da der Einlauf des Stoffgemisches unter hohem Druck stattfindet, wird das Medium mit hoher Geschwindigkeit auf eine spiralförmige Bahn gezwungen. Die Zentrifugalkraft bewirkt, dass schwere Partikel an der Gehäusewand sedimentieren und nach unten in Richtung Unterlauf wandern während leichte Partikel nach oben über den Oberlauf abgeschieden werden. Dieses Funktionsprinzip ist in Abbildung 7 dargestellt. Das zu trennende Medium kann ein Luft-Partikel-Gemisch sein wie im Fall der Weizenmühle oder ein Flüssigkeit-Partikel-Gemisch. In letzterem Fall spricht man von einem Hydrozyklon. (Hemming und Wagner 2008, 53f.)

Um die A- und B-Anteile der Stärkesuspension zu separieren wird eine sechsstufige Hydrozyklonanlage (Separationshydrozyklon, SHZ) eingesetzt. Die einzelnen Stufen sind derart kaskadiert, dass der Unterlauf einer Stufe mit dem Einlauf der nachfolgenden Stufe sowie der Oberlauf mit dem Einlauf der vorhergehenden Stufe – wie in Abbildung 8 dargestellt – verbunden ist. Die Einspeisung der Stärkesuspension in die SHZ-Anlage unter Zugabe von Wasser erfolgt in der dritten Stufe. Aufgrund ihres relativ höheren Partikelgewichts wird die A-Stärkemilch zusammen mit den verbleibenden (Fein-)Fasern in Richtung der Unterläufe abtransportiert und verlässt die SHZ-Anlage durch den Unterlauf der sechsten Stufe. Die B-Stärke hingegen fließt über den Oberlauf der ersten Stufe ab und gelangt in einen Vorlagetank für die weitere Verarbeitung. Wie beim Anteigen ist auch hier die Überwachung der Temperaturentwicklung von großer Bedeutung, da bei Erwärmung einer Stärkesuspension über 55 °C die Gefahr der Verkleisterung besteht, was das Verstopfen der gesamten SHZ-Anlage zur Folge haben kann. (Intern 2018a, 2018b)

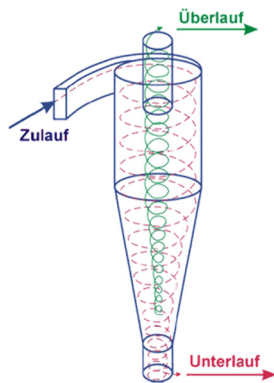


Abbildung 7: Funktionsweise eines Zyklons

Quelle: (Rößner et al. 2016)

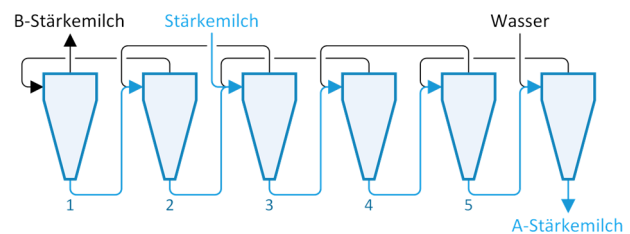


Abbildung 8: Funktionsweise der Separationshydrozyklonanlage

Quelle: (Intern 2018b)

Nach der A/B-Stärke-Separation werden in der zweiten Faserseparation die Feinfasern aus der A-Stärkemilch gefiltert. Hierzu werden noch feinmaschigere Siebe als in der ersten Faserseparation verwendet und es kommen ausschließlich Strahlsiebe zum Einsatz. Die abgetrennten Feinfasern gelangen in denselben Sammel tank wie die Grobfasern und die A-Stärkemilch in einen Vorlagetank für den letzten Stoffumwandlungsschritt. (Intern 2018a)

Die Konzentrationshydrozyklonanlage (KHZ-Anlage) funktioniert prinzipiell genau wie die SHZ-Anlage, hat jedoch zehn Stufen. Hier wird die A-Stärke unter Zugabe von Wasser im Gegenstromverfahren gewaschen und weiter konzentriert. Das Ziel ist es, eine hohe Reinheit der A-Stärke mit festgelegten Qualitätsparametern sicherzustellen. So soll zum Beispiel der Gesamtproteingehalt 0,35% nicht übersteigen und im Oberlauf der KHZ-Anlage weniger als 5% nicht-lösliche Stoffe enthalten sein. Dies wird unter anderem mit diesem letzten Schritt erreicht. (Intern 2018a)

Nach der Konzentration wird die A-Stärkemilch in zwei Lagerungstanks gefördert. Einer dieser Tanks stellt gleichzeitig den Vorlagetank für die Stärketrocknung dar und bildet den Übergang zur Aufarbeitung des Stoffumwandlungsprodukts. Damit ist die zweite Prozessstufe abgeschlossen. (Intern 2018a, 2018b)

3.4.3 Stufe 3: Aufarbeitung des Umwandlungsprodukts

In der letzten Prozessstufe – dem Trocknungsprozess – wird das zur A-Stärkemilch umgewandelte Weizenmehl zum fertigen Endprodukt aufgearbeitet. Im Zuge der Aufarbeitung wird die A-Stärkemilch entwässert, getrocknet, zu Pulver vermahlen und gekühlt. Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 9 dargestellt.

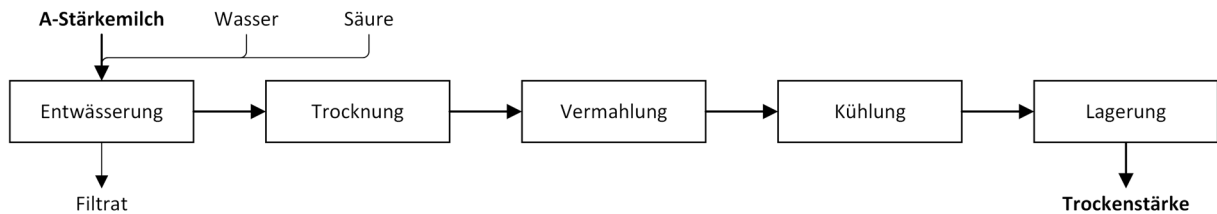


Abbildung 9: Prozessstufe 3: Aufarbeitung des Umwandlungsprodukts

Die Entwässerung findet in zwei parallel betriebenen Trommelfiltern statt, wovon einer mit Unterdruck (Vakuumtrommelfilter) und der andere mit Überdruck in einem Druckbehälter (Drucktrommelfilter, im Folgenden beschrieben) betrieben wird. Die Filtertrommel ist mit einem Filtertuch bespannt und läuft in einer Wanne, die mit der zu entwässernden A-Stärkesuspension gefüllt ist. Bei der Rotation taucht die Filtertrommel in die Wanne ein und die Suspension wird durch den Überdruck im Behälter auf die Filtertrommel gedrückt, auf der die A-Stärkepartikel in Form eines Filterkuchens haften bleiben. (Intern 2018a) Als Filterkuchen bezeichnet man die beim Filtern festgehaltenen Feststoffe, während die feststofffreie Flüssigkeit als Filtrat den Filter passiert. (Hemming und Wagner 2008, S. 57) Mit einem Druckstoß wird der Filterkuchen regelmäßig vom Tuch abgeworfen und verbleibende Reste mit einer Schabevorrichtung abgestoßen.

Der noch feuchte A-Stärke Kuchen mit einem Feuchtegehalt von ca. 35% wird aus dem Druckbehälter ausgeschleust und zu einem Stromrohtrockner transportiert. Dieser zeichnet sich durch eine nur wenige Sekunden betragende Trocknungszeit aus, was ein Verkleistern und Überhitzen der Stärke während der Trocknung verhindert. Die Filterkuchenstücke werden zunächst in einem Mischer aufgebrochen. Nun kann die A-Stärke zusammen mit der vom Trocknergebläse erzeugten Heißluft in das Stromrohr eingeblasen werden, wobei eine Aufgabeschleuder für einen feinen Materialeintrag in das Rohr sorgt. Dabei zerkleinert die Aufgabeschleuder das Material weiter, weshalb sie auch Desintegrator genannt wird. Durch die Zerkleinerung entsteht eine große Materialoberfläche, was die Wasserverdunstung im Trockner begünstigt. Der Feuchtegehalt am Trocknerausgang beträgt so nur noch ca. 12%. In den sich anschließenden Zyklonen werden die A-Stärkepartikel wieder vom Luftstrom getrennt und zur Mühle befördert. (Intern 2018a, 2018b)

In der Stärkemühle wird die A-Stärke vermahlen. Dadurch wird ein gleichbleibendes Schüttgewicht und eine den gewünschten Produkteigenschaften entsprechende mehlähnliche Körnung des getrockneten Materials erreicht. Der Austrag des noch warmen Produkts aus der Mühle erfolgt pneumatisch mit Hilfe von kühler Transportluft, die von einem Gebläse erzeugt wird. Auf diese Weise wird es während des Transports abgekühlt, am Ende der Strecke wieder durch Zyklone von der Transportluft abgetrennt und in einem Austragsbehälter aufgefangen. Von dort aus gelangt sie schließlich zu den Stärkesilos, die der Lagerung des fertigen Produkts dienen. (Intern 2018a, 2018b)

Bei der Stärkeverladung für die Auslieferung an die Kunden wird wie bei der Weizenannahme eine Probenentnahme durchgeführt. Die Probe wird im Labor auf ihre Qualitätsmerkmale hin analysiert und als Rückstellprobe zwei Jahre lang archiviert. Zu den untersuchten Merkmalen zählen die Feuchte, der pH-Wert, der Proteingehalt und ggf. weitere Eigenschaften, die individuell von einigen Kunden verlangt werden. Die Laborergebnisse werden im LIMS gespeichert und in Form eines Analysezertifikats ausgedruckt, welches dem Kunden ausgehändigt wird und als Qualitätsnachweis dient. Damit ist die letzte Prozessstufe abgeschlossen und das Ende des Produktionsprozesses erreicht. (Intern 2018a)

3.4.4 Prozessmodell

Bisher wurde der Prozess in Form von Grundfließbildern auf relativ hohem Abstraktionsniveau veranschaulicht. Für die Konzeption eines digitalen Produktabbaus ist ein detailliertes Modell des Prozesses bis auf Ebene der Apparate erforderlich. Mit Hilfe der aus der Prozessanalyse gewonnenen Informationen konnte das in Abbildung 10 abgebildete Prozessmodell erstellt werden. Es enthält alle Prozessschritte auf dem höchsten Detailgrad, der für die Erstellung des Konzepts benötigt wird.

Für die Modellierung werden eigene Notationselemente definiert, da einerseits die Analogie zum Grundfließbild gewahrt werden soll, andererseits aber auch Informationen abzubilden sind, die in einem Grundfließbild nicht vorgesehen sind. Die anderen standardisierten Fließbildarten führen durch die Verwendung von DIN-Symbolen statt Blockelementen eine unnötige Komplexität ein. Die verwendeten Notationselemente sind in Tabelle 1 aufgeführt.

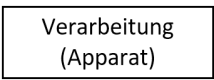
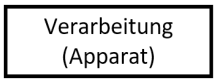
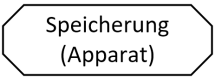
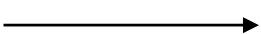

Notation	Bedeutung
	Verarbeitung
	Verarbeitung (Beginn einer Prozessstufe)
	Speicherung/Lagerung
	Hauptproduktfluss (1.0 pt.)
	Untergeordneter Stofffluss (0.25 pt.)

Tabelle 1: Notationselemente des Prozessmodells

In Verarbeitungsschritten werden Stoffumwandlungen durchgeführt während Tanks und Silos der Lagerung- bzw. Zwischenspeicherung dienen. Die Unterscheidung kann jedoch nicht immer trennscharf geführt werden. Beispielsweise wird der Weizen in den Abstehezellen zwar für mehrere Stunden zwischengelagert, gleichzeitig findet hierbei aber auch die erste Benetzung mit Wasser statt, was streng genommen ein Verarbeitungsschritt ist, da die Feuchteeigenschaft des Weizens verändert wird. Aus berechnungstechnischer Sicht werden die Abstehezellen jedoch wie Tanks behandelt und besitzen Füllstandsenoren. Die Hervorhebung des Beginns einer Prozessstufe hat rein informativen Charakter.

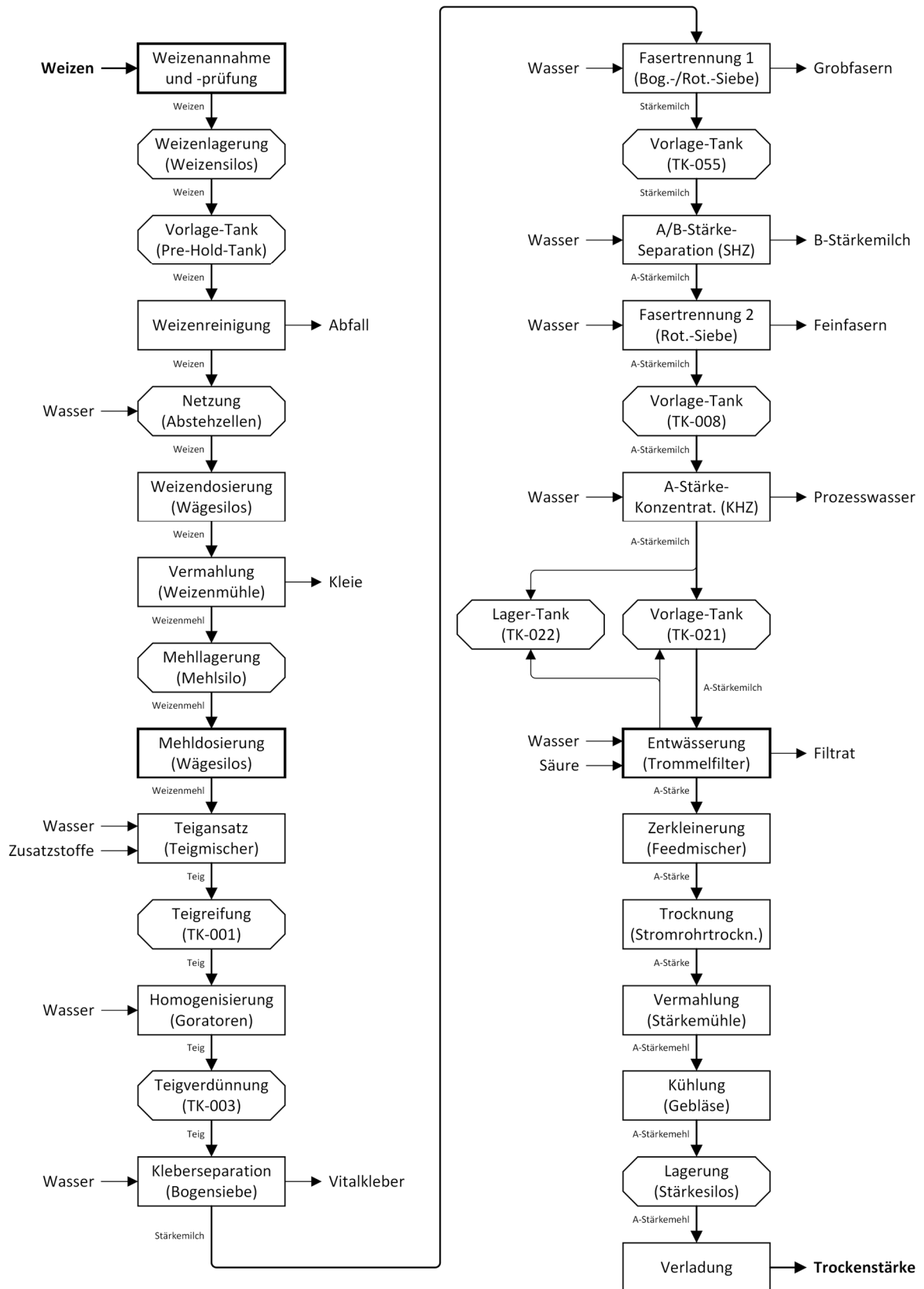


Abbildung 10: Prozessmodell des Weizenstärke-Produktionsprozesses

Das hier dargestellte Prozessmodell dient als Grundlage für die in Kapitel 4 erläuterte Entwicklung des Konzepts.

3.4.5 Verfahrenstechnische Messgrößen

In diesem Abschnitt sollen die verfahrenstechnischen Messgrößen vorgestellt werden, die im Produktionsprozess verwendet werden. Auf Basis dieser Größen erfolgt in der Anlage die Steuerung des Prozesses und die Messung der Produktqualität. Sie sind damit auch für das digitale Produktabbild von zentraler Bedeutung. Die Messgrößen lassen sich nach ihrem Verwendungszweck in zwei Kategorien einteilen: Betriebszustandsgrößen und Stoff-/Produkteigenschaften. (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 234)

Zu den wichtigsten *Betriebszustandsgrößen* zählen zum Beispiel Temperatur, Druck, Füllstände sowie Massen- und Volumenströme. In Tabelle 2 sind alle in dieser Arbeit relevanten Betriebszustandsgrößen mit Formelzeichen und Einheit aufgeführt. Während Temperatur, Druck, Volumen, Masse und Füllstand als allgemein bekannte Größen vorausgesetzt werden, erfordern die strömungstechnischen Vorgänge eine nähere Erläuterung. Sowohl der Volumenstrom als auch der Massestrom haben bei der Berechnung der Fließwege des Produkts im Rahmen der Produktverfolgung durch die Anlage fundamentale Bedeutung, da sie die bestimmenden Größen für die Verweilzeit des Produkts im Prozess darstellen.

Messgröße	Formelzeichen	Einheit
Druck (engl. <i>pressure</i>)	p	<i>bar</i>
Füllstand (engl. <i>level</i>)	L	% oder m^3
Masse (engl. <i>mass</i>)	m	<i>t</i>
Massestrom (engl. <i>mass flow</i>)	\dot{m}	$\frac{t}{h}$
Temperatur (engl. <i>temperature</i>)	ϑ oder T	°C oder <i>K</i>
Volumen (engl. <i>volume</i>)	V	m^3
Volumenstrom (engl. <i>flow</i>)	\dot{V}	$\frac{m^3}{h}$
Verweilzeit (engl. <i>residence time</i>)	τ	<i>h</i>

Tabelle 2: Messgrößen für Betriebszustände

Quelle: In Anlehnung an (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 234)

Der *Volumenstrom* bezeichnet das Flüssigkeitsvolumen, das in einer Zeiteinheit durch eine Rohrleitung strömt. Er wird berechnet als Quotient aus Volumen und Zeit in der Einheit Kubikmeter pro Stunde (m^3/h) (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 46):

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Der *Massestrom* bezeichnet die Masse, die in einer Zeiteinheit durch die Rohrleitung strömt und wird als Produkt des Volumenstroms und der Dichte des Stoffs in der Einheit Tonnen pro Stunde (t/h) berechnet (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 46):

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \quad (2)$$

Die *Verweilzeit* ist die zentrale Größe bei der Berechnung der Produktverfolgung. Jeder Apparat hat ein bestimmtes Verweilzeitverhalten. Die (mittlere) Verweilzeit gibt an, wie lange sich „[...] ein Masseteilchen des Mengenstroms in einem kontinuierlich durchströmten Apparat aufhält.“ Sie wird als Quotient aus Behältervolumen und Volumenstrom in der Einheit Stunden (*h*) berechnet (Hemming und Wagner 2008, S. 173):

$$\tau = \frac{V}{\dot{V}} \quad (3)$$

Zu den *Stoff- und Produkteigenschaftsgrößen* gehören die Dichte, der pH-Wert sowie der Trockensubstanz- und Proteingehalt. Sie sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Messgröße	Formelzeichen	Einheit
Dichte	ρ	$\frac{t}{m^3}$
pH-Wert	pH	(keine)
Trockensubstanzgehalt	TS	%
Proteingehalt	PR	% PR/TS

Tabelle 3: Messgrößen für Stoff- und Produkteigenschaften

Quelle: In Anlehnung an (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 235)

Die *Dichte* steht mit der Masse und dem Volumen eines Stoffs in Beziehung und beschreibt die Masse eines Stoffs, die in dem Volumen einer Stoffportion enthalten ist. Alternativ lassen sich auch die Stromgrößen ins Verhältnis setzen. Die Maßeinheit wird in Tonnen pro Kubikmeter (t/m^3) angegeben (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 270):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \quad (4)$$

Als *Feuchte* wird der Flüssigkeitsgehalt eines Feststoffs bezeichnet. In den meisten Fällen besteht dieser aus Wasser, kann jedoch auch andere Flüssigkeiten oder Gemische beinhalten. Die Feuchte hat direkten Einfluss auf wichtige Eigenschaften eines Zwischen- oder Endproduktes, wie zum Beispiel auf die Masse oder die Dichte und damit auch auf das Volumen. Sie wird als Anteil der Gesamtmasse in Prozent angegeben. (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 271)

In dieser Arbeit wird der *Trockensubstanzgehalt* (TS-Gehalt) eines Stoffes als indirekte Angabe der Feuchte verwendet. Beide Größen drücken im Wesentlichen denselben Sachverhalt aus und geben an, wie viel Feststoff oder wie viel Wasser eine bestimmte Stoffmenge enthält. Beispielsweise entspricht ein TS-Gehalt von 20% einer Feuchte von 80%, denn beide ergänzen sich zu 100%. (Wächter 2011, S. 63)

Während der Produktion werden alle Betriebszustandsgrößen per Online-Messung mittels Sensorik erfasst. Auf die Stoff- und Produkteigenschaftsgrößen trifft dies nicht durchgängig zu. Einige Größen, wie der Proteingehalt, werden nur per Laboranalyse bestimmt, während Dichte und TS-Gehalt oft nur aus anderen Größen errechnet werden. Der pH-Wert und der TS-Gehalt werden multimodal erfasst, das heißt, die Offline-Messung dient an bestimmten Punkten im Prozess der Kontrolle und Bestätigung der Online-Messung.

3.5 INTERN EINGESETZTE IT-SYSTEME

Die im Unternehmen eingesetzten IT-Systeme bestehen zum größten Teil aus einer Standardauswahl an Systemen, die in der Prozessindustrie verbreitet sind. Deren funktionale Anordnung folgt der klassischen Architektur der Automatisierungspyramide.

Für die Planung und Steuerung der betrieblichen Abläufe wird das ERP-System *Oracle JD Edwards* eingesetzt, wobei dessen Ablösung durch *SAP ERP* geplant ist. Ein MES-System kommt nicht zum Einsatz, da für den vorliegenden kontinuierlichen Produktionsprozess eine Feinplanung nicht zwingend erforderlich ist, denn es werden im Normalbetrieb annähernd gleichbleibende Produktausbringungsmengen produziert. Sollte eine Skalierung der Produktion notwendig sein, wird eine Änderung von Steuerungsparametern im Prozessleitsystem vorgenommen, um die gewünschte Wirkung zu erzielen.

Als Prozessleitsystem kommt *Siemens SIMATIC PCS 7* zur Anwendung, welches die Feld-, Steuerungs- und Prozessleitebene der Automatisierungspyramide als integrierte Gesamtlösung abdeckt. In der Datenbank des PLS werden die Messdaten der Feldgeräte in einer Art Ringspeicher zeitlich begrenzt für etwa ein Jahr vorgehalten. Für die dauerhafte Archivierung dieser Daten wird das *OSIsoft PI System* verwendet, das zur Klasse der *Process Information Management Systems* (PIMS) gehört. Dessen Kernelement ist der *PI Server* mit seinem *PI Data Archive*, welches die zentrale Datenbank des Systems darstellt. Der *PI Server* bezieht die Felddaten nachrichtenbasiert – also sobald sich Sensordaten ändern – in Echtzeit vom PLS. Mit dem Werkzeug *PI ProcessBook* können diese Daten dann für Visualisierungen und Analysen genutzt werden.

Weitere am Prozess direkt beteiligte Systeme dienen der Rohstoffannahme und der Dokumentation von Laboranalyseergebnissen. Für die Rohstoffannahme kommt eine Weighbridge-Software, intern *Weizenannahmeprogramm* genannt, zur Anwendung. Es ordnet die Weizenlieferungen und deren Gewicht den Bestellungen und Lieferanten zu und sendet diese Informationen ans ERP-System, in dem die Annahmen protokolliert werden. Schließlich gibt es noch das LIMS-System *Siemens SIMATIC IT Unilab*, mit dem die Labore alle Analyseergebnisse der Proben erfassen und speichern.

Eine Übersicht der Systeme ist in Tabelle 4 zusammengefasst. Abbildung 11 bietet darüber hinaus einen Überblick über die grundlegende Verknüpfung der Systeme im Zusammenhang des zugrunde liegenden Produktionsprozesses.

Ein praktisches Problem bei der Verwendung der Informationen aus den Systemen besteht in deren unzureichender Integration. Die Daten der ERP-, LIMS- und PIMS-Systeme liegen in sogenannten „Datensilos“ vor. Das heißt, die Systeme sind nur partiell miteinander integriert, weshalb ihre Daten über die wenigen etablierten Schnittstellen hinaus nur

manuell abfrag- und exportierbar sind. Insbesondere besteht keine Verbindung zwischen den PIMS- und ERP-/LIMS-Systemen, was sich in Abbildung 11 in einer horizontalen Trennung widerspiegelt. Übergreifende Datenanalysen sind somit nicht möglich, da keine Abfragen über Prozess-, Labor- und Logistikdaten hinweg getätigt werden können. Dies ist im Hinblick auf die Realisierung eines digitalen Produktabbilds von Nachteil.

Kategorie	Software
ERP	Oracle JD Edwards
LIMS	Siemens SIMATIC IT Unilab
PIMS	OSIsoft PI System
PLS	Siemens SIMATIC PCS 7
Weighbridge	„Weizenannahme“

Tabelle 4: Eingesetzte IT-Systeme im Unternehmen

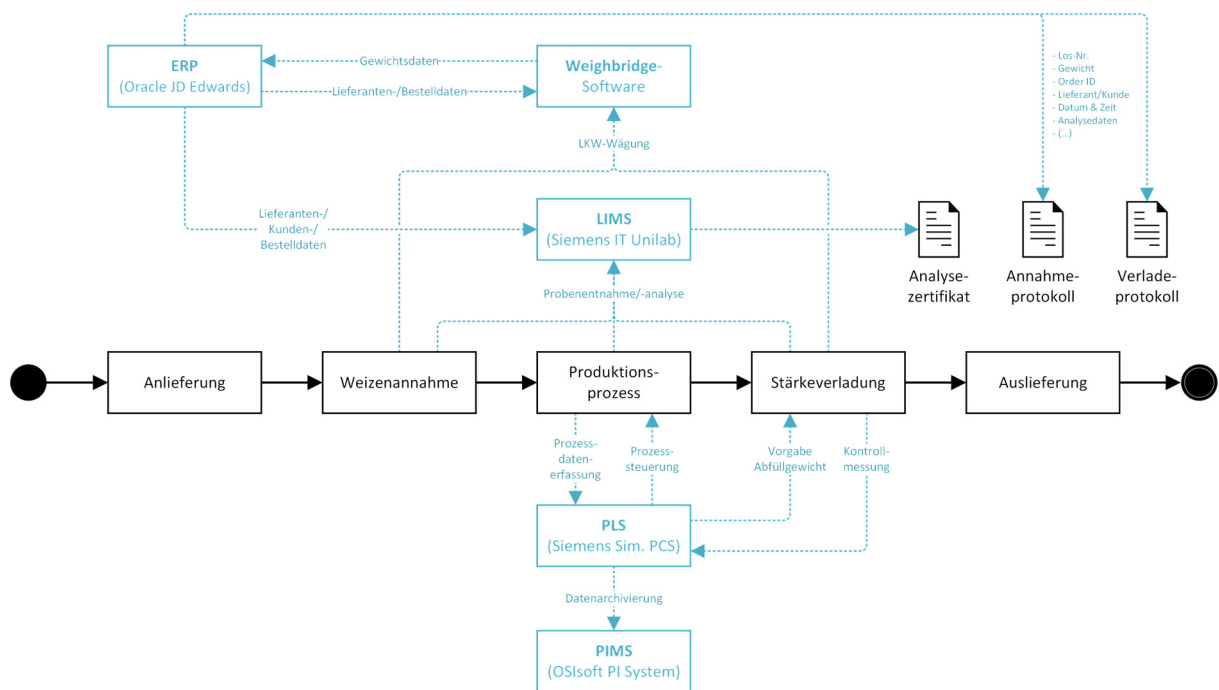


Abbildung 11: Relevante unterstützende IT-Systeme des Unternehmens

3.6 INTERNE PRODUKTVERFOLGUNG & QUALITÄTSDOKUMENTATION

Die im Prozess hergestellte Trockenstärke ist nur als Industrie- und nicht als Lebensmittelqualität eingestuft, womit die Verpflichtung zur Rückverfolgbarkeit nach VO EU 178/2002 Art. 18 für dieses Produkt zunächst nicht direkt verbindlich ist. Allerdings wird ein Teil davon unmittelbar vor der letzten Prozessstufe der Stärketrocknung für die Raffination von Glukose und Fruktose abgezweigt. Dadurch ist der größte Teil des Prozesses letztlich doch von dieser Gesetzgebung betroffen. Weiterhin behält sich das Unternehmen planerisch die Möglichkeit vor, den Prozess jederzeit auf Lebensmittelqualität umzurüsten, sollten die Marktbedingungen zu einer vorteilhaften Bewertung dieser Option führen. Daher kann das in dieser Arbeit entwickelte Konzept gegebenenfalls nicht nur als beispielhaft, sondern in Bezug auf das Unternehmen auch als prospektiv angesehen werden.

Nach aktuellem Stand werden die Aufgabenstellungen der Nach- und Rückverfolgung sowie der Qualitätsdokumentation manuell bearbeitet. Bei der Rückverfolgung ist es beispielsweise das Ziel, die Chargennummer(n) der Weizenanlieferung zu bestimmen, aus der eine Charge des Trockenstärke-Endprodukts hergestellt worden ist. Hierfür berechnet ein Prozessverantwortlicher schrittweise manuell die Durchflussmengen und Verweilzeiten der Stoffe in den jeweiligen Prozessschritten. Zu diesem Zweck werden die archivierten Daten aus dem PI System genutzt, die mit PI ProcessBook visualisiert werden können. Die manuelle Durchführung dieser Aufgabe ist relativ aufwendig und beansprucht je nach Produkt eine Zeit von etwa ein bis zwei Arbeitsstunden.

Qualitätsinformationen werden in gleicher Weise nach Bedarf manuell recherchiert und dokumentiert. Die produktbezogene Qualitätserfassung konzentriert sich auf die Rohstoffannahme und die Produktverladung, also im Wesentlichen auf die Abschnitte vor und nach der Produktion. Es finden auch In-Prozess-Kontrollen (IPK) statt, die darauf abzielen, zu kontrollieren, ob der Prozess innerhalb der vorgegebenen Parameter funktioniert. Eine Zuordnung der IPK-Qualitätsmessungen zu einzelnen Chargen kann jedoch nur im Rahmen der manuell berechneten Produktverfolgung stattfinden.

Insgesamt ist also ein Bedarf an IT-Unterstützung für diese Aufgaben festzustellen.

3.7 ZUSAMMENFASSUNG DER HERAUSFORDERUNGEN

Zum Abschluss dieses Kapitels sollen die Herausforderungen zusammengefasst werden, die hinsichtlich der Erzeugung und Nutzung eines digitalen Produktabbilds identifiziert wurden. Sie teilen sich auf in allgemeine Herausforderungen, die für die gesamte Prozessindustrie gelten, und spezifische, die für den vorliegenden Prozess zutreffen.

Die allgemeinen Herausforderungen wurden bereits in der Einleitung der Arbeit in Abgrenzung zur Fertigungsindustrie angedeutet und betreffen die physikalische *Beschaffenheit der verarbeiteten Stoffe*. Die Handhabung von Fließ-, Schüttgütern und Gasen ist komplizierter als die von Stückgütern, da diese Stoffe in der Regel nicht abzählbar sind und massen- oder volumenorientiert gemessen werden. (Graef 2016, S. 75) Sie sind insbesondere in der kontinuierlichen Produktion nicht trennscharf voneinander separierbar, was die Verfolgung und Zuordnung erschwert. Die Verarbeitung dieser zumeist formlosen Stoffe in häufig schnell ablaufenden Prozessen erfordert komplexe Systeme für die Steuerung und Überwachung der zahlreichen physikalischen und chemischen Prozessparameter, um die Stabilität, Sicherheit und Qualität der Abläufe sicherzustellen. (Schenk et al. 2014, 694f.)

Infolge der Stoffbeschaffenheit sind keinerlei Technologien wie etwa Sensor-, Identifikations- oder Rechentechnik im oder am Produkt selbst realisierbar, die eine direkte Kommunikation und damit die digitale Abbildung ermöglichen würden. In einer intelligenten Fertigungsfabrik sorgen intelligente Produkte mit einem digitalen Produktgedächtnis selbst für die Speicherung ihrer Produktionshistorie, wie zum Beispiel die durchlaufenen Prozessschritte oder die eigenen Qualitätsmerkmale. (Vogel-Heuser et al. 2017, S. 6; Huber 2016, S. 49) Für verfahrenstechnische Erzeugnisse müssen derartige Funktionen vollständig durch die Systeme der Anlage realisiert werden. Sie werden immer „*unintelligent*“

bleiben, denn sie können keine Informationen tragen und auch nicht eigenständig mit ihrer Umgebung kommunizieren.

Eine weitere allgemeine Herausforderung besteht hinsichtlich der *Sensibilität von Daten*. Die Informationen des digitalen Produktabbilds sollen zukünftig auch über die Unternehmensgrenzen hinaus einen Nutzen stiften. Aufgrund der Untrennbarkeit von Produkt- und Prozessstruktur in der verfahrenstechnischen Produktion muss beim Austausch des Abbilds darauf geachtet werden, dass keine prozessbezogenen wettbewerbsrelevanten Informationen unbeabsichtigt weitergegeben werden.

Weiterhin ist die unzureichende *Integration der bestehenden IT-Systeme* ein noch immer verbreitetes allgemeines Problem, jedoch insbesondere auch ein spezielles. So sind die Systeme der Weizenannahme, das LIMS, das PLS und das PIMS nicht ausreichend miteinander integriert, sodass die Daten teilweise manuell exportiert und zusammengeführt werden müssen, um Informationen über eine Charge zu aggregieren.

Fehlende *Sensorik* an wichtigen Stellen zur Ermittlung von Durchflussmengen und Qualitätsdaten sind eine spezifische Herausforderung im vorliegenden Prozess. Da Sensortechnik und deren Integration ins Prozessleitsystem relativ kostenintensiv sind, werden diese nur dort eingesetzt, wo es für die Steuerung der Anlage als notwendig erachtet wird. Diese Anforderung ist jedoch nicht immer deckungsgleich mit der Menge an Sensoren, die für eine genaue Produktabbildung wünschenswert wäre.

Schließlich gibt es noch die Herausforderung von *Zyklen in der Prozessstruktur*. Darunter versteht man „[...] eine Situation, bei der ein Produkt seine eigene Komponente ist, entweder direkt oder über Zwischenprodukte.“ (Schönsleben 2016, S. 203) Durch Stoffflüsse von einem Prozessschritt in einen anderen entstehen so Kreisläufe, die eine Produktverfolgung schwierig bis unmöglich machen.

4. KONZEPT

4.1 GELTUNGSBEREICH

Das in diesem Kapitel vorgestellte Konzept zur Erzeugung eines digitalen Produktabbilds unterliegt aufgrund der Vielgestaltigkeit der Verfahrenstechnik einer Reihe von Einschränkungen. Im Laufe der bisherigen Ausführungen wurden diese zum Teil bereits diskutiert und sollen hier aggregiert aufgeführt und ergänzt werden (vgl. Tabelle 5).

Merkmals	Geltungsbereich
Prozess-/Anlagentyp	Kontinuierlicher Prozess in einer Monoanlage
Produktlebenszyklusphase	Herstellungsphase (Produktion)
Anwendungsbereich	Nach- und Rückverfolgung, Qualitätserfassung
Anlagenbetriebsmodus	Normalbetrieb, nur Hauptproduktweg
Ausgangsgut	Einzelner Rohstoff (hier: Weizen)
Endprodukt	Einzelnes Produkt (hier: Weizen-/Trockenstärke)

Tabelle 5: Geltungsbereich des Konzepts

Das Konzept wird – gemäß der Zielsetzung der Arbeit – für den Anwendungsbereich der Nach-, Rückverfolgung und Qualitätserfassung eines Produkts der kontinuierlichen Prozessherstellung entworfen. Dabei wird vom Normalbetrieb einer Monoanlage ausgegangen und nur der Hauptproduktweg ohne Alternativflüsse oder Kreisläufe betrachtet.

Hervorzuheben ist, dass als *Ausgangsgut* nur ein einzelner Rohstoff dient. Das ist in der Prozessindustrie häufig der Fall, da diese sich durch die Merkmale der Kuppelproduktion und divergierende Produktstrukturen auszeichnet. Kuppelproduktion bedeutet, dass verschiedene Produkte im selben Prozessschritt hergestellt werden, was zu einer Produktstruktur führt, die einer umgekehrten Baumstruktur entspricht. Aus einem Ausgangsgut – oder manchmal auch wenigen gleichzeitig verarbeiteten Ausgangsgütern – werden das Hauptprodukt sowie Neben- und Abfallprodukte erzeugt. Dies steht im Gegensatz zur Fertigungsindustrie, wo üblicherweise aus einer Vielzahl an Einzelteilen ein einzelnes Hauptprodukt zusammengesetzt wird. (Schönsleben 2016, 351f.) Im vorliegenden Prozess stellt der Rohstoff Weizen das einzige Ausgangsgut dar, worauf das Konzept dementsprechend ausgerichtet ist. Es gibt zwar mehrere Hilfsstoffe, die in den Prozess einfließen, doch diese werden nur mengenmäßig und nicht verfolgungstechnisch berücksichtigt.

Zu beachten ist weiterhin, dass sich der Entwurf dieser Arbeit auf die Phase der *Produktion* konzentriert. Der Ausgangspunkt liegt dabei in der Rohstoffanlieferung durch den Lieferanten, womit direkt an die Eingangslogistik angeknüpft wird. Am anderen Ende der Prozesskette besteht der Anknüpfungspunkt in der Verladeeinheit für den Kunden und damit der Ausgangslogistik. An beiden Punkten sind die Rohstoff- bzw. Produktmengen über Chargennummern identifizierbar. Mit dem digitalen Produktabbild soll hier unter anderem die Traceability-Lücke zwischen der Eingangs- und der Ausgangslogistik geschlossen werden. Die bestehenden Techniken des *Tracking & Tracing* aus der Produktionslogistik lassen sich jedoch nicht ohne Weiteres übertragen, da diese eindeutig identifizierbare Objekte benötigen, sodass eine andere Lösung erforderlich ist.

4.2 VORGEHENSWEISE UND KONZEPTBESTANDTEILE

Der im Folgenden vorgestellte Ansatz zur Erzeugung eines digitalen Produktabbilds ist zum Teil angelehnt an die Vorgehensweise, die von der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) für Anwender in der produktionstechnischen Industrie vorgeschlagen wird. BAUERNHANSL ET AL. beschreiben hier einen neunstufigen Migrationspfad, der die Unternehmen an die Erhebung eines digitalen Schattens heranführt. Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, ist das digitale Produktabbild als eine erweiterte Ausprägung des digitalen Schattens zu verstehen, weshalb der vorgeschlagene Migrationspfad teilweise in die angewandte Vorgehensweise integriert wird und deren Basis bildet.

Der WGP-Migrationspfad zur Realisierung einer Datenerfassung für die Erzeugung eines digitalen Schattens umfasst die folgenden Phasen (Bauernhansl et al. 2016, 29ff.):

- (1) Zuerst wird in der **Zieldefinition** festgelegt, welche Ziele und Zwecke der digitale Schatten erfüllen soll, denn hiernach richtet sich der Datenbedarf.
- (2) Mit der **Datenbedarfsanalyse** werden die für die Zielerreichung benötigten Daten ermittelt. Hier werden die Datenpunkte im Prozess definiert, an denen Informationen zu erfassen sind.
- (3) Beim **Datenbedarfsabgleich** wird geprüft, welche der benötigten Daten bereits erfasst werden und für welche eine neue Erfassung eingerichtet werden muss. Die vorhandenen Daten werden bezüglich ihres Umfangs und ihrer Form hinterfragt und ihre Erhebung bei Nonkonformität mit den Zielen neu ausgestaltet.
- (4) Mit der **Technologieauswahl** wird für die Datenbedarfspunkte entschieden, welche Erfassungstechnologie anzuwenden ist. Auswahlkriterien hierfür können zum Beispiel sein: Messprinzip, Granularität, Schnittstellen und Datenformat.
- (5) Bei der **Technologieüberprüfung** werden die bereits implementierten Datenerfassungstechnologien auf ihre Eignung und Eingliederung in das Gesamtkonzept hin überprüft.
- (6) Die **Technologieausgestaltung** umfasst die operative Ausgestaltung des in Phase 4 und 5 entwickelten Technologiekonzepts. Dabei werden Fragen geklärt wie zum Beispiel: Anbringungsart/-ort, Verknüpfung von Technologie und Status des Digitalisierungsobjekts sowie Fusion multimodaler Daten.
- (7) Im Rahmen der **Implementierung** werden die vorzunehmenden Umsetzungsaktivitäten zeitlich sowie inhaltlich geplant und durchgeführt.
- (8) In der **Initialtestphase** ist die Korrektheit der Datenerfassung und -speicherung zu prüfen mit Hilfe geeigneter Methoden wie etwa Vergleich auf Basis redundanter Datenerhebung oder manueller Begleitung.
- (9) Die **Datenerhebung und -überprüfung** markiert die Überführung in den Produktivbetrieb in dessen Verlauf regelmäßige Überprüfungen durchzuführen sind, ob die erhobenen Daten den Anforderungen noch immer entsprechen. Im Falle einer Diskrepanz muss der Migrationspfad erneut durchlaufen werden.

Der WGP-Migrationspfad deckt jedoch nur einen Teil der Konzeptentwicklung ab, denn er schafft mit dem digitalen Schatten lediglich die datenerfassungstechnische Grundlage

für weiterführende Anwendungen. Im Folgenden sollen die soeben beschriebenen Migrationsaktivitäten in die angewandte Vorgehensweise eingeordnet werden, die in Abbildung 12 mit den annotierten WGP-Migrationsphasen und Kapitelangaben dargestellt ist.

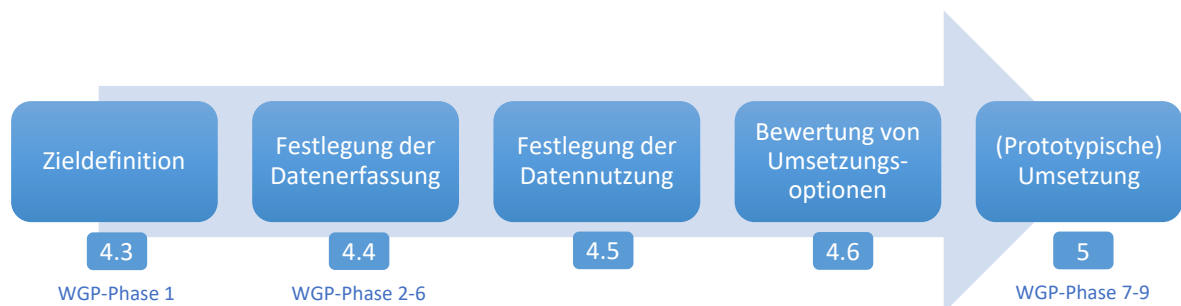


Abbildung 12: Vorgehensweise bei der Konzeption

Die Konzeption des digitalen Produktabbilds beginnt demnach mit der *Zieldefinition* (WGP-Migrationsphase 1). Anschließend werden die Aspekte der *Datenerfassung* erörtert, die dem digitalen Produktabbild zugrunde liegen (WGP-Migrationsphase 2 bis 6). Hierzu gehören im Rahmen von Datenbedarfsanalyse und -abgleich die Einordnung der verfahrenstechnischen Messgrößen sowie der benötigten Messstellen und Messtechnik.

Im dritten Teil wird erläutert, wie die erfassten *Daten genutzt* werden, um die vorgegebenen Ziele zu erfüllen. Dies umfasst die Berechnungen, mit denen die Verfolgung des Produkts durch die Anlage realisiert werden kann, um die Eingangs- mit der Ausgangslogistik zu verbinden und die chargenbezogene Dokumentation der Qualitätsdaten zu ermöglichen.

Die Diskussion der *Umsetzungsaspekte* bildet den vierten Teil. Hier geht es darum, Möglichkeiten der softwaretechnischen Realisierung des digitalen Produktabbilds zu finden. Die zu klärende Frage ist, ob es Softwaresysteme gibt, die diese Funktionalität direkt umsetzen oder zumindest integrieren können oder ob eine vollständige Individualentwicklung erforderlich ist. Im Rahmen dieser Diskussion wird das konzeptuelle Datenmodell vorgestellt, das die Basis für die Beschreibung der Produkt- und Prozessstruktur und damit für eine softwaretechnische Umsetzung bildet.

Den Abschluss bildet die Beschreibung einer prototypischen *Umsetzung* des Konzepts in Kapitel 5, die im Rahmen der Möglichkeiten im Unternehmen durchgeführt worden ist (WGP-Migrationsphase 7 bis 9) und als Evaluierungsobjekt dient.

Das Konzept besteht somit im engeren Sinne aus dem konzeptuellen Datenmodell, der gewählten Traceability-Methode, den Berechnungen zur Produktverfolgung und der Behandlung fehlender Datenerfassungspunkte. Im weiteren Sinne kann auch die angewandte Vorgehensweise zur Erzeugung des digitalen Produktabbilds auf Basis des digitalen Schattens dazu gezählt werden.

4.3 ZIELDEFINITION

Mit dem digitalen Produktabbild sollen folgende Ziele beispielhaft für das Weizenprodukt Trockenstärke anhand des analysierten Produktionsprozesses verwirklicht werden:

- (1) Realisierung der Produktqualitätsdokumentation
- (2) Realisierung der Produkt-Nachverfolgung (Tracking)
- (3) Realisierung der Produkt-Rückverfolgung (Tracing)

Für die *Produktqualitätsdokumentation* sollen die Eigenschaften einer Produktcharge während der Produktion ausgehend von einer Rohstoffcharge erfasst und dokumentiert werden. Da die aktuell produzierte Trockenstärke als Industriequalität eingestuft ist, sind die Qualitätsdaten nicht sehr zahlreich. Hierzu zählen im vorliegenden Beispiel die Stoffeigenschaftengrößen wie Dichte, pH-Wert, TS-Gehalt und Proteingehalt. Darüber hinaus ist es sinnvoll die Temperatur mit zu dokumentieren, die zwar eine Betriebszustandsgröße ist, jedoch auch Auswirkungen auf die Produktqualität haben kann, wenn die vorgegebenen Grenzwerte nicht eingehalten werden.

Mit der *Produkt-Nachverfolgung* soll ermittelt werden können, in welche Charge(n) der Produktverladung eine bestimmte Rohstofflieferung eingeht. Es soll also die Frage beantwortet werden können, in welche Stärkecharge(n) eine bestimmte Weizenlieferung eines Lieferanten eingegangen ist (Weizencharge zu Stärkecharge in 1:n-Beziehung).

Mit der *Produkt-Rückverfolgung* wird das umgekehrte Ziel verfolgt. Ausgehend von einer Stärkecharge für einen Kunden soll ermittelt werden können, welche Weizenlieferung(en) welche(s/r) Lieferanten für die Produktion dieser Trockenstärke-Charge verwendet worden ist (Weizencharge zu Stärkecharge in n:1-Beziehung).

Das digitale Produktabbild soll also dabei helfen, den Qualitäts-, Verwendungs- und Herkunftsnachweis zu ermöglichen und damit sowohl den rechtlichen wie auch den Kundenanforderungen besser zu entsprechen.

Da die Berechnungen zur Produktverfolgung einer Ungenauigkeit bezüglich der Verweilzeitermittlung unterliegen, wird für die Zielerreichung nur eine *hinreichende Genauigkeit* gefordert. Dies ist einerseits den noch zu definierenden Modellannahmen geschuldet, andererseits auch den technischen Möglichkeiten, wie etwa den Messtoleranzen von Sensoren, sowie den physikalischen Gegebenheiten wie beispielsweise der unausweichlichen Stoffvermischung in Tanks. Das Kriterium der hinreichenden Genauigkeit ist allerdings nicht quantifizierbar, da keine Vergleichswerte vorliegen, mit denen die Abweichung von der realen Prozesszeit des Produktflusses berechnet werden könnte. Die hier durchgeführten Berechnungen stellen bereits die höchste bisher erreichte Genauigkeit dar. Insofern ist dieses Kriterium lediglich als qualitativ zu werten.

Zusätzlich gilt die Prämisse der *Aufwandsminimierung*. Sie spiegelt ein generelles Kriterium bei der Bewertung von Investitionsvorhaben wider: die Umsetzung mit kostenminimalem Aufwand. Bei der Diskussion der Umsetzungsaspekte gilt es eine Lösung zu finden, die möglichst die bereits bestehenden Systeme nutzt und sich in diese integrieren lässt.

4.4 DATENERFASSUNG

Nachdem die Ziele definiert worden sind, kann im zweiten Teil analysiert werden, welche Daten für die Umsetzung benötigt werden. Zu diesem Zweck wird der Datenbedarf dem Datenbestand gegenübergestellt, um Erfassungslücken zu identifizieren und Möglichkeiten für deren Schließung zu finden. Dies entspricht den Phasen zwei bis sechs des WGP-Migrationspfades.

4.4.1 Datenbedarfsanalyse und -abgleich

Die Prozessindustrie zeichnet sich in der kontinuierlichen Produktion traditionell durch einen sehr hohen Grad der Anlagenautomatisierung aus. Demzufolge ist bereits eine große Menge an Sensoren und Aktoren vorhanden, die für die Überwachung, Steuerung und Regelung der Anlage benötigt wird. (Schenk et al. 2014, S. 685; Heimbold 2015, S. 20) Bei der Realisierung eines digitalen Produktabbilds ist dies von großem Vorteil, da auf die bereits vorhandenen Daten aus der Produktion zurückgegriffen werden kann.

Für die *Datenbedarfsanalyse* wird eine Einteilung in Stamm- und Bewegungsdaten vorgenommen. Während die Stammdaten dazu dienen, die prozessrelevanten Bestandteile der Anlage und die beteiligten Stoffe zu erfassen, werden die Bewegungsdaten für die quantitative und qualitative Abbildung des Produktflusses benötigt. Allgemeine Stammdaten wie Kunden und Lieferanten werden im Rahmen der Datenbedarfsanalyse nicht mit aufgeführt und als gegeben angenommen.

SCHEMM definiert *Stammdaten* (engl. *master data*) als

"[...] zustandsorientierte Daten, welche die Kernentitäten bzw. -objekte eines Unternehmens beschreiben. [...] Stammdaten bleiben im Volumen über den Zeitablauf relativ konstant und weisen eine vergleichsweise geringe Änderungshäufigkeit auf." (Schemm 2009, S. 19)

Es gibt zwei Kategorien relevanter Stammdatenobjekte: die im Produktionsprozess verwendeten Stoffe und die Ausrüstungsgegenstände der Anlage. Die Stoffe unterteilen sich in den Rohstoff, Hilfsstoffe sowie Haupt-, Zwischen- und Nebenprodukte. In Abbildung 13 ist die Typologie der Stoffe im Kontext des Weizenstärke-Produktionsprozesses dargestellt, wobei die erste Ebene mit ihren fünf Stofftypen als allgemeingültig anzusehen ist.

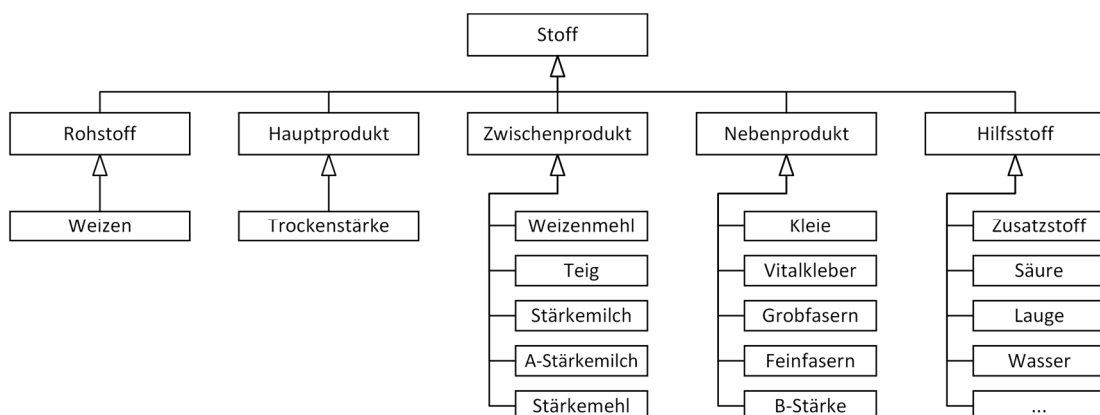


Abbildung 13: Typologie der Stoffe

Zunächst ist zu erfassen, welche Stoffe im Produktionsprozess vorkommen. Weiterhin sind die Spezifikationen für einen Teil dieser Stoffe zu hinterlegen. In Kapitel 3.4.5 wurden die hierfür relevanten Stoffeigenschaftengrößen vorgestellt. Für das Hauptprodukt – das aus dem Rohstoff über mehrere Zwischenprodukte hervorgeht – stellen diese Größen keine Stammdaten dar, da sich die Zusammensetzung des Hauptproduktstroms im Prozessverlauf ständig verändert. Dessen Eigenschaften sind daher dynamisch und als Bewegungsdaten anzusehen. Das Gleiche gilt für die Nebenprodukte, die vom Hauptproduktstrom abgetrennt werden. Somit verbleiben die Hilfsstoffe, einige Zwischenprodukte und der Rohstoff, für die jene Stoffeigenschaften in den Stammdaten zu erfassen sind, die nicht per In-Prozess-Messung erfasst werden. So werden beispielsweise die Schüttdichten von Rohweizen und Weizenmehl anhand einer Standardtabelle hinterlegt. Ebenso die Dichte und der TS-Gehalt der dem Teig zugegebenen Zusatzstoffe.

Die zweite Kategorie von Stammdatenobjekten setzt sich aus der Anlagenausrüstung zusammen. Hierzu zählen die Apparate, Stofftransporteinrichtungen und die Messtechnik, deren Typologie in Abbildung 14 aufgeführt ist. Bis zur zweiten Ebene der Typologie kann diese als generisch angesehen werden. Erst die dritte Ebene ist prozessspezifisch.

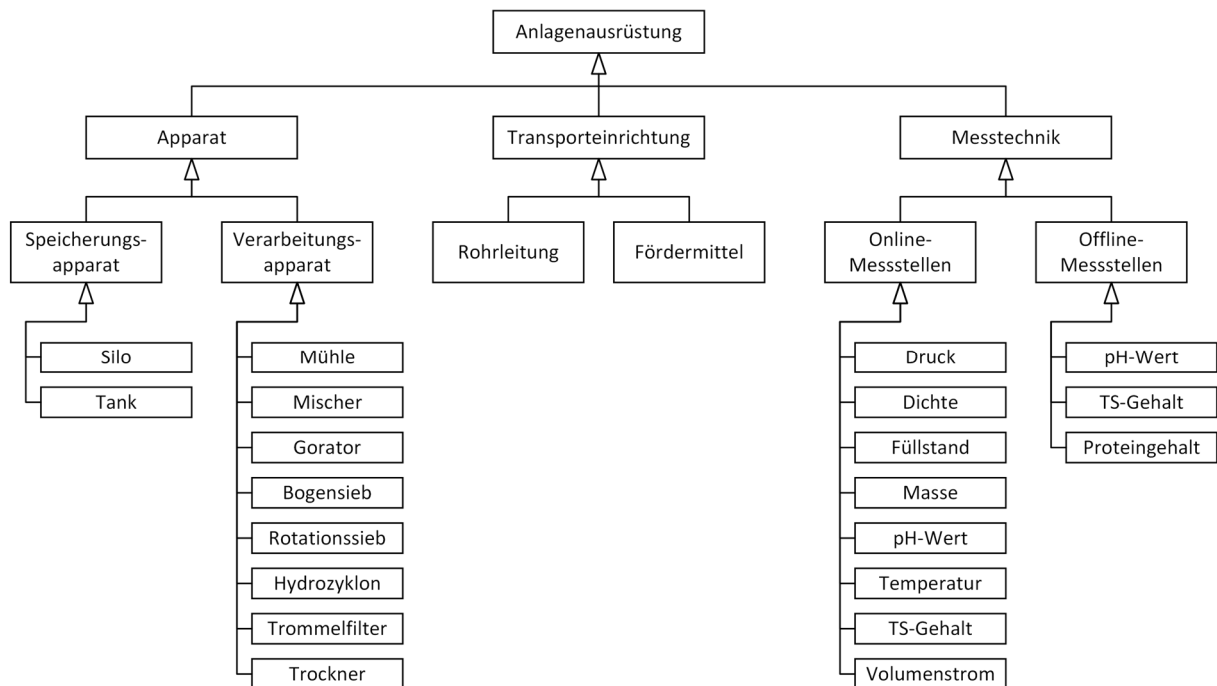


Abbildung 14: Typologie der Anlagenausrüstung

Die Apparate lassen sich unterteilen in Speicherungsapparate, wie Silos und Tanks, sowie Verarbeitungsapparate, wie zum Beispiel Mühle, Mischer oder Hydrozyklone. Die wichtigste Eigenschaft von Apparaten im Hinblick auf die Produktverfolgung ist das Volumen, da es einen signifikanten Einfluss auf die Verweilzeit des Produkts in den jeweiligen Apparaten ausübt. Dabei besitzt jeder Speicherungsapparat ein für die Berechnung relevantes Volumen, nicht jedoch jeder Verarbeitungsapparat. Demgegenüber wirken die Verarbeitungsapparate auf die Produktqualität ein, da sie die Stoffumwandlungen bewirken.

Für den Stofftransport zuständige Einrichtungen umfassen die Rohrleitungen und Fördermittel. Zu den Fördermitteln zählen beispielsweise Pumpen oder Trogkettenförderer.

Diese spielen bei der Betrachtung jedoch keine Rolle, da sich ihre Wirkung bereits in den Massen- und Volumenströmen wiederfindet. Rohrleitungen hingegen haben wie Speicherungsapparate ein Volumen, weshalb ihre Durchmesser (DIN-Nennweite) und Längen in den Stammdaten hinterlegt werden, um es berechnen zu können. Sie haben einen Anteil von etwa 8 bis 10% an der Gesamtprozesszeit, sodass ihre Berücksichtigung die Genauigkeit der Verfolgung signifikant erhöht.

Die messtechnischen Einrichtungen dienen dazu, die Betriebszustands- und Stoffeigenschaftengrößen zu erfassen. Sie unterteilen sich in Online- und Offline-Messstellen. Zu den Online-Messstellen zählen alle mit Sensortechnik betriebenen Messstellen, die über das Prozessleitsystem automatisiert ausgelesen werden. An den Offline-Messstellen erfolgt die manuelle Probenentnahme zur Analyse mehrerer verschiedener Messgrößen an einer Probe im Labor. In den Stammdaten wird hinterlegt, an welchem Ort sich die Messpunkte im Prozess befinden (Lokalität), welche Messgröße sie erfassen (z. B. den Volumenstrom) und in welcher Maßeinheit gemessen wird (z. B. m^3/h). Für Online-Messstellen wird zusätzlich die zeitliche Auflösung (z. B. eine Minute) definiert. Die Lokalisierung von Messstellen erfolgt immer mit Referenz auf die Anlagenausrüstung. Zum Beispiel wird ein Volumenstromsensor zur Messung der Durchflussmenge an einer Rohrleitung und ein Füllstandsensoren an einem Tank oder Silo montiert sein.

Alle Ausrüstungsteile einer Anlage tragen zur eindeutigen Kennzeichnung eine Kennnummer, die sogenannte *Tag-Nummer*. Hierfür wird ein normiertes Anlagenkennzeichnungssystem genutzt, das in der DIN 6779/EN 81346 festgeschrieben ist. In verschiedenen Ausrüstungskategorien werden unterschiedlich aufgebaute Tag-Nummern verwendet, die in Unternormen beschrieben sind. Eine nähere Beschreibung wird nur für die Messstellen erforderlich sein und später in diesem Abschnitt an geeigneter Stelle präsentiert.

In Abbildung 15 ist ein konzeptuelles Stammdatenmodell für die Erfassung der Daten zur Anlagenausrüstung angegeben.

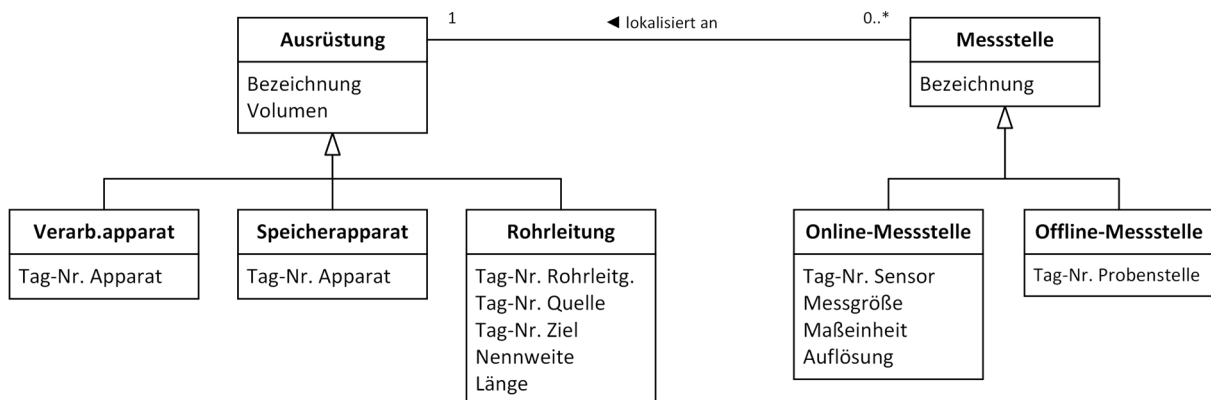


Abbildung 15: Konzeptuelles Stammdatenmodell der Anlagenausrüstung

Mit den durch die Messtechnik an den Messstellen erhobenen Daten lassen sich alle verfahrenstechnischen Messgrößen ermitteln, die in Abschnitt 3.4.5 beschrieben wurden. Sie stellen die *Bewegungsdaten* dar, die zusammen mit den Stammdaten zur Berechnung der Produktverfolgung und Dokumentation der Produktqualität herangezogen werden.

Nach SCHEMM unterscheiden sich Bewegungsdaten (engl. *transaction data*) dahingehend von den Stammdaten, dass diese

"[...] abwicklungsorientierte Daten (sind), die betriebswirtschaftliche Vorgänge beschreiben. [...] Bewegungsdaten entstehen immer wieder neu im Rahmen der Geschäftstätigkeit, d. h. sie verändern sich im Zeitablauf häufig und nehmen im Volumen mit dem Geschäftsverlauf zu." (Schemm 2009, S. 20)

Zu den Bewegungsdaten zählen alle verfahrenstechnischen Messwerte sowie die Daten der Rohstoffannahme und der Produktverladung. Eine Messung besteht immer mindestens aus einem Messwert, der Maßeinheit, dem Messort und einem Zeitstempel.

Nachdem die Datenarten definiert und die Stammdaten bestimmt wurden, soll nun weiter untersucht werden, welche Bewegungsdaten im Detail für die Qualitätserfassung und Produktverfolgung benötigt werden. Hierzu ist festzulegen, welche Daten an welchen Messpunkten im Prozess aufzunehmen sind.

Hinsichtlich der Erfassung der *Produktqualität* gibt es interne Vorgaben bezüglich der Punkte, an welchen bestimmte Werte aufzunehmen sind. Dies umfasst qualitative Messwerte, die sowohl per Laboranalyse als auch per Sensortechnik erfasst werden. Es kommen also Online- und Offline-Messstellen zum Einsatz, um Dichte, pH-Wert, TS-Gehalt, Proteingehalt und Temperatur zu erfassen. Über die internen Vorgaben zur Qualitätsmessung hinaus gibt es keine weiteren speziellen Anforderungen, sodass lediglich die Nutzung der vorhandenen Messstellen erfolgt und sich keine weiteren Bedarfe ergeben. Aktuell ist das Produkt der Trockenstärke für die industrielle Verwendung eingestuft. Würde der Prozess aufgerüstet werden, um Lebensmittelstärke herzustellen, wären weitere Messpunkte notwendig, um zum Beispiel an sensiblen Stellen auch die Keimzahl und den Proteingehalt gezielter und häufiger zu erfassen. Diese Option wird planerisch vorgehalten und kann bei geänderten Anforderungen umgesetzt werden. Jedoch ist aktuell keine Umsetzung geplant und messtechnische Erweiterungen daher nicht erforderlich.

An die *Produktverfolgung* werden hohe Anforderungen gestellt, denn für jeden Prozessschritt müssen die Durchflussmengen der Stoffe bekannt sein. Es sind also quantitative Daten gefragt, deren Erfassung die Aufgabe der MSR-Technik ist. Somit stehen die Online-Messstellen im Vordergrund. Für jeden Apparat bzw. jede zusammengehörige Apparategruppe werden lückenlose Informationen über die beteiligten Stoffe sowie ihre Mengen am Eingang des Prozessschrittes sowie an dessen Ausgang benötigt. Für Speichersaparate, also Silos und Tanks, ist zudem die Kenntnis über den aktuellen Füllstand erforderlich. Der Unterschied zwischen einem Silo und einem Tank besteht überdies aus messtechnischer Sicht darin, dass der Materialein- und -austrag aus einem Silo in der Regel gravimetrisch, also über die Masse bzw. den Massestrom, gemessen wird, während dies bei einem Tank über den Volumenstrom geschieht. Folglich erfordert die Erfüllung der genannten messtechnischen Anforderungen Volumenstrom-, Masse- und Füllstandsensoren an den entsprechenden Punkten im Prozess. Eine Messfrequenz von einer Minute ist für diese Anwendung ausreichend.

Da aufgrund des Automatisierungsgrades der Anlage bereits eine Vielzahl an Sensoren existiert, die im Rahmen der in Kapitel 3 beschriebenen Prozessanalyse aufgenommen

wurden, ist es sinnvoll, die Datenbedarfsanalyse sowie den -abgleich in einem gemeinsamen Schritt grafisch durchzuführen. Zu diesem Zweck wird das in Abschnitt 3.4.4 präsentierte Prozessmodell um Annotationen für Ist- und Soll-Messstellen ergänzt. Demzufolge werden auch zusätzliche Notationselemente verwendet, die in Tabelle 6 aufgeführt sind. Eine vollständige Referenz der Notationselemente ist im Anhang in Tabelle A-2 zu finden.


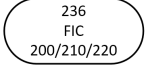

Notation	Bedeutung
 	Messstelle (einfach und zusammengefasst)
	Signalverbindung

Tabelle 6: Erweiternde Notationselemente des Prozessmodells

Die Systematik zur Kennzeichnung von Messstellen der MSR-Technik, die in der Grafik verwendet wird, ist in der Norm DIN EN 62424 festgelegt. Eine Kennzahl ist demgemäß in drei Teile eingeteilt: Anlagengruppe, Kennbuchstaben und laufende Nummer. Die Anlagengruppe bezeichnet den Prozessabschnitt, in dem sich die MSR-Stelle befindet und mit den Kennbuchstaben werden die Prozessleitaufgaben (PCE, engl. *process control engineering*) beschrieben. Die Kennbuchstaben bestehen aus einem Erstbuchstaben, der die PCE-Kategorie und damit die Messgröße festlegt, sowie ein bis zwei Folgebuchstaben, die die PCE-Verarbeitungsfunktion bestimmt. (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 488) (DIN EN 62424:2010) In Abbildung 16 wird ein Überblick über die Systematik und Bedeutung der relevanten Kennbuchstaben gegeben.

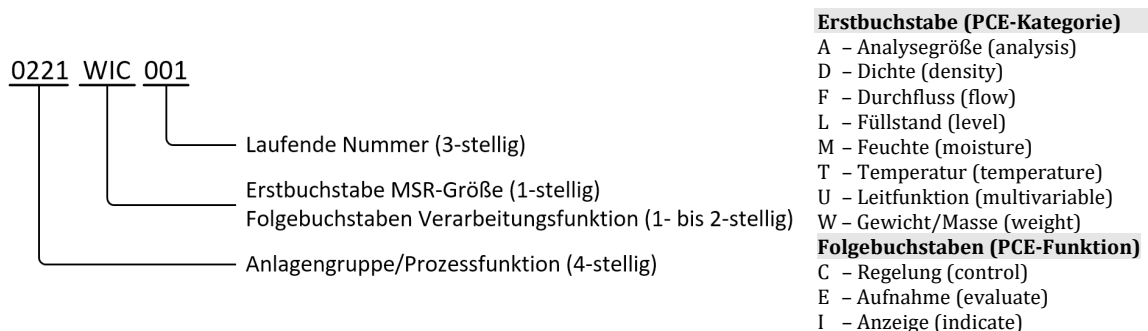
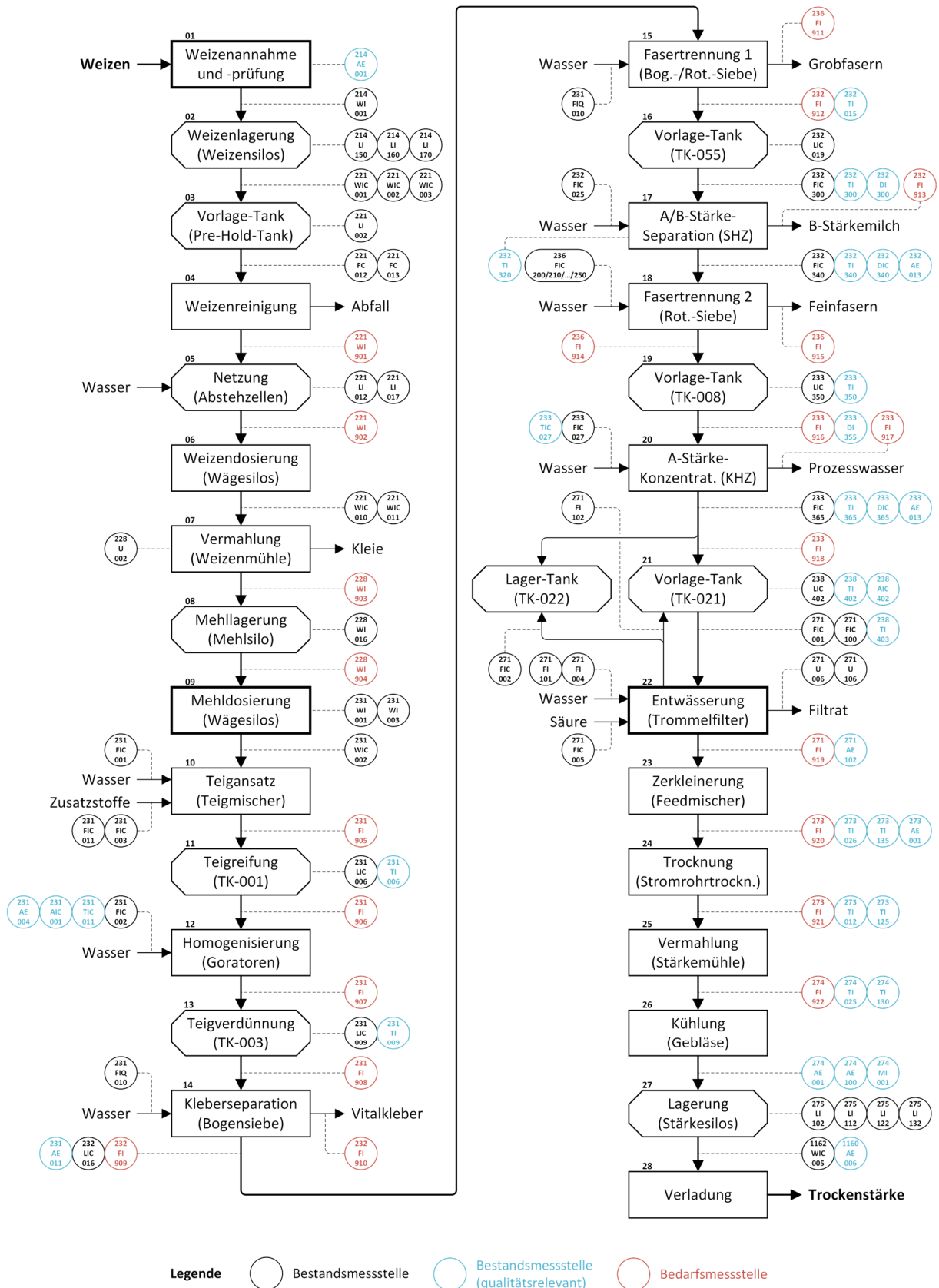


Abbildung 16: Kennzeichnung von Stellen der MSR-Technik

Quelle: In Anlehnung an (DIN EN 62424:2010, S. 5)

Das abgebildete Beispiel „0221 WIC 001“ kennzeichnet einen Massesensor (W), der das Gewicht des Weizens in einem Weizen-Wägesilo misst. Er befindet sich in Anlagengruppe 0221, realisiert eine Anzeige- (I) und Steuerfunktion (C) und hat die laufende Nummer 001. Laborprobenentnahmestellen nutzen die Kennbuchstabenkombination „AE“.

Das Ergebnis des *Datenbedarfsabgleichs* für die Bewegungsdaten ist in Abbildung 17 dargestellt, wo der Datenbedarf dem Datenbestand gegenübergestellt ist. Schwarz und blau markiert sind vorhandene Messstellen, wobei davon diejenigen blau hervorgehoben sind, die als qualitätsrelevant eingestuft werden. Rot markierte Messstellen signalisieren benötigte, jedoch nicht vorhandene Erfassungspunkte. Für die Möglichkeit der einfachen Bezugnahme auf einzelne Prozessschritte bei den weiteren Erläuterungen wurden diese zusätzlich durchnummeriert.



Aus diesem Datenbedarfsabgleich wird ersichtlich, dass an vielen Stellen im Prozess keine Volumenstrom- oder Massensensoren vorhanden sind, um die Durchflussmengen zu erfassen. Dies erschwert die Bilanzierung der Stoffmengen in den einzelnen Prozessschritten

und damit die Berechnung der Verweilzeiten des Produkts, die für die Verfolgung benötigt werden. Füllstandsensoren hingegen sind in ausreichender Zahl präsent.

4.4.2 Technologieauswahl, -überprüfung, -ausgestaltung

Im Anschluss an die Datenbedarfsanalyse und den -abgleich sehen die Phasen 4 bis 6 des WGP-Migrationspfades die Technologieplanung vor. Dabei ist für jeden Datenbedarfspunkt zu entscheiden, welche Erfassungstechnologie anzuwenden ist. Weiterhin sollen die bereits implementierten Technologien hinsichtlich ihrer Eignung überprüft und die operative Ausgestaltung der Umsetzung vorgenommen werden.

Die Beschaffung und Installation neuer Sensortechnik stand für die *Technologieauswahl* im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Disposition. Deshalb waren andere Wege zu finden, um den Mangel an Sensortechnik auszugleichen. Zwei Optionen waren zur Schließung der Erfassungslücken anwendbar: Softsensoren und fixierte Annahmewerte auf der Grundlage von Expertenschätzungen.

Der Kerngedanke eines *Softsensors* nach BAUERNHANSL ET AL. ist

„[...] das Ersetzen physischer Sensoren durch sogenannte »Software Sensoren«, die die gesuchten Daten aus anderen Größen ableiten.“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 28)

Man unterscheidet modell- und datenbasierte Softsensoren. Modellbasierte nutzen ein mathematisches Modell, das auf physikalischen Zusammenhängen basiert, um Daten auszuwerten und Ausgabewerte zu produzieren. Demgegenüber ermitteln datenbasierte Softsensoren die Zusammenhänge von Eingangsgrößen empirisch auf der Grundlage vorhandener Datenquellen. (Bauernhansl et al. 2016, S. 28) Für den vorliegenden Anwendungszweck werden datenbasierte Softsensoren verwendet, um die Daten bestehender Prozesssensoren als Eingangsgrößen zu verwenden und unter teilweise idealisierenden Modellannahmen hinreichend genaue Ausgangswerte zu produzieren.

Auf diese Weise können die meisten Erfassungslücken geschlossen werden. Für die wenigen verbleibenden Datenbedarfe werden fixe Werte nach Maßgabe von Expertenschätzungen eingesetzt. Zu berücksichtigen ist weiterhin der Umstand der multimodalen Datenaufnahme. So wird zum Beispiel der TS-Gehalt per Online- sowie Offline-Messung bestimmt, was zur teilweisen Überschneidung führt. In dem Fall gilt, dass Laboranalysen Vorrang vor Sensorwerten haben und zur Bestätigung dieser erhoben werden, um etwa Sensordefekte erkennen zu können.

Die Realisierung der Berechnungen für die Produktverfolgung unter Nutzung der drei Quellen bestehender Sensoren, Softsensoren und Expertenschätzungen wird später in Kapitel 4.5 zur Datennutzung an einigen Beispielen im Detail erläutert.

Die *Technologieüberprüfung* der vorhandenen Erfassungstechnologie ergibt keinen Handlungsbedarf. Alle montierten Sensoren können in der bestehenden Form genutzt werden. Dies ist nicht selbstverständlich. In einem anderen Abschnitt des Nassprozesses (B-Stärke-Upgrading/-Konzentration), der nicht Teil des betrachteten Produktweges ist, gibt

es beispielsweise Sensoren, die auf dem Prinzip der Coriolis-Messung basieren. Sie integrieren die Messung von Massendurchfluss, Temperatur, Dichte und Druck in einem Gerät und sind damit sehr ökonomisch. Allerdings sind sie hinsichtlich der Umgebungsbedingungen relativ empfindlich und weisen speziell bei der Durchflussmessung an den gegebenen Montageorten einen erheblichen Messfehler auf. Aufgrund dieser Erfahrung wurde geprüft, dass sich im Produktweg der Trockenstärke keine derartigen Sensoren befinden. Die hier verbauten Sensoren funktionieren nach dem Prinzip der magnetisch-induktiven Durchflussmessung (MID) und zeichnen sich durch eine hohe Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit aus.

Eine operative *Technologieausgestaltung* ist im vorliegenden Fall nur eingeschränkt erforderlich, da keine neuen hardwaretechnischen Installationen durchgeführt werden sollen und keine kommunikative Vernetzung mit physischen Produkten stattfindet. Sie bezieht sich daher auf die Ausgestaltung der Softsensoren. Die Implementierung der datenbasierten Softsensoren kann auf zwei Arten geschehen: entweder direkt im PLS als sogenannte *PCE-Leitfunktion* oder algorithmisch in dem für die Umsetzung verwendeten Softwaresystem. Eine *Leitfunktion* (engl. *process control function*) ist eine „*Verarbeitungsfunktion für Prozessgrößen, die aus leittechnischen Grundfunktionen zusammengesetzt und spezifisch auf bestimmte Funktionseinheiten der Anlage zugeschnitten ist.*“ (DIN EN 62424:2010, S. 13) Das PLS bietet einen passenden Editor für deren Implementierung, was die bevorzugte Methode darstellt, weil dadurch die erstellten Softsensoren als neue Datenquellen auch im Quellsystem verortet bleiben.

4.5 DATENNUTZUNG

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie die zuvor definierten Prozessdaten verwendet werden können, um die Verfolgung des verfahrenstechnischen Produkts in der kontinuierlichen Produktion zu ermöglichen. Hierfür werden zuerst der verwendete Verfolgungsansatz begründet und die getroffenen Modellannahmen erläutert. Danach wird anhand einiger Beispiele dargelegt, wie die bestehenden Sensordatenquellen genutzt und um Softsensoren sowie von Experten getroffene Annahmen angereichert werden, um eine lückenlose Berechnung der Produktverfolgung und Qualitätserfassung zu gewährleisten. Die Verwendung von Annahmewerten stellt dabei die letzte Option dar, da aufgrund ihrer statischen Eigenschaft keine Stoffstromschwankungen abgebildet werden können.

Zur Wahrung der wettbewerbsrelevanten Interessen des Unternehmens werden in den nachfolgenden Ausführungen keine realen Prozesswerte veröffentlicht. Die gegebenenfalls in Beispielrechnungen verwendeten Werte dienen nur der Illustration.

4.5.1 Traceability-Ansätze

Die Literatur zum Themengebiet der Rückverfolgbarkeit bzw. Traceability wird deutlich dominiert von Konzepten für die teilebasierte Produktion in der Fertigungsindustrie. (Kvarnström 2008, V) Dennoch gibt es mehrere Möglichkeiten zur Verfolgung von Stoffen in der massen- bzw. volumenbasierten Prozessproduktion. Bevor die Realisierung der Produktverfolgung beschrieben wird, soll ein kurzer Überblick über die Alternativen gegeben werden, um den verwendeten Ansatz zu begründen.

Es konnten vier Traceability-Ansätze für die Anwendung in kontinuierlichen Prozessszenarien identifiziert werden:

- (1) Messung der Verweilzeit über das Einbringen von RFID-Trägern
- (2) Messung der Verweilzeit über das Einbringen von Markierungssubstanzen
- (3) Berechnung der Verweilzeit über Simulationsverfahren
- (4) Berechnung der mittleren Verweilzeit auf Basis von Stoffströmen

Die *RFID-Methode* verwendet kleine Objekte, die mit RFID-Transpondertechnologie ausgestattet sind und in den Stoffstrom eingebracht werden. Sie eignen sich aufgrund ihrer Beschaffenheit nur für granulare Stoffe. So gibt es beispielsweise für die Rückverfolgung von Getreide den sogenannten „Korndummy“. Er entspricht in Größe und Gewicht in etwa einem Getreidekorn und enthält einen RFID-Transponder, der an bestimmten Punkten im Prozess oder gar der Wertschöpfungskette beschrieben und ausgelesen werden kann. (Bepate-Haarstrich 2007) Für die Verfolgung im Weizenstärke-Produktionsprozess sind RFID-Objekte kaum verwendbar, da sie prinzipiell nur in der ersten der drei Prozessstufen relevant wären, jedoch dort schon früh von den vielen Magnetabscheidern aussortiert würden. Spätestens kurz vor der Mühle müssten sie aus dem Strom entfernt werden, da sie sonst zerstört oder die Mühle beschädigen würden. Für den Nassprozess wären jegliche derartigen Objekte zu groß und würden von den feinen Sieben abgefiltert werden.

Bei der Verwendung von *Markierungssubstanzen* (kurz „Marker“, engl. *tracer*) wird ein spezieller Marker an einer bestimmten Stelle im Prozess in den Stoffstrom eingebracht. Es gibt chemische, radioaktive, magnetische und auf Farben basierende Marker. An einem späteren Punkt im Prozess wird dann die Konzentration dieses Markers im Stoffstrom gemessen und hierüber die Verweilzeit berechnet. Die meisten Marker eignen sich vorrangig für flüssige Stoffe, es gibt jedoch auch welche für feste. (Kvarnström 2008, 9ff.) Für den vorliegenden Anwendungsfall ist diese Methode ungeeignet, da sie nur entweder in der ersten oder zweiten Prozessstufe anwendbar wäre, jedoch nicht stufenübergreifend. Darüber hinaus eignen sich Marker nur zur sporadischen Bestimmung der Verweilzeit, um etwa Berechnungen zu verifizieren, jedoch nicht in der alltäglichen Nutzung bei der Verfolgung von Chargen, da keine Unterscheidbarkeit der Stoffmengen gewährleistet ist.

Der Einsatz von RFID- und Marker-Methoden scheitert demnach unter anderem am Phasenwechsel von granular zu flüssig zwischen den ersten beiden Prozessstufen. Darüber hinaus müssten sowohl Einbringungs- als auch Messstellen geschaffen werden, was in Verbindung mit den erforderlichen RFID-Techniken bzw. Substanzen zusätzliche Kosten bei fraglichem Nutzen verursachen würde. Für den alltäglichen Gebrauch bieten sich deshalb keine Lösungen an, die in den Stoffstrom selbst eingebracht werden müssen.

Simulationsverfahren verwenden ein detailliertes Modell der Anlage bzw. des Prozesses, um darauf aufbauend Strömungssimulationen durchzuführen. Derartige Berechnungen zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit aus, werden jedoch auch schnell komplex, was in einer hohen Rechenlast resultiert. Dies gilt insbesondere, wenn ein gesamter Prozess berechnet werden muss. Simulationen werden vor allem punktuell in Entwurfs- oder Diagnoseszenarien eingesetzt, um etwa die Strömungsverhältnisse in einem Apparat zu berechnen. (Kvarnström und Bergquist 2011) Im vorliegenden Beispiel müsste die Anlage

außerdem zuerst modelliert werden, da aufgrund ihres Alters keine digitalen Modelle davon existieren.

Die in diesem Kapitel zu beschreibende Produktverfolgung basiert auf der Berechnung der *mittleren Verweilzeit* (engl. *mean residence time*) für jeden Prozessschritt, also der Zeit, die ein Partikel des Stoffes benötigt, um einen Apparat im kontinuierlichen Fluss zu durchströmen. Abgeleitet vom Konzept der Verweilzeitverteilung (engl. *residence time distribution, RTD*) werden idealisierende Annahmen getroffen, die im nachfolgenden Abschnitt erläutert werden. Dadurch ist die mittlere Verweilzeit mit der zuvor in Abschnitt 3.4.5 angegebenen Formel (3) berechenbar. (Hemming und Wagner 2008, S. 173) (Kvarnström und Bergquist 2011, S. 397) Sie ist eine in der Verfahrenstechnik und im Unternehmensalltag häufig verwendete Methode, da sie mit relativ geringem Aufwand zu berechnen ist und dennoch hinreichend genaue Ergebnisse für die praktische Anwendung liefert.

4.5.2 Modellannahmen

Eine vollständig realitätsgetreue Abbildung eines verfahrenstechnischen Produktionsprozesses ist nur bei einem Chargenprozess möglich, da hier die Verarbeitung in diskreten Schritten mit voneinander abgegrenzten Stoffmengen stattfindet. In der kontinuierlichen Produktion müssen nach dem hier verwendeten Ansatz einige idealisierende Annahmen getroffen werden.

Die verwendeten *Modellannahmen* lauten:

- (1) Pfropfenströmung
- (2) First In, First Out (FIFO)-Prinzip
- (3) Zyklenfreiheit

Flüssigkeiten fließen real nicht mit gleichmäßiger Geschwindigkeit durch ein Rohr. Aufgrund von Reibungsverlusten an den Rohrwänden kommt es zu einer Geschwindigkeitsverteilung. Diese Reibungsverluste sind jedoch vernachlässigbar gering, sodass man vereinfachend annimmt, dass sich die Flüssigkeit wie ein Pfropfen durch das Rohr bewegt. Man spricht dabei von einer *Pfropfenströmung* (engl. *plug flow*). Abbildung 18 illustriert diesen Sachverhalt.

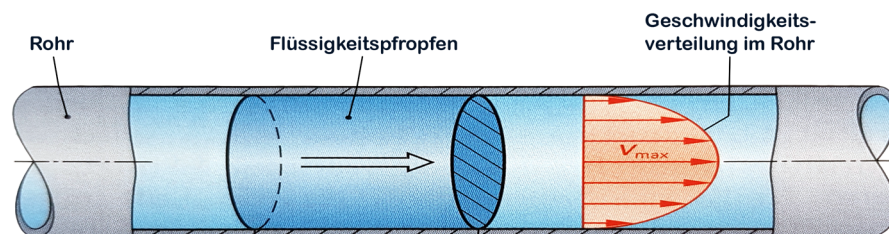


Abbildung 18: Strömung in einem Rohr

Quelle: In Anlehnung an (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 46)

Durch die idealisierte Pfropfenströmung vereinfacht sich die Berechnung des Volumensstroms, sodass weder Rohrquerschnittsverhältnisse noch Reibungskoeffizienten in die Rechnung einbezogen werden müssen. Bei einer Pfropfenströmung kommt es zu keiner Rückvermischung in axialer Richtung von Stoffen im Strom. Dieselbe Modellannahme gilt,

wenn der Volumenstrom so gering ist, dass der Rohrquerschnitt nicht vollständig ausgenutzt wird. Die meisten realen fließenden Systeme können auf diese Weise approximiert werden. (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 46) (Kvarnström und Bergquist 2011, S. 397)

Das *FIFO-Prinzip* gilt – als Folge der Pfropfenströmung – für Apparate mit einem Volumen, also insbesondere Silos und Tanks. Hierbei wird angenommen, dass die Stoffmenge, die zuerst in den Apparat eingetragen wird, ihn auch zuerst wieder verlässt. Dabei kommt es nach der idealen Vorstellung zu keiner Stoffvermischung orthogonal zur Fließrichtung. Die Stoffmengen stapeln sich also in klar abgegrenzten Schichten auf, wie nachfolgend anhand eines Silos verdeutlicht werden soll.

Silos unterscheidet man in der Praxis nach Kern- und Massenfluss. Kernfluss-Silos haben aufgrund ihrer Bauart den Nachteil, dass das Schüttgut beim Materialaustrag in der Mitte schneller abrutscht als an den Randbereichen, wo sich stillstehende oder sehr langsam abrutschende Bereiche bilden. In einem Massenfluss-Silo setzt sich aufgrund einer optimierten Bauweise der gesamte Inhalt in Bewegung, was bewegungslose Zonen vermeidet. Dadurch wird es annähernd in der Reihenfolge entleert, in der es befüllt wird. (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 101) Abbildung 19 veranschaulicht dieses Prinzip im Vergleich.

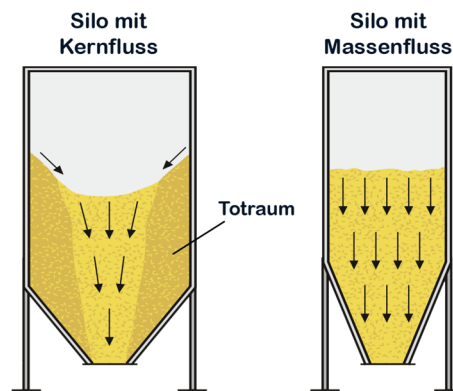


Abbildung 19: Massefluss in einem Silo

Quelle: In Anlehnung an (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 101)

Doch selbst in einem Massenfluss-Silo bilden sich Bereiche mit unterschiedlicher Abrutschgeschwindigkeit, was zu einer Vermischung des Schüttgutes führt. Die Modellannahme geht davon aus, dass es zu keiner derartigen Stoffvermischung kommt und die Befüllung und Entleerung homogen in idealer Weise erfolgt.

Während in Silos auch in der Praxis ein annähernd homogener Mengendurchfluss denkbar erscheint, trifft dies auf Tanks nicht zu. Es ist unvermeidlich, dass sich Flüssigkeiten in einem Tank vermischen. Dennoch wird auch hier von derselben Modellannahme ausgegangen. Es findet zwar eine Vermischung statt, diese ist jedoch aufgrund der relativ kleinen (Zwischen-)Speichertanks im Prozess, die nicht lagern, sondern kontinuierlich durchströmt werden, nur von begrenztem Umfang und daher akzeptabel.

Die dritte Modellannahme der *Zyklenfreiheit* bezieht sich auf Kreisläufe und Verzweigungen im Prozess, die die Kontinuität der Produktverfolgung stören. Operatoren haben bei Bedarf, wenn zum Beispiel Störungen auftreten oder bestimmte Apparate mit verminderter Leistung betrieben werden sollen, die Möglichkeit, den Produktfluss teilweise oder

vollständig um- und rückzuleiten. Darüber hinaus zählen hierzu abgefilterte und zur Wiederverwendung rückgeführte Prozesswässer, die Rückstände des Produkts enthalten. Auf die Betrachtung derartiger Prozessschleifen wird verzichtet und nur der Hauptproduktweg verfolgt.

4.5.3 Realisierung der Produktverfolgung

In Abschnitt 3.4.5 wurden die verwendeten verfahrenstechnischen Messgrößen und in Abbildung 17 das Prozessmodell mit den annotierten Messstellen vorgestellt. Im Folgenden soll nun dargelegt werden, wie diese Informationen zur Anwendung kommen, um die Verfolgung des Produkts durch die Anlage unter den gegebenen Modellannahmen und vorhandenen Daten zu ermöglichen. Dazu werden die Lösungsansätze an bedeutenden Stellen im Prozess diskutiert, um die Herausforderungen und Problemstellen hervorzuheben. Es wird jedoch nicht jeder Schritt des gesamten Prozesses chronologisch abgearbeitet.

Die Produktverfolgung basiert auf der Ermittlung der Verweilzeit in jedem einzelnen Prozessschritt und ist der einzige Anhaltspunkt für die Verfolgung, da aus stofflicher Sicht keine diskreten Produktionsschritte existieren. Zu diesem Zweck müssen für jeden Schritt die Ein- und Ausgangsstromgrößen sowie die Apparatevolumina und -füllstände – sofern vorhanden – bekannt sein. Die Prozesszeit τ_P für einen Durchlauf durch den Produktionsprozess ergibt sich als Summe aller Verweilzeiten τ_i der n Prozessschritte:

$$\tau_P = \sum_{i=1}^n \tau_i \quad (5)$$

Es lässt sich feststellen, dass für die Verweilzeitermittlung nur wenige verschiedene Arten von Berechnungen benötigt werden. Dies sind im Einzelnen die Berechnung der Verweilzeit auf Basis von

- (1) Massenein- und -austrag über den Zeitverlauf (für die Weizensilos)
- (2) Behältervolumen und Massen- oder Volumenstrom (mittlere Verweilzeit, für Tanks, Silos, Verarbeitungsapparate und Rohrleitungen)

Die *erste Berechnungsart* kommt gleich zu Beginn zur Anwendung und berechnet die Verweilzeit über den gemessenen Massenein- und austrag. Der Weizenstärke-Produktionsprozess beginnt mit der Weizenannahme und -lagerung, bei der die LKW-Ladung, die anhand einer Losnummer dem Lieferanten zugeordnet werden kann, gewogen und in eines von drei Weizensilos gefüllt wird. Dieser erste Schritt erfordert eine spezielle Berechnung, da der Weizen abwechselnd aus einem der drei Weizensilos entnommen wird und dadurch die Entnahme aus Sicht eines Silos *diskontinuierlich* verläuft. Folgende Informationen sind über diesen Vorgang bekannt:

- Masse der Weizencharge in Tonnen (Annahmeprotokoll)
- Zeitraum der Befüllung des Silos mit Start-/Endzeitpunkt (Annahmeprotokoll)
- Füllstand des Silos zu jedem Zeitpunkt in Tonnen (z. B. Sensor 0214LI150)
- Massestrom der Weizenentnahme aus dem Silo (z. B. Sensor 0221WIC001)

Damit sind alle Informationen bekannt, um über eine Bilanzierung den Durchfluss der betrachteten Weizencharge durch das Silo zu verfolgen. Die entscheidenden Füllstände sind in Abbildung 20 markiert.

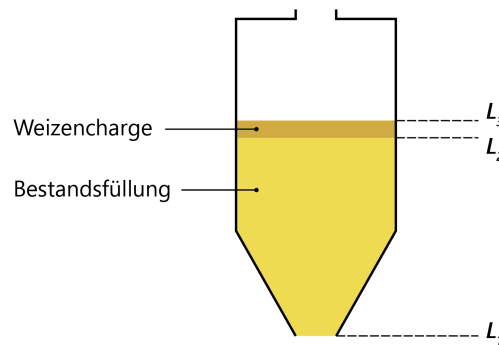


Abbildung 20: Verfolgung einer Weizencharge im Weizensilo

Seien eine LKW-Ladung von 25 Tonnen Weizen und ein Silo-Füllstand zum Zeitpunkt des Befüllungsstarts von 500 Tonnen (L_2) gegeben. Die eingefüllte Menge Weizen erhöht den Füllstand auf 525 Tonnen (L_3). Bevor diese wieder aus dem Silo ausgetragen werden kann, muss zuerst die vorgelagerte Bestandsfüllung zwischen L_1 und L_2 das Silo verlassen. Der Massenausstrom wird mit den Massestrom-Sensoren am Siloausgang registriert. Somit kann ermittelt werden, wann die 500t-Bestandsfüllung das Silo verlassen hat und in welchem Zeitraum danach die 25t-Weizencharge ausgetragen wird. Dementsprechend errechnet sich die Verweilzeit im Weizensilo aus der Zeitdifferenz zwischen der vollständigen Befüllung sowie der vollständigen Entnahme der Weizencharge.

Der Start- und Endzeitpunkt des Entnahmezeitraums markiert gleichzeitig den Start- und Endzeitpunkt des Eintritts in den nächsten Prozessschritt. Auf diese Weise wird in allen weiteren Prozessschritten verfahren. Das heißt, der *Stofffluss* der betrachteten Stoffmenge wird erfasst, indem für jeden Prozessschritt vier Zeiten bestimmt werden: jeweils ein Start- und Endzeitpunkt für den Eintritt sowie den Austritt der Stoffmenge. Sie bewegt sich also wie ein „Pfropfen“ durch den gesamten Prozess. Dabei kann sich ihre physische Ausdehnung über mehrere Prozessschritte gleichzeitig erstrecken. Mit der in Kapitel 3.4.5 definierten mittleren Verweilzeit wird bestimmt wie lange sich „[...] ein Masseilchen des Mengenstroms in einem kontinuierlich durchströmten Apparat aufhält.“ (Hemming und Wagner 2008, S. 173) Die Verweilzeit bezieht sich auf die Dauer des Eintritts des Stoffflusses in einen Prozessschritt (dasselbe gilt für den Austritt). Dieses Prinzip ist in Abbildung 21 illustriert. Die Zeit zwischen $t_{A,aus}$ und $\tau_{E,ein}$ wird maßgeblich von den diskontinuierlichen Prozessteilen bestimmt, was in diesem Fall die Weizensilos sind. Im Folgenden wird nur noch die Verweilzeit τ betrachtet, da sich daraus alle weiteren Zeiten ergeben.

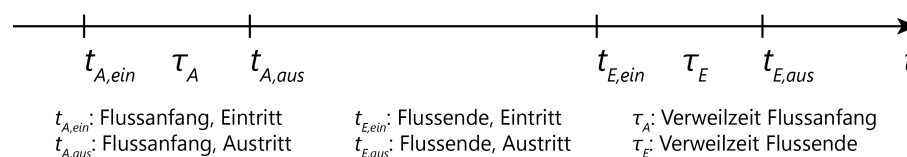


Abbildung 21: Zeitbestimmung im Produktfluss

Nach den Weizensilos verläuft der Prozess für die betrachtete Charge kontinuierlich, so dass die weiteren Prozessschritte auf die *zweite Berechnungsart* auf Basis der mittleren

Verweilzeit berechnet werden können. Nachdem der Weizen das Silo verlassen hat, wird er in Schritt 3 in den Vorlagetank für die Weizenreinigung gefördert. Dessen Verweilzeit τ_{03} bestimmt sich mit dem Quotienten aus seinem aktuellen Inhalt – dem Tankvolumen V multipliziert mit dem Füllstand L – und dem durchlaufenden Massestrom, der dafür mit Hilfe der Schüttdichte des Weizens ρ_{WZ} in einen Volumenstrom umzurechnen ist (vgl. Formeln (2) und (3) in Kapitel 3.4.5):

$$\tau_{03} = \frac{V_{\text{Vorlagetank}} \cdot L_{221LI002}}{\frac{1}{\rho_{WZ}} (\dot{m}_{221WIC001} + \dot{m}_{221WIC002} + \dot{m}_{221WIC003})} \quad (6)$$

Mit dieser zweiten Berechnungsart wird für alle Prozessschritte weiter verfahren, in denen es Apparate mit einem Behältervolumen gibt. Für Apparate ohne Volumen, wie beispielsweise Rotationssiebe, ist keine Verweilzeit ermittelbar. Sie kann vernachlässigt werden, da derartige Apparate lediglich durchströmt werden, ohne den Strom zeitlich zu verzögern. Hiervon gibt es allerdings auch Ausnahmen. Für die Weizenmühle lässt sich zwar kein Volumen zur Berechnung heranziehen, jedoch muss aufgrund der aus der Bau- und Funktionsweise resultierenden signifikanten Verweilzeit eine *Expertenschätzung* angenommen werden.

Im Rahmen der Datenbedarfsanalyse wurden in vielen Prozessschritten Erfassungslücken durch *fehlende Sensoren* festgestellt. Zu einem großen Teil können diese durch Berechnungen oder Übernahme von Werten anderer Sensoren beseitigt werden. In Schritt 5 gibt es je eine vor- und nachgelagerte Datenbedarfsstelle. Da der Massestrom von den Weizensilos bis zur Weizenmühle weitgehend konstant ist, kann an beiden Bedarfsstellen davon ausgegangen werden, dass die Messwerte zu den nächsten vorgelagerten Sensoren annähernd identisch sind und übernommen werden können:

$$\dot{m}_{221WI901} \approx \dot{m}_{221WI902} \approx \dot{m}_{221FC012} + \dot{m}_{221FC013} \quad (7)$$

Mit vielen anderen Sensorfehlstellen kann auf dieselbe Art verfahren werden, da die Füllstände der Zwischentanks eine geringe Schwankungsbreite von weniger als 10% aufweisen, was auf die Kontinuität des Prozesses zurückzuführen ist. Deshalb gilt beispielsweise im Bereich der Prozessschritte 10 bis 13 auch:

$$\dot{m}_{231FI905} \approx \dot{m}_{231FI906} \approx \dot{m}_{231FI907} \quad (8)$$

Auf diese Weise können Softsensoren an den entsprechenden Positionen erstellt werden, die die Daten der bestehenden Sensoren aggregieren und weiterleiten.

Ein wichtiger Datenpunkt ist der Ausgang der Weizenmühle in Schritt 7, da an dieser Stelle die Ausbeute an Mehl aus dem Weizen bestimmt wird. Dies ist nach Abtrennung der Kleie die Rohstoffmenge, aus der im weiteren Prozessverlauf das Produkt entsteht. Außerdem ergibt sich daraus der Eintrag ins Mehlsilo, der die dortige Verweilzeit beeinflusst. Die Weizen-Masseströme am Eingang der Mühle und die Mehlausbeute η an ihrem

Ausgang werden von Sensoren gemessen. Somit ergibt sich der austretende Mehl-Massestrom wie folgt:

$$\dot{m}_{228WI903} = (\dot{m}_{221WIC010} + \dot{m}_{221WIC011}) \cdot \eta_{228U002} \quad (9)$$

Die Verweilzeit im Mehlsilo wird dann analog zu Formel (6) mit Hilfe des Silo-Volumens, des Füllstandes, der Schüttdichte des Weizenmehls und des Massestroms berechnet. Gleiches gilt für die Mehl-Wägesilos in Schritt 9.

Der Teigansatz stellt mit Prozessschritt 10 den Übergang zum Nassprozess und damit zur zweiten Prozessstufe dar, in der die Stoffumwandlungen stattfinden. An dieser Stelle befindet sich der Übergang des Aggregatzustandes von fest (Schüttgut) zu flüssig (Stärke-milch über die Zwischenstufe des Teiges), was sich ab diesem Punkt in der Verwendung von Volumen- statt Massestromsensoren widerspiegelt. Dieser Abschnitt ist in Abbildung 22 isoliert dargestellt.

In den nachfolgenden Prozessschritten werden viele Stoffe hinzugegeben bzw. abgetrennt. Diese Stoffe haben unterschiedliche *Stoffdichten*, die sich auf das Volumen auswirken. Das Volumen von Stoffen ändert sich unter Einfluss von Druck und Temperatur. Beides unterliegt während des Prozesses einer gewissen Variabilität. Volumenströme können deshalb nicht einfach summiert werden. Sie werden allerdings benötigt, um die Verweilzeit in Verbindung mit den Apparatvolumina nach der Standardformel (3) zu berechnen. Da die Masse keiner Änderung durch Druck- oder Temperatureinwirkung unterliegt, muss die Bilanzierung der Stoffströme weiter auf Basis der Masseströme erfolgen. Dies macht die durchgehende Umrechnung zwischen Volumen- und Masseströmen erforderlich, wofür nach Formel (2) die Dichte benötigt wird.

Die Stoffdichte kann auf verschiedene Arten ermittelt werden. Es gibt labortechnische Methoden und geeignete Sensortechnik. (Ignatowitz und Fastert 2011, S. 278) Weiterhin gibt es auch Standard-Dichtetabellen für viele gängige Stoffe. Die im Prozess vorhandenen Dichtesensoren messen die tatsächliche Stoffdichte, wobei auf Basis dieses Rohwerts zusätzlich mit Hilfe von Suspensionsdichte-Formeln der Wert des TS-Gehalts durch das PLS errechnet und bereitgestellt wird. Da diese Thematik an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden soll, wird im Folgenden angenommen, dass alle Stoffdichten bekannt sind.

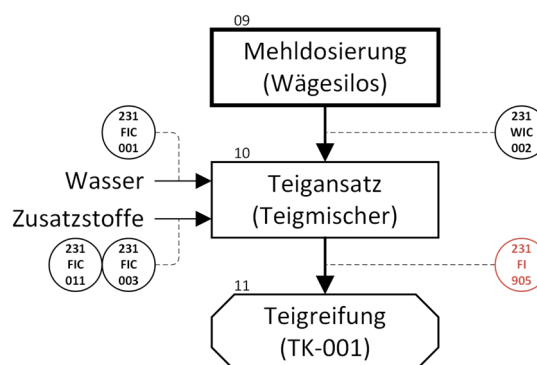


Abbildung 22: Prozessabschnitt des Teigansatzes

Für den Teigansatz lässt sich nun die Verweilzeit mit den vorgestellten Methoden und den Dichteinformationen über die Aggregation der Masseströme (vgl. Formel (10)) und Umrechnung in den Volumenstrom (vgl. Formel (11)) mit Hilfe von Formel (12) ermitteln:

$$\dot{m}_{231FI905} = \dot{m}_{231WIC002} + \rho_W \dot{V}_{231FIC001} + \rho_{Z1} \dot{V}_{231FIC011} + \rho_{Z2} \dot{V}_{231FIC003} \quad (10)$$

mit

ρ_W Dichte von Wasser

ρ_{Z1} Dichte von Zusatzstoff 1

ρ_{Z2} Dichte von Zusatzstoff 2

$$\dot{V}_{231FI905} = \frac{\dot{m}_{231FI905}}{\rho_T} \quad (11)$$

mit ρ_T Dichte des Teigs

$$\tau_{10} = \frac{V_{Teigmischer}}{\dot{V}_{231FI905}} \quad (12)$$

Auf diese Weise wird für den Rest des Nassprozesses analog verfahren. Zu beachten ist, dass das korrekte Volumen der Apparate verwendet wird. Im obigen Beispiel des Teigmischers beträgt dieses nach Herstellerangabe im Betrieb beispielsweise effektiv 80% vom konstruktionstechnischen Volumen des Gerätes. Bei Tanks ist der aktuelle Inhalt durch Multiplikation des technischen Tankvolumens (in m³) mit dem Füllstand (in %) zu ermitteln. Rohrleitungsvolumen errechnen sich als Zylinder mit der DIN-Nennweite als Durchmesser und der Länge.

Der Prozessschritt 22 markiert den Übergang zur dritten und letzten Prozessstufe, der Aufarbeitung des Umwandlungsprodukts im Anlagenteil der Stärketrocknung. Dieser extrahierte Prozessabschnitt ist in Abbildung 23 links dargestellt während rechts eine Bilanzierungsansicht zu sehen ist. Dem Abschnitt gilt besondere Aufmerksamkeit, da er einen Zyklus enthält, der berücksichtigt werden muss, was zunächst der Prämisse der Zyklensfreiheit widerspricht. Die Zyklensfreiheit bezieht sich allgemein auf alternative Fließwege innerhalb der Anlage und untergeordnete Rückflüsse, die aus abgefilterten und der Wiederverwendung zugeführten Prozesswässern bestehen. Sie enthalten zwar Rückstände des Produkts, können aber für die Untersuchung mengenmäßig vernachlässigt werden. An dem hier untersuchten Punkt des Prozesses wird allerdings ein großer Teil des Produktstroms aufgrund eines Filterwannenüberlaufs von Prozessschritt 22 zu 21 zurückgeführt und muss deshalb beachtet werden.

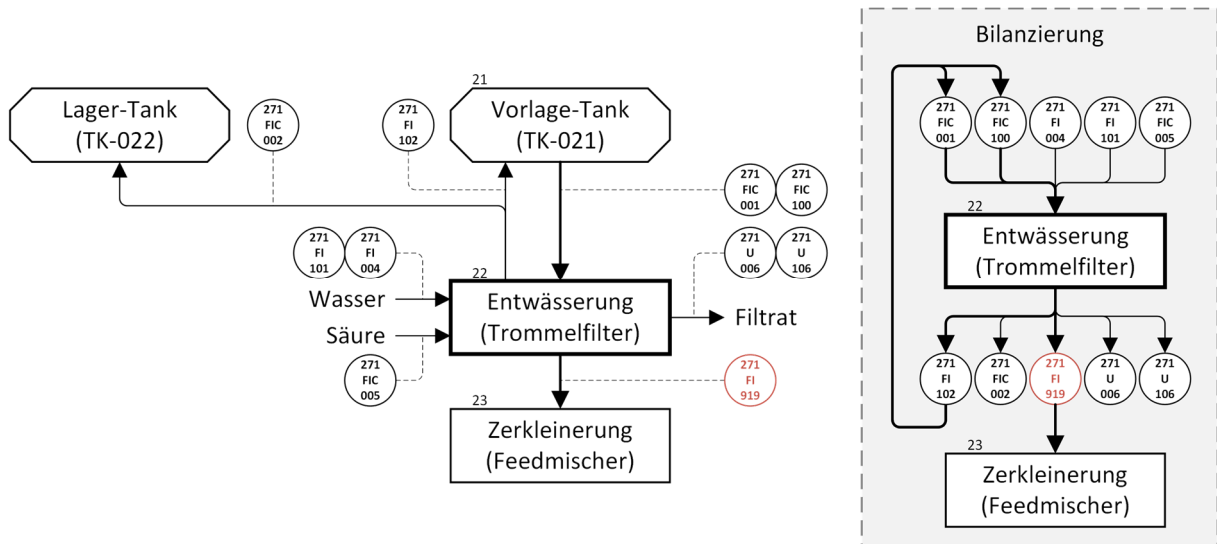


Abbildung 23: Prozessabschnitt der Trommelfilter

Eine erfassungstechnische Besonderheit in Prozessschritt 22 ist, dass die Volumenströme am Abgang des Filtrats nicht mit physischen Sensoren gemessen werden, sondern im Vorfeld bereits als datenbasierte Softsensoren mittels PCE-Leitfunktionen umgesetzt worden sind (vgl. U-Sensoren). Mit den Sensorwerten ergibt sich der resultierende Massestrom in Richtung Schritt 23 über eine Bilanzierung mit den Formeln (13) bis (15). Im Sinne der Kompaktheit der Formeln wird angenommen, dass die Konvertierung der sensorisch erfassten Volumen- in Masseströme mit Hilfe der Stoffdichte bereits vorgenommen wurde. Des Weiteren wird der Teil der Sensor-Tag-Nummer für die Anlagengruppe in den Indizes ausgelassen, da sie für alle identisch ist.

$$\dot{m}_{input} = \dot{m}_{FI001} + \dot{m}_{FIC100} + \dot{m}_{FI004} + \dot{m}_{FI101} + \dot{m}_{FIC005} \quad (13)$$

$$\dot{m}_{output} = \dot{m}_{FI102} + \dot{m}_{FIC002} + \dot{m}_{U006} + \dot{m}_{U106} \quad (14)$$

$$\dot{m}_{FI919} = \dot{m}_{input} - \dot{m}_{output} \quad (15)$$

Die Verweilzeit τ_{22} ergibt sich nach der bereits demonstrierten Berechnungsmethode, wird jedoch durch die Zykluszeit verlängert. Ein Ansatz diese zu ermitteln besteht in der geometrischen Verdünnungsreihe, die nach der folgenden Formel berechnet wird (Lottspeich und Zorbas 1998):

$$k = \left(\frac{r}{p+r} \right)^n \quad (16)$$

- mit
- k Konzentration des Rückflusses nach n Zyklen
 - n Anzahl der Zyklen
 - r verdünnter Strom (Rückfluss)
 - p Verdünnungsstrom (Hauptfluss)

Allerdings ist nicht die Konzentration gesucht, sondern die Anzahl der Durchläufe, nach denen das rückfließende Produkt eine vorgegebene Konzentration unterschreitet. Ist

diese beispielsweise mit 5% definiert und beträgt der Rückfluss-Massestrom 5 t/h sowie der Hauptproduktstrom 20 t/h, so ergibt sich die Anzahl der Zyklusdurchläufe zu:

$$n = \log_{\frac{r}{p+r}}(k) = \log_{\left(\frac{5}{5+20}\right)}(0,05) \approx 2 \quad (17)$$

Die Berechnung der Gesamtverweilzeit τ'_{22} für Prozessschritt 22 mit der zusätzlichen Zykluszeit ist in Formel (18) angegeben.

$$\tau'_{22} = \tau_{22} + n(\tau_{R_{22 \rightarrow 21}} + \tau_{21} + \tau_{R_{21 \rightarrow 22}}) \quad (18)$$

mit

$\tau_{R_{22 \rightarrow 21}}$ Verweilzeit in Rohrleitung von Schritt 22 zu 21

$\tau_{R_{21 \rightarrow 22}}$ Verweilzeit in Rohrleitung von Schritt 21 zu 22

n Anzahl der Zyklusdurchläufe

Im restlichen Abschnitt des Produktionsprozesses bis zur Lagerung des Endprodukts gelingt die Verfolgung nur mit Zugeständnissen an die Genauigkeit, da aufgrund fehlender Sensoren die Verweilzeiten nicht exakt bestimmt werden können. Es bleibt nur die Option mit Annahmewerten – also Schätzungen – zu arbeiten.

Die Silos, in denen das fertige Produkt bis zur Abfüllung für den Kunden eingelagert wird, werden abwechselnd nacheinander befüllt und entleert. Über deren Füllstände kann registriert werden, bei welchen Silos in welchem Zeitraum Materialein- oder -austräge stattfinden. Die Verfolgung funktioniert analog zu den Weizensilos über die Menge des Materialaustrages. Über die Probenentnahme und das Analyseprotokoll wird die Verbindung der Produktcharge zum Kunden hergestellt.

Nachdem die Nachverfolgung des Produkts erläutert wurde, gilt es noch die Gegenrichtung zu betrachten. Die *Rückverfolgung* des Produkts ist durch die vorberechneten Daten der Nachverfolgung leicht realisierbar. Eine Rohstoffcharge kann in eine oder mehrere Produktchargen einfließen. Umgekehrt kann eine Produktcharge einer oder mehrerer Rohstoffchargen entstammen. Wenn für alle Rohstoffchargen die Nachverfolgungen berechnet und in einer Datenbank gespeichert worden sind, besteht die Rückverfolgung einer Produktcharge lediglich in einer Datenbankabfrage, da die Zuordnungen dann vorhanden sind. Alternativ kann analog zur Vorwärts- auch eine Rückwärtsrechnung durch den gesamten Prozess durchgeführt werden. Hier kommen allerdings weitere Ungenauigkeitsfaktoren hinzu. So muss etwa bei Tanks mit durchschnittlichen statt zeitgenauen Füllständen gerechnet werden. Diese Variante ist deshalb als nachrangig anzusehen.

Abschließend bleibt anzumerken, dass für die meisten Datenbedarfsstellen entsprechende Softsensoren erstellt werden konnten. So bleiben von ursprünglich 22 nur 5 Datenerfassungspunkte übrig, an denen tatsächlich Schätzwerte von Experten als statische Annahmewerte verwendet werden müssen: an der Abtrennung der Grob- und Feinfasern in den Prozessschritten 15 und 18, sowie im Bereich der Stärketrocknung zwischen den Schritten 23 bis 26.

4.5.4 Erfassung der Produktqualität

Durch die Realisierung der Produktverfolgung wird die Datengrundlage für das Wissen über die Verweilzeiten in den einzelnen Prozessschritten geschaffen. Somit ist es möglich, die qualitätsbezogenen Messwerte dem Produkt in seinen einzelnen Stationen während des Flusses durch die Produktion zuzuordnen. Die dafür zu verwendenden Messstellen wurden im Rahmen der Datenbedarfsanalyse bereits in Abbildung 17 (Seite 49) präsentiert, in der sie blau hervorgehoben sind.

Mit diesen Informationen wird es möglich, chargenbezogen zu prüfen, nachzuvollziehen und gegebenenfalls nachzuweisen, dass alle vorgegebenen Produktionsparameter eingehalten worden sind. Dieser Aspekt wird umso wichtiger, falls der Prozess tatsächlich einmal auf Lebensmittelstärke umgestellt wird, da hier höhere Anforderungen an die Nachweisbarkeit der Produktqualität bestehen als es bei der aktuellen IndustrieEinstufung notwendig ist.

Eine beispielhafte Auswertung, die mit dem digitalen Produktabbild möglich wird, ist in Abbildung 24 dargestellt. Sie zeigt die Entwicklung des TS-Gehalts über den Verlauf der einzelnen Schritte des Produktionsprozesses für eine bestimmte Produktmenge, die aus einer Rohstoffcharge hergestellt wird.

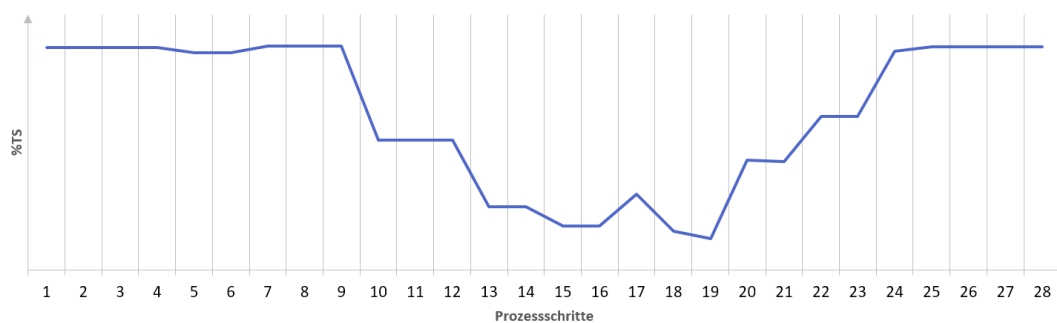


Abbildung 24: Auswertungsbeispiel Verlauf des TS-Gehalts

Da nicht genügend Messstellen für eine durchgängige Erfassung vorhanden sind, werden – entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise – fehlende Datenerfassungspunkte einerseits durch Softsensoren ersetzt oder andererseits durch Expertenschätzungen ergänzt. Die Berechnung des TS-Gehalts ist möglich, indem der TS-gewichtete Durchschnitt der Eingangsmasseströme eines Prozessschrittes gebildet wird, sofern nicht mehr als ein Ausgangsmassestrom vorhanden ist. Nicht alle Qualitätsmessgrößen können auf diese Weise vervollständigt werden, sodass Erfassungslücken akzeptiert werden müssen. Dies trifft zum Beispiel auf den pH-Wert und den Proteingehalt zu.

4.6 UMSETZUNGSASPEKTE

4.6.1 Konzeptuelles Datenmodell

Als Grundlage für eine Umsetzung des Konzepts des digitalen Produktabbilds wird die Kenntnis über die Zusammenhänge der relevanten Daten benötigt. Für diesen Zweck wird in diesem Abschnitt ein konzeptuelles Datenmodell für das in dieser Arbeit behandelte Beispiel präsentiert.

Aus dem in Abbildung 25 dargestellten Datenmodell wird ersichtlich, welche Informationsobjekte an dem Abbild beteiligt sind und welche Beziehungen zwischen ihnen bestehen. Zu beachten ist hierbei, dass das Datenmodell die Produktstruktur selbst nur implizit abbildet. Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, lassen sich Produkt- und Prozessstruktur in der Verfahrenstechnik nicht voneinander getrennt betrachten, sondern werden immer zusammen festgelegt. Man spricht deshalb auch von einer *Produkt-Prozess-Struktur*. (Yang 2005, 45f.) Dementsprechend steht bei dem hier vorgestellten Datenmodell auch der Prozess mit seinen Prozessschritten im Mittelpunkt, da das vorrangige Ziel die Berechnung der Produktverfolgung ist, auf deren Basis die chargenbezogene Zuordnung der Qualitätsdaten möglich wird.

Der gesamte Produktionsprozess besteht dabei aus mehreren *Prozessesegmenten*, wobei jedes Prozesssegment, bis auf das letzte, einen Nachfolger hat. Ein solches Segment kann entweder ein Verarbeitungs- bzw. Speicherungsschritt – also ein Prozessschritt – sein oder eine verbindende Transporteinrichtung, im vorliegenden Beispiel eine Rohrleitung. Demzufolge ist jedem Prozesssegment ein bestimmter Teil der Anlagenausrüstung zugeordnet. Zu einem verarbeitenden Prozesssegment kann so auch mehr als nur ein Apparat gehören, da beispielsweise bei der Kleberseparation mehrere Siebe parallel laufen.

Ein Prozesssegment besitzt weiterhin einen oder mehrere Zu- und Abflüsse, über welche die beteiligten Stoffe ein- und ausgetragen werden. Hierzu zählen das Hauptprodukt, der Rohstoff, Zwischen- und Nebenprodukte sowie Hilfsstoffe. An vielen Stellen werden Messgrößen wie etwa Durchflussmengen in Form von Volumenströmen für diese Flüsse gemessen, weshalb ihnen Messstellen zugeordnet sein können. Zusätzlich werden hier die verwendeten Stoffmengen (Soll/Ist/Min./Max.) beschrieben. Durch Sollwertvorgaben der zufließenden Stoffe wird die *Produktstruktur* im Rahmen des Prozesses abgebildet.

Messstellen befinden sich immer an den Ausrüstungsobjekten der Anlage und unterteilen sich in Online- (Sensorik) und Offline-Messstellen (Probenentnahmen). Während jeder in Betrieb befindlichen Online-Messstelle eine entsprechende Vielzahl an Sensormessungen zugeordnet ist, wird an einer Probenentnahmestelle eine Stoffprobe entnommen, an der dann die verschiedensten Laboranalysen vorgenommen werden können. Mit einer Laboranalyse wird eine bestimmte Stoffeigenschaft der Probe (Messgröße) ermittelt und dieser zugeordnet.

Die Rohstoffanlieferung eines Lieferanten wird per Laboranalyse untersucht und erhöht den Lagerbestand des Weizens um die Liefermenge. Analog verhält es sich mit der Produktauslieferung an einen Kunden, die ebenfalls im Labor analysiert wird und den Lagerbestand an Trockenstärke um die Verlademenge reduziert.

Auf diese Weise lässt sich auf Grundlage des konzeptuellen Datenmodells die Produkt-Prozess-Struktur abbilden und softwaretechnisch umsetzen.

Das in Abbildung 25 dargestellte konzeptuelle Datenmodell ist auf den Weizenstärke-Produktionsprozess angepasst. Allerdings sind die in dieser Arbeit verwendeten Prinzipien zur Realisierung der Datenerfassung und -nutzung nicht prozessspezifisch und das Modell deshalb übertragbar auf andere Prozesse. Es muss lediglich um die verwendeten Stoffe bereinigt werden. Das *generische* konzeptuelle Datenmodell ist im Anhang in Abbildung A-1 einsehbar.

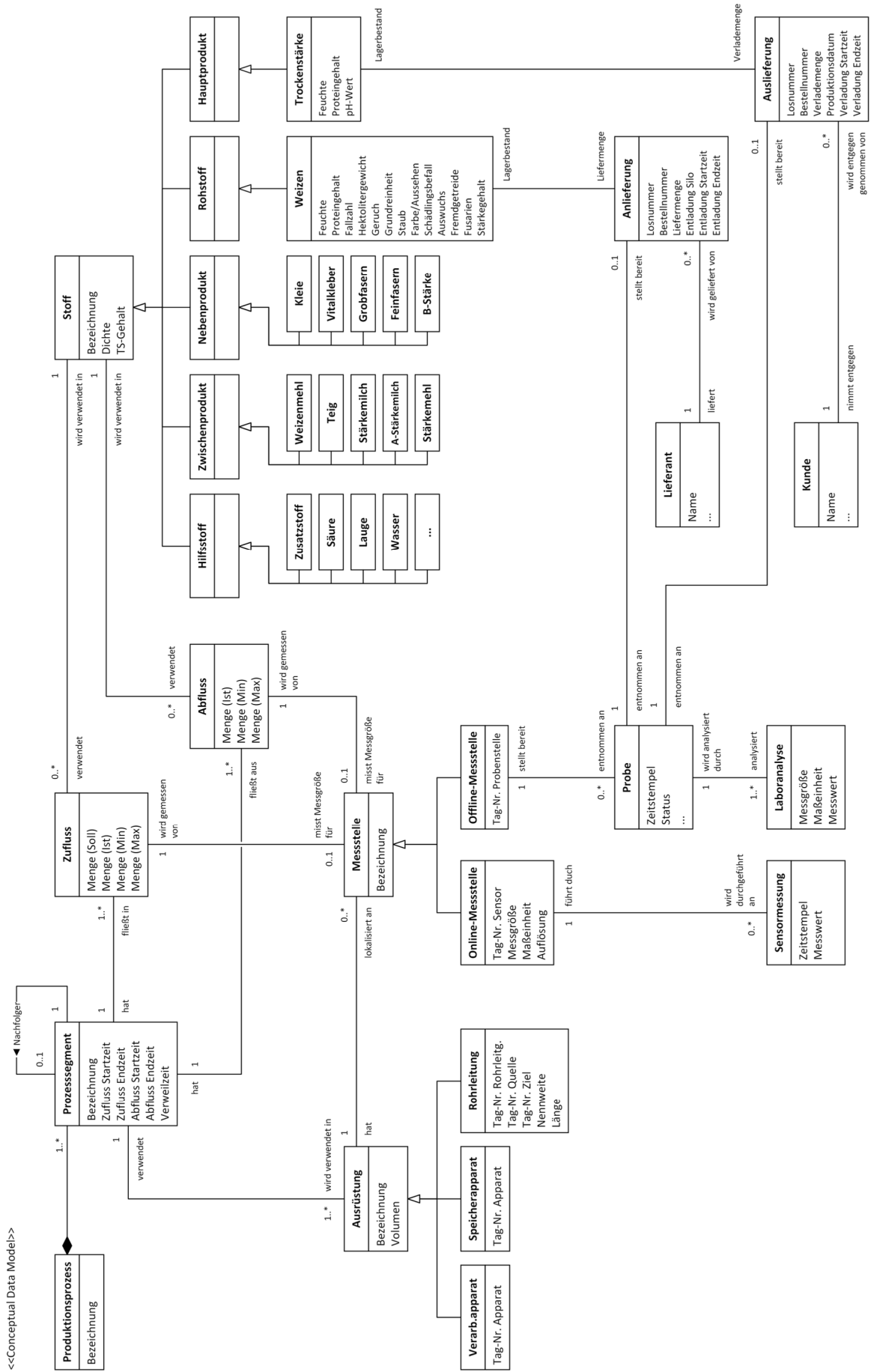


Abbildung 25: Konzeptuelles Datenmodell

4.6.2 Optionen einer Softwarelösung

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, auf welche Art eine praktische Umsetzung des Konzepts erfolgen könnte. Allgemein gibt es drei Optionen:

- (1) Anpassung von Standardsoftware durch Customizing
- (2) Individualentwicklung
- (3) Anpassung von Standardsoftware durch Erweiterungsprogrammierung

Die Anpassung einer Standardsoftware durch Customizing ist oftmals die günstigste Lösung, da alle benötigten softwaretechnischen Funktionen bereits vorhanden sind. Nach LANNINGER & WENDT umfasst das Customizing "[...] alle Maßnahmen [...], die im Rahmen der Einführung von Anwendungssystemen zur Anpassung einer standardisierten Software an die konkreten Anforderungen des Anwenders durchgeführt werden." Hierbei werden zuerst die benötigten Softwarekomponenten ausgewählt (Konfiguration) und danach die Software durch das Setzen von Parametern (Parametrisierung) an die Strukturen und Prozesse des Anwenders angepasst. (Lanninger und Wendt 2012) Auch wenn sich im Zuge von Industrie 4.0 die Thematik digitaler Abbilder – vor allem in der Ausprägung des digitalen Zwillings – zu einem Hype-Thema entwickelt hat, so gestaltet sich doch die Suche nach konkreten Softwarelösungen bisher noch schwierig. In den Recherchen konnte keine Standardsoftware gefunden werden, die die gesuchte Funktionalität der digitalen Abbildung eines verfahrenstechnischen Produkts in einem kontinuierlichen Produktionsprozess realisiert. Der mit Abstand größte Teil bestehender oder in Entwicklung befindlicher Lösungen konzentriert sich auf die Fertigungstechnik oder die chargenbasierte Verfahrenstechnik. Deshalb ist die erste Option aktuell nicht umsetzbar und eine vollständige oder teilweise Individualentwicklung wird zum jetzigen Zeitpunkt unumgänglich sein.

Vollständige Individualentwicklungen bieten größtmögliche Freiheiten. So könnte die Umsetzung etwa in Form einer Webanwendung und einer relationalen Datenbank geschehen, die die beschriebenen Funktionalitäten des digitalen Produktabbilds implementiert und über eine Weboberfläche bereitstellt. Bestimmte produktbezogene Informationen können damit auch externen Anspruchsgruppen wie Kunden und Lieferanten leicht zugänglich gemacht werden. Da alle an der Produktion beteiligten Systeme, wie das PLS-, ERP-, LIMS- und das PIMS-System, entsprechende Programmierschnittstellen aufweisen, stellt die Integration mit diesen aus softwaretechnischer Sicht in der Regel kein größeres Problem dar. Der Vorteil dieser Variante ist ihre überschaubare Komplexität, da die Webanwendung einen eng abgegrenzten Zweck erfüllt. Darüber hinaus wird damit dem Trend hin zu dezentralen, web-basierten Systemlandschaften Rechnung getragen, was ein Argument in Hinsicht auf die Zukunftsfähigkeit ist. So ließe sie sich auch flexibel in Portal- oder Mobillösungen integrieren und später durch weitere Schnittstellen erweitern. Nachteilig ist der hohe Aufwand für Entwicklung und Einführung, was die Individualentwicklung häufig zur zeit- und kostenintensivsten Option macht. Des Weiteren erhöht sie die Heterogenität der Anwendungssystemlandschaft, was den Verwaltungs- und Wartungsaufwand vergrößert.

Die dritte Option ist, eine Standardsoftware mittels Erweiterungsprogrammierung so anzupassen, dass sie die gewünschten Funktionen umsetzt. Diese Variante wird angewandt

bei der „[...] anwenderspezifischen Ergänzung und Anpassung einer Standardsoftware [...], wenn die Möglichkeiten des Customizing i. e. S. – Konfiguration und Parametrisierung – nicht ausreichen.“ Dabei wird individuelle Software vom Anwender entwickelt, um die Standardsoftware so zu verändern, dass sie dessen Anforderungen erfüllt. Hierfür bieten die meisten Hersteller entsprechende Schnittstellen an und liefern teilweise sogar passende Werkzeuge und Programmierumgebungen mit. (Lanninger und Wendt 2018) Somit bleibt die Frage, ob es ein System gibt, das für das digitale Abbild als Plattform genutzt werden kann.

Im Unternehmensbereich gibt es eine große Zahl an spezifischen Softwarelösungen für die vielfältigen betrieblichen Aufgaben. Sie werden zur einfacheren Unterscheidung anhand ihres Funktionalitätsschwerpunkts in Systemklassen eingeteilt. Da im Rahmen dieser Masterarbeit keine detaillierte Marktrecherche der zahlreichen existierenden Systeme durchgeführt werden konnte, erfolgt die Betrachtung überwiegend auf Ebene der Klassen. Zur groben Sondierung der Umsetzungsmöglichkeiten auf Basis einer Erweiterungsprogrammierung innerhalb einer Standardsoftware sollen demnach geeignete Systemklassen auf Ihre Eignung zur Integration des digitalen Produktabbilds hin untersucht werden. Als Orientierung für die Suche bietet sich einerseits die Automatisierungspyramide an, andererseits aber auch Systeme, deren Funktionalität für die Verwaltung von Produktdaten ausgelegt ist.

Ausgehend von der Automatisierungspyramide gibt es die Klassen der Prozessleitsysteme (PLS), der Manufacturing Execution Systems (MES) sowie der Enterprise-Resource-Planning-Systeme (ERP). Der Begriff *manufacturing* deutet bereits an, dass MES aus der Fertigungsindustrie stammen. Im verfahrenstechnischen Bereich gibt es analog dazu noch die Batch Execution Systems (BES), die für die Steuerung von Chargenprozessen zum Einsatz kommen. Allerdings werden diese selbst von den Herstellern oft dennoch als MES bezeichnet. Neben den Systemen der Automatisierungspyramide gibt es weitere Systemklassen, deren Zweck die Erfassung von Produkt- oder Prozessdaten ist: die Produktlebenszyklus-Management-Systeme (PLM) sowie die Process Information Management Systems (PIMS), wobei das *P* statt für *Process* auch für *Plant* stehen kann.

Insofern sind zusammenfassend Überlegungen anzustellen hinsichtlich der Integration in die folgenden Systemklassen:

- (1) Prozessleitsystem (PLS)
- (2) Enterprise Resource Planning System (ERP)
- (3) Manufacturing Execution System (MES)
- (4) Produktlebenszyklus-Management-System (PLM)
- (5) Process Information Management System (PIMS)

Ein PLS befindet sich funktional auf der tiefsten operativen Ebene. Es realisiert die zentrale Aufgabe des Leitens eines Prozesses im direkten Kontakt mit der Automatisierungshardware. (Schaudel et al. 2018, S. 59) Die Nutzergruppe eines solchen Systems sind die Operatoren. Weder stellen die Operatoren die Hauptzielgruppe für die Nutzung eines digitalen Produktabbilds dar, noch ist ein PLS funktional geeignet für eine höhere, datenaggregierende und -analysierende Funktion wie die des digitalen Produktabbilds, weshalb diese Systemklasse als ungeeignet angesehen wird.

Ein ERP-System ist auf höchster betrieblicher Ebene angesiedelt und für die betriebliche und überbetriebliche Planung und Steuerung der Unternehmensfunktionen zuständig. Es realisiert die Auftrags- und Ressourcenplanung und umfasst die Kernfunktionen zur Durchführung der Geschäftsprozesse des Vertriebs-, Rechnungs-, Finanz- und Personalwesens. In der Regel enthält es auch Funktionen der Bestandsführung, Materialbedarfs-, Einkaufs- und Produktionsplanung. Die Abgrenzung zu einem MES ist mitunter fließend, da die Aufgaben beider Systemklassen Überschneidungen aufweisen. Oft wird die Fertigungssteuerung in einem ERP-System jedoch nur unzureichend unterstützt, da die vorgehaltenen Daten bezüglich ihrer zu geringen zeitlichen Aktualität und zu groben Granularität unzureichend sind. Diese Lücke versuchen MES zu schließen. (Mönch 2018) (Gronau 2018) Die Integration des digitalen Produktabbilds in ein ERP-System ist über eine Erweiterungsprogrammierung zwar möglich, wird aufgrund der Ferne zur Produktionsebene allerdings als ungeeignet bewertet. Für die Umsetzung werden feingranulare Daten mit hoher Aktualität benötigt, wofür die ERP-Ebene formal nicht vorgesehen ist.

MES konzentrieren sich auf die eigentliche Durchführung des Produktionsprozesses und stellen das operative Bindeglied zwischen der Unternehmens- und der Prozessleitebene dar. Zu seinen Aufgaben zählen die vier Bereiche des Produktions-, Qualitäts-, Instandhaltungs- und Lager-/Bestandsmanagements. Hinsichtlich der zeitlichen Aktualität und Datengranularität arbeitet ein MES in Echtzeit mit den feingranularen Daten aus dem PLS. (ZVEI 2010, 7ff.) Im Hinblick auf das digitale Produktabbild sind hier insbesondere die Teilbereiche der Materiallogistik, Betriebsdatenerfassung und des Qualitätsmanagements hervorzuheben. Damit deckt ein MES zumindest formal die erforderlichen funktionalen Aspekte der Produktverfolgung und Qualitätserfassung ab und arbeitet mit den dafür notwendigen Daten. Allerdings steht der Nutzen eines MES nicht bei jeder betrieblichen Konstellation außer Frage. So wird beispielsweise in dem in dieser Arbeit betrachteten Unternehmen kein MES eingesetzt, da der Nutzen eines solchen Systems für das vorliegende Produktionsumfeld als nicht offensichtlich betrachtet wird, wie in Abschnitt 3.5 angedeutet wurde. Dennoch ist möglicherweise ein MES auch hier dazu geeignet, die bestehenden Einzelsysteme enger miteinander zu verbinden und so die Effizienz und Transparenz der Produktion zu erhöhen, weshalb eine nähere Analyse dieser Option für das Unternehmen empfehlenswert ist. Insofern wird im Allgemeinen die Integration des Konzepts in ein MES über eine Erweiterungsprogrammierung als geeignete Lösung angesehen, kann jedoch im speziellen Fall hier nicht erwogen werden.

PLM-Systeme haben ihren Ursprung in der Produktentwicklung der Fertigungsindustrie. Sie bauen auf den Produktdatenmanagement-Systemen (PDM) auf, die dem Zweck dienen, alle produktdefinierenden Daten, wie zum Beispiel technische Zeichnungen, 3D-CAD-Modelle und Stücklisten, in einer gemeinsamen Datenbank zu verwalten. Die Funktion von PDM-Systemen lässt sich mit einem Dokumentenarchiv vergleichen, wobei auch die dazugehörigen technisch-organisatorischen Prozesse wie etwa das Änderungsmanagement in Form von Workflows mit abgebildet werden, sodass sich die Bearbeitungsstände (Revisionen) des Produktmodells nachverfolgen lassen. PLM-Systeme erweitern diesen Ansatz auf den gesamten Lebenszyklus eines Produkts, indem die vielfältigen produktbezogenen Daten, die entlang des Produktlebenszyklus anfallen, erfasst und zentral verwaltet werden. (Stelzer 2018) (Schuh 2018) In der Prozessindustrie liegt der Schwerpunkt solcher Systeme daher auf dem Management der Produkt-Prozess-Struktur an sich

im Sinne der Entwicklung und Weiterentwicklung einer Anlage. Somit eignen sich PLM-/PDM-Systeme eher zur Abbildung und Verwaltung der Anlagenstruktur über ihren Lebenszyklus hinweg als zur Realisierung des digitalen Abbilds eines verfahrenstechnischen Produkts mit dem Hauptzweck, die Verfolgbarkeit umzusetzen. Für die Anwendung der Verfolgung und Qualitätserfassung im operativen Betrieb ist ein PLM-System nicht vorgesehen und deshalb für den vorliegenden Anwendungsfall ungeeignet.

Ein PIMS dient zur „[...] *Sammlung, Integration, Aufbereitung, Archivierung und Berichterstellung sowohl von aktuellen als auch von historischen Informationen über den Produktionsprozess.*“ In diesem System werden Produktionsdaten aus verschiedenen Quellen konsolidiert und so die Berechnung von Produktionskennziffern sowie die Nachverfolgung von Produktionsabläufen ermöglicht. (ZVEI 2010, S. 24) Das Funktionsspektrum solcher Systeme kann sehr umfangreich werden und auch fortgeschrittene Datenanalysetechniken umfassen. Je nach Vernetzungsgrad kann es sich zu einem der wichtigsten Datenaggregationspunkte im Produktionsumfeld entwickeln. Das im Unternehmen eingesetzte *PI System* von OSIsoft gehört zu dieser Systemklasse. Bislang historisiert es dort allerdings nur die Daten aus dem PLS und wird für einfachere Datenanalysen eingesetzt, wodurch die vorhandenen Möglichkeiten nicht ausgeschöpft werden. Das *PI System* besitzt eine große Vielfalt an Schnittstellen und kann als betriebsweiter Aggregator für produktionsbezogene Daten sowie als Datenlieferant für andere Systeme fungieren, die diese Daten weiterverwerten. Es stellt außerdem mit dem *PI AF SDK* (Asset Framework) ein Software Development Kit (SDK) zur Verfügung, mit dem die Nutzer eigene Anwendungen im *PI System* entwickeln können. Mit seiner Interkonnektivität, also der Integrierbarkeit von Daten aus dem PLS-, ERP- und LIMS-System, sowie der Möglichkeit der Erweiterungsprogrammierung durch das *AF SDK* besitzt es alle notwendigen Voraussetzungen für die Realisierung des digitalen Produktabbilds und wird deshalb als geeignet eingestuft.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass im Allgemeinen ein MES aufgrund seiner Aufgabenbestimmung und Einbindung in die Produktion die geeignete Basis für die Umsetzung des Konzepts bietet. Auf das Unternehmensbeispiel im Speziellen bezogen lässt sich allerdings konstatieren, dass aufgrund der vorhandenen Systemlandschaft das PIMS hier die beste Alternative darstellt.

5. PROTOTYPISCHE UMSETZUNG

5.1 VERWENDETE SOFTWARE UND SCHNITTSTELLEN

Um das beschriebene Konzept in der Praxis zu testen, erfolgte im Unternehmen eine prototypische Umsetzung mit Hilfe des PIMS *OSIsoft PI System* und *Microsoft Excel*. Das Ziel war es, die Plausibilität der Berechnungen anhand von realen Prozessdaten des Weizenstärke-Produktionsprozesses zu überprüfen und sicherzustellen.

Die Wahl fiel auf die PI System/Excel-Kombination aufgrund folgender Kriterien:

- Gute Integration von Excel mit dem OSIsoft PI System durch PI DataLink für den dynamischen Datenimport in Excel und PI ProcessBook zur Datenanalyse
- Schnelle Umsetz- und Überprüfbarkeit des Konzepts
- Betriebsinterne Vorgabe zur Kostenminimierung durch Verzicht auf zusätzliche Softwarelizenzen oder die Entwicklung von Individualsoftware
- Verfügbarkeit an fast jedem PC in der Prozessentwicklungsabteilung

Microsoft Excel dient hierbei als Front-End und nutzt *OSIsoft PI Server* als Back-End für den Zugriff auf die Sensordaten. Die Schnittstelle zwischen Excel und dem PI Server (im Folgenden als PIMS referenziert) wird von dem Excel-Add-In *PI DataLink* zur Verfügung gestellt, das mittels spezifischer Excel-Funktionen einen dynamischen Datenzugriff ermöglicht.

5.2 STAMM- UND BEWEGUNGSDATEN

Da zwischen dem PIMS und den ERP-/LIMS-Systemen keine integrativen Schnittstellen bestehen (vgl. Abbildung 11), konnten nicht alle vorhandenen Daten für die Abbildung der Produkt-Prozess-Struktur im Prototyp verwendet werden. In Tabelle 7 ist eine Übersicht über alle relevanten Datenarten und deren Verfügbarkeit für die prototypische Umsetzung aufgeführt.

Datenart	Verfügbarkeit
Stammdaten	
Anlagenausrüstung	✓
Stoffe	✓
Bewegungsdaten	
Sensordaten (aus dem PIMS) Quantitativ: Füllstand, Masse, Massestrom, Volumenstrom Qualitativ: Dichte, pH-Wert, TS-Gehalt, Temperatur	✓
Laboranalysedaten (aus dem LIMS) Qualitativ: pH-Wert, TS-Gehalt, Proteingehalt	✗
Annahmeprotokoll des Rohstoffs (aus dem ERP)	✓
Verladeprotokoll des Produkts (aus dem ERP)	✗

Tabelle 7: Relevante und verfügbare Daten für die prototypische Umsetzung

Aufgrund der fehlenden Schnittstellen musste auf die direkte Einbindung der Laboranalysedaten sowie der Annahme- und Verladeprotokolle verzichtet werden. Jedoch zählt insbesondere das Weizenannahmeprotokoll zu den unverzichtbaren Daten, denn die Annahmezeiten stellen den Ausgangspunkt für die Nachverfolgung dar. Daher war eine Möglichkeit zur Nutzung dieser Daten zu finden. Diese bestand im manuellen Export per CSV-Datei aus dem ERP-System und Import in Microsoft Excel. Für das Stärkeverladeprotokoll und die Laboranalysedaten konnte diese Methode nicht angewandt werden, sodass auf den letzten Schritt der Zuordnung des berechneten Prozesszeitfensters zu den Stärkechargen sowie eines großen Teils der qualitativen Informationen verzichtet werden musste.

Für die Realisierung der Kernfunktion der Produktverfolgung waren die verfügbaren Daten gleichwohl ausreichend. Insofern bestand die umgesetzte Funktionalität in der Nach- und Rückverfolgung einer Weizen- bzw. Stärkecharge durch den Prozess inklusive der Anzeige der verfügbaren qualitativen Daten. Dies waren Dichten, pH-Werte, TS-Gehalte und Temperaturen an den Stellen, wo derartige Informationen per Sensorik durch das PLS erfasst und aus dem PIMS abrufbar sind (vgl. Abbildung 17 Datenbedarfsanalyse/-abgleich).

Um die Anwendung zu realisieren, wurden in Excel zunächst Tabellen mit den folgenden Inhalten angelegt:

- Stammdaten der Anlagenausrüstung und der verwendeten Stoffe
- sensorische Bewegungsdaten
- Weizenannahmeprotokoll
- jeweils ein Prozessmodell für die Nach- und Rückverfolgung mit den dazugehörigen Verweilzeitberechnungen und Qualitätsdatenzuordnungen

Darüber hinaus gibt es eine Seite für die Benutzerinteraktion, auf welcher der Benutzer Eingaben vornehmen kann und die Ergebnisse angezeigt werden.

Die verwendeten Stammdaten setzen sich aus den notwendigen Informationen über die Anlagenausrüstung und die Stoffe zusammen. Zur Anlagenausrüstung zählen die Apparate, Rohrleitungen und Messstellen der Anlage, deren Typologie in Abbildung 14 und konzeptuelles Datenmodell in Abbildung 15 vorgestellt wurden. Die Stammdatentabellen enthalten alle Informationen über die Apparate und Rohrleitungen, die für die Umsetzung benötigt werden und aus den R&I-Fließbildern sowie den technischen Apparatedokumentationen entnommen werden konnten. Wie in Kapitel 4.5.3 beschrieben ist bei der Verweilzeitberechnung vor allem das Volumen entscheidend und stellt insofern den wichtigsten zu hinterlegenden Wert für jeden Ausrüstungsgegenstand dar. Rohrleitungsdimensionen unterliegen größtenteils Schätzwerten. So waren zwar die Nennweiten an den Leitungen ablesbar, die Längen mussten jedoch von einem Prozessingenieur geschätzt werden, da diese Informationen nicht in den Dokumenten verzeichnet sind.

In Tabelle 8 und Tabelle 9 sind jeweils einige Stammdatenbeispiele für die Apparate und Rohrleitungen der Anlage angegeben. Mit diesen Elementen lässt sich die Prozessstruktur gemäß des Prozessmodells abbilden. Für die Messstellen wird im Prototyp keine separate

Stammdatentabelle verwendet. Stattdessen wird deren Lokalisierung an der Anlagenaus-
 rüstung direkt in der Prozesstabelle in den einzelnen Prozesssegmenten vorgenommen.

Tag-Nr.	Bezeichnung	Volumen [m ³]
0214SI056	Weizensilo 56	2200
0231MX001	Teigmischer	6
0231TK001	Teigreifetank	10
0231ML001	Gorator	0,2

Tabelle 8: Stammdaten der Apparate (Beispiel)

Tag-Nr.	Quelle	Ziel	Nennweite	Länge [m]
0231-PT-0008-400-010P01	0231MX001	0231TK001	DN400	10
0231-PT-0001-250-010P01	0231TK001	0231ML001	DN250	12

Tabelle 9: Stammdaten der Rohrleitungen (Beispiel)

Die Stammdatentabelle der Stoffe beinhaltet die aufgrund fehlender Sensorik nicht mess-
 baren und nicht berechenbaren Dichteinformationen, welche für die Umrechnungen zwi-
 schen Masse- und Volumenströmen benötigt werden, sowie die bekannten TS-Gehalte.
 Einige Beispiele sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Stoff	Dichte [t/m ³]	TS [%]
Rohweizen	0,8	87,0
Weizenmehl	0,5	87,6
Frischwasser	0,997	0,0

Tabelle 10: Stammdaten der Stoffe (Beispiel)

Die Bewegungsdatentabelle enthält die vom PIMS mit Hilfe des *PI DataLink* abgerufenen
 Sensordaten für einen definierten Abfragezeitraum in einer zeitlichen Auflösung von ei-
 ner Minute. Dafür sind in Tabelle 11 eine Reihe von illustrativen Beispielen gegeben.

Datum/Tag-Nr.	0231FIC001	0231LIC006	0231TI006
Maßeinheit	m ³ /h	%	°C
10.12.2017 06:00:00	14,84	46,00	30,88
10.12.2017 06:01:00	14,62	46,30	30,88
10.12.2017 06:02:00	14,41	46,55	30,86

(Werte aus veröffentlichungsrechtlichen Gründen rein illustrativ)

Tabelle 11: Bewegungsdaten der Sensoren (Beispiel)

Schließlich wurde das Weizenannahmeprotokoll manuell aus dem ERP-System exportiert
 und in die entsprechende Prototyp-Tabelle importiert. Damit sind alle benötigten Daten
 vollständig und können für die Berechnungen genutzt werden.

5.3 BENUTZUNG DER ANWENDUNG UND UMSETZUNG DER BERECHNUNGEN

Die Benutzung der Anwendung ist über jeweils eine Benutzerinteraktionsseite für die
 Nach- und Rückverfolgung realisiert. Für die Nachverfolgung ist diese beispielhaft in Ab-
 bildung 26 dargestellt. Aus Geheimhaltungsgründen sind die prozessbezogenen Informa-
 tionen auf dieser Abbildung modifiziert und der Detailgrad der Diagramme reduziert.

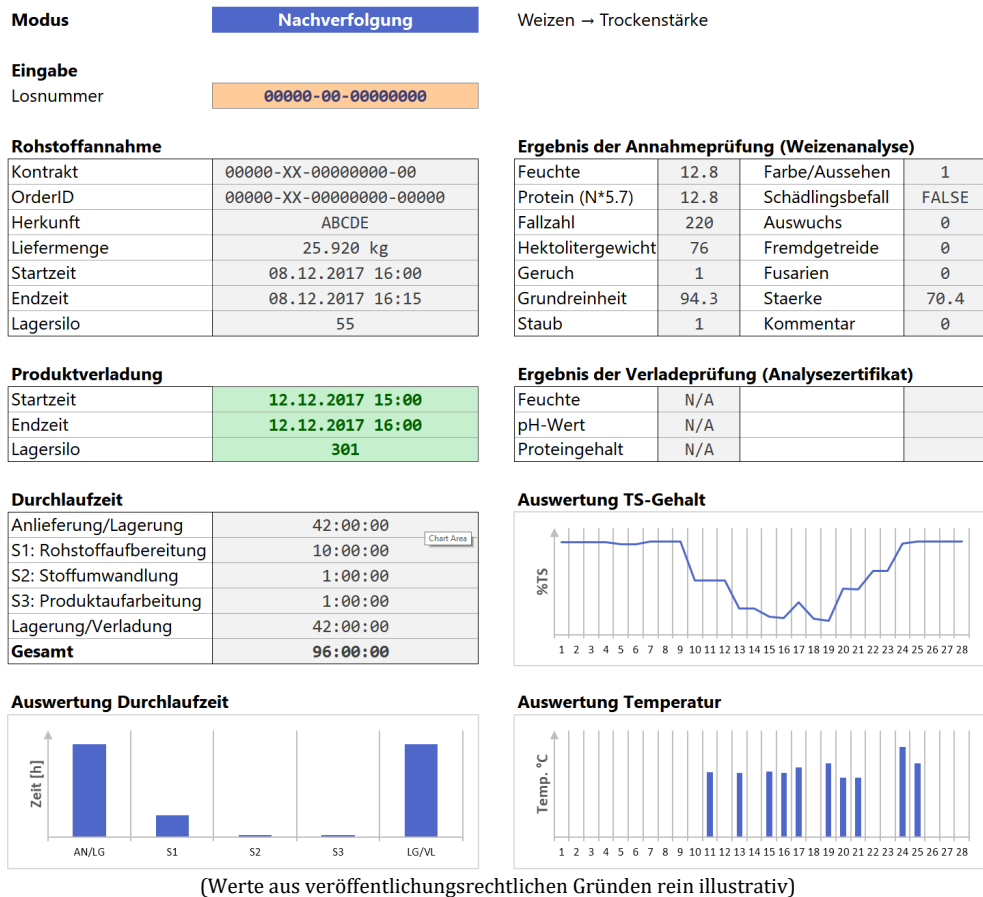


Abbildung 26: Benutzeroberfläche des Prototyps für die Nachverfolgung

Um eine Nachverfolgung durchzuführen, wird die Losnummer einer Weizencharge in das Eingabefeld auf der Benutzerinteraktionsseite eingegeben. Anhand der Losnummer wird im Weizenannahmeprotokoll der Entladezeitraum mit Start- und Endzeit der Entladung, die Entlademenge und das Weizensilo als Entladeziel ermittelt. Da die Ergebnisse der Weizenannahmeprüfung ebenfalls in dem Protokoll enthalten sind, werden diese zusätzlich ausgegeben, um die Rohstoffqualität leicht überprüfen zu können.

Mit diesen Informationen werden in der Prozesstabelle die Verweilzeiten der verfolgten Stoffmenge für jeden einzelnen Prozessschritt auf die in Kapitel 4.5.3 beschriebene Weise berechnet. Der Entladezeitraum der Weizencharge bildet dabei die Basis für die zeitbasierten dynamischen Sensordatenabfragen. Wie zuvor erläutert, können Datenerfassungslücken dabei mittels Softsensoren geschlossen werden. Softsensoren wurden in Excel mit Zellformeln umgesetzt, sofern sie nicht bereits direkt im PLS als PCE-Leitfunktion implementiert worden sind.

In Tabelle 12 ist ein beispielhafter Auszug aus der Prozesstabelle aufgeführt, bei dem die einzelnen Prozesssegmente spaltenweise von links nach rechts angeordnet sind. Wo verfügbar, werden die qualitativen Informationen zum Produkt angezeigt, was für das Zeitfenster eines Prozesssegments mit Minimum-, Maximum- und Durchschnittswerten möglich ist. So sind auch Wertschwankungen analysierbar. Aus Platzgründen wurde für diese Arbeit jedoch eine reduzierte Darstellung mit nur jeweils einem Qualitätswert zum Zeitpunkt $t_{A, ein}$ gewählt. Des Weiteren gilt für die Verweilzeiten des Flussanfangs und -endes $\tau_A = \tau_E$, was aufgrund der Kontinuität der Stoffflüsse eine valide Vereinfachung ist.

Prozesselement	19	20	21	22	23
Prozessschritt	10		11		12
Bezeichnung	Teigmischer	Rohrleitung	Teigreifetank	Rohrleitung	Gorator
Tag-Nr.	0231MX001	0231-PT-0008-...	0231TK001	0231-PT-0001-...	0231ML001
Inhalt					
Volumen	6,0 m ³	1,3 m ³	10,0 m ³	0,6 m ³	0,4 m ³
L-Sensor			0231LIC006		
Füllstand	80,0%	100,0%	46,0%	100,0%	100,0%
Zufluss 1					
Stoff	Weizenmehl	Teig	Teig	Teig	Teig
F-Sensor	0231WIC002	0231FI905	0231FI905	0231FI906	0231FI906
m-Strom (Ist)	30,30 t/h	45,10 t/h	45,10 t/h	45,10 t/h	45,10 t/h
V-Strom (Ist)	60,60 m ³ /h	37,58 m ³ /h	37,58 m ³ /h	37,58 m ³ /h	37,58 m ³ /h
D-Sensor					
Dichte	0,500 t/m ³	1,200 t/m ³	1,200 t/m ³	1,200 t/m ³	1,200 t/m ³
TS-Gehalt	87,6%	58,9%	58,9%	58,9%	58,9%
T-Sensor				0231TI006	
Temperatur				30,2 °C	
pH-Messstelle					
pH-Wert					
Zufluss 2					
Stoff	Wasser				Wasser
F-Sensor	0231FIC001				0231FIC002
m-Strom (Ist)	14,80 t/h				42,20 t/h
V-Strom (Ist)	14,84 m ³ /h				42,33 m ³ /h
D-Sensor					
Dichte	0,997 t/m ³				0,997 t/m ³
TS-Gehalt	0,0%				0,0%
T-Sensor					0231TIC011
Temperatur					29,8 °C
pH-Messstelle					0231AIC001
pH-Wert					7,1
Zufluss n					
...
Abfluss 1					
Stoff	Teig	Teig	Teig	Teig	Teig
F-Sensor	0231FI905	0231FI905	0231FI906	0231FI906	0231FI907
m-Strom (Ist)	45,10 t/h	45,10 t/h	45,10 t/h	45,10 t/h	87,30 t/h
V-Strom (Ist)	37,58 m ³ /h	37,58 m ³ /h	37,58 m ³ /h	37,58 m ³ /h	79,36 m ³ /h
D-Sensor					
Dichte	1,200 t/m ³	1,200 t/m ³	1,200 t/m ³	1,200 t/m ³	1,100 t/m ³
TS-Gehalt	58,9%	58,9%	58,9%	58,9%	30,4%
T-Sensor			0231TI006		
Temperatur			30,2 °C		
pH-Messstelle					
pH-Wert					
Abfluss n					
...
Verweilzeit					
Verweilzeit (τ_A/τ_E)	0,128 h	0,035 h	0,122 h	0,016 h	0,005 h
Flussanfang, Eintritt ($t_{A, ein}$)	10.12.17 06:00	10.12.17 06:07	10.12.17 06:09	10.12.17 06:17	10.12.17 06:18
Flussanfang, Austritt ($t_{A, aus}$)	10.12.17 06:07	10.12.17 06:09	10.12.17 06:17	10.12.17 06:18	10.12.17 06:18
Flussende, Eintritt ($t_{E, ein}$)	10.12.17 07:30	10.12.17 07:37	10.12.17 07:39	10.12.17 07:47	10.12.17 07:48
Flussende, Austritt ($t_{E, aus}$)	10.12.17 07:37	10.12.17 07:39	10.12.17 07:47	10.12.17 07:48	10.12.17 07:48

(Werte sind aus veröffentlichungsrechtlichen Gründen rein illustrativ)

Tabelle 12: Prozesstabelle mit Verweilzeitberechnung (Beispiel)

Am Ende der Verweilzeitberechnungskette steht das Verladezeitfenster, in welchem die aus der Weizencharge produzierte Menge an Stärke für die Kunden abgefüllt wird. Mit dieser Information muss nur noch im Verladeprotokoll nachgeschlagen werden, um her-

auszufinden, welchen Stärkecharge-Losnummern diese Menge zuzuordnen ist. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist aufgrund der Schnittstellenproblematik dieser letzte Schritt manuell durchzuführen.

Die Rückverfolgung funktioniert im Wesentlichen gleichartig. Hier wird lediglich anstelle einer Stärkechargen-Losnummer das entsprechende Verladezeitfenster in zwei Eingabefelder eingegeben, was den Ausgangspunkt für die Rückverfolgung darstellt. Dann werden die Verweilzeiten vom letzten zum ersten Prozessschritt in einer gesonderten Prozesstabelle berechnet. Am Ende der Berechnungskette steht ein Zeitfenster, das im Weizenannahmeprotokoll nachgeschlagen und den entsprechenden Weizenchargen-Losnummern zugeordnet wird. Da die Nachverfolgungen im Prototyp nicht in Form einer Datenbank persistiert werden können, musste für die Excel-Lösung die Berechnungsvariante der Rückverfolgung gewählt werden. Für eine produktive Umsetzung ist allerdings die datenbankbasierte Variante zu favorisieren, da diese, wie in Abschnitt 4.5.3 erläutert, eine höhere Genauigkeit aufweist.

Letztendlich realisieren der Prototyp bzw. das digitale Produktabbild eine bestimmte Sicht auf die vorhandenen Daten, indem aus der gesamten Datenmenge diejenigen herausfiltert werden, die zu einer definierten Menge des Produkts gehören.

6. EVALUIERUNG

In diesem Kapitel soll eine Evaluierung des erarbeiteten Konzepts vorgenommen werden. Zuerst erfolgen die Verifizierung und Validierung der prototypischen Umsetzung, die im Unternehmen durchgeführt und in Kapitel 5 beschrieben wurde. Anschließend wird das Konzept kritisch diskutiert und zuletzt die Frage beantwortet, wer daraus in welcher Weise einen Nutzen ziehen kann.

6.1 VERIFIZIERUNG UND VALIDIERUNG

Im Rahmen der Verifizierung und Validierung soll bewertet werden, ob der Prototyp den Anspruch der Korrektheit und der Zweckerfüllung bestätigen kann. Zu evaluierende Aspekte sind entsprechend der Zieldefinition die Nach-, Rückverfolgung sowie die Dokumentation qualitativer Produkteigenschaften durch Zuordnung der erfassten Qualitätsdaten zur verfolgten Charge.

Die Bestätigung der Korrektheit bezieht sich auf die *Verfolgungsberechnungen*, die im vorliegenden Fall der Herausforderung unterliegen, dass sie aufgrund des Fehlens von realen Vergleichsdaten nur unzureichend überprüft werden können. Für eine genaue Überprüfung wäre es erforderlich, durchgängig die tatsächlichen Verweilzeiten in den einzelnen Prozessschritten oder zumindest für größere Prozessabschnitte zu kennen. Diese können nur durch Messen ermittelt werden. Einige Methoden hierfür wurden in Abschnitt 4.5.1 vorgestellt und umfassen zum Beispiel den Einsatz von Markierungssubstanzen. Die dafür erforderlichen technischen Voraussetzungen waren im Rahmen der Arbeit jedoch nicht gegeben. Weiterhin kann die Rückverfolgung messtechnisch auf diesem Wege nicht überprüft werden, da die Anlage nur eine Flussrichtung kennt.

Deshalb blieb nur die Alternative, die Korrektheit im Vergleich zu den von Experten angefertigten Berechnungen zu bewerten. Hierzu wurden jeweils zwei verschiedene Nach- und Rückverfolgungsrechnungen aus zwei unterschiedlichen Monaten herangezogen und mit den Berechnungen des Prototyps verglichen. Dabei konnte eine geringe systematische Abweichung der berechneten Prozesszeit von circa 2% festgestellt werden. Diese Abweichung resultiert aus der Genauigkeit der Berechnungen. Während die Rohrleitungsdimensionen für den Prototyp detailliert ermittelt wurden, kalkulierten die Experten bisher mit einem pauschalen Aufschlag von 10% für alle Rohrleitungen. Die Auswirkung der Berücksichtigung von Leitungen gegenüber deren Vernachlässigung beläuft sich jedoch real auf etwa 8% der Prozesszeit, mit welcher der Prototyp folglich rechnet. Eine weitere Fehlerquelle kann auf Rundungsdifferenzen zurückgeführt werden. Manuelle Berechnungen wurden mit einer Genauigkeit bis zur ersten Nachkommastelle durchgeführt während der Prototyp die importierten Sensordaten nutzt, die vom PI Server mit 13 Nachkommastellen bereitgestellt werden. Die festgestellte Abweichung kann also vollständig mit dem bisher zu großen Aufschlag und geringfügigen Rundungsdifferenzen erklärt werden. Folglich wird die Korrektheit als bestätigt angesehen.

Die Korrektheit der *Zuordnung der erfassten Qualitätsdaten* zur verfolgten Charge ist vollständig davon abhängig, dass die Verfolgung fehlerfrei umgesetzt wurde, denn dadurch wird die zeitstempelbasierte Zuordnung dieser Daten erst möglich. Da die Richtigkeit der

Berechnungen erfolgreich überprüft wurde, kann auch hier von der Korrektheit ausgegangen werden.

Um die *Zweckerfüllung* des Prototyps zu bewerten, wurden Reviews mit den Prozessverantwortlichen und -ingenieuren durchgeführt. Durch die Expertenfeedbacks konnte bestätigt werden, dass die Berechnungen des Prototyps plausibel sind, da sie mit denen der Experten im erklärbaren Rahmen übereinstimmen, und dass auch die qualitativen Informationen unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit zur Zufriedenheit ausgegeben werden. Die Zweckerfüllung wurde demnach positiv bewertet.

Für die mittel- bis langfristige Realisierung des digitalen Produktabbilds im betrachteten Unternehmen wird nach einer Testphase eine Integration in die bestehenden Systeme empfohlen. Die Excel-basierte Lösung ist nicht als nachhaltig anzusehen, da sie keine Persistenz der abgerufenen Produktdaten sicherstellt und keinen zugangskontrollierten Zugriff auf diese Informationen für Nutzer außerhalb der Prozessentwicklungsabteilung gewährleisten kann.

6.2 KRITISCHE DISKUSSION

Nach der Evaluierung des Konzepts in der speziellen Gestalt eines Prototyps sollen anschließend die qualitativen Aspekte im Allgemeinen diskutiert werden.

Wie einleitend beschrieben liegt es in der Natur der kontinuierlichen Prozessherstellung, dass keine so trennscharfe Produktabbildung wie in chargenbasierten oder fertigungstechnischen Produktionsprozessen möglich ist. Die Verfolgung von Schüttgütern und Flüssigkeiten in einer kontinuierlich betriebenen verfahrenstechnischen Anlage ist zwangsläufig mit Ungenauigkeiten behaftet.

Es gibt mehrere *Fehlerquellen*, die hierfür verantwortlich sind:

Eine Fehlerquelle besteht in der verwendeten *Traceability-Methode* der mittleren Verweilzeit. Sie stellt eine Abschätzung des Produktflusses dar, da die damit verbundenen Modellannahmen, wie die Pfropfenströmung und das FIFO-Prinzip, von der Wirklichkeit abstrahieren und so für Abweichungen vom realen Fluss sorgen. Diese Abweichungen konnten im Anwendungsbeispiel allerdings nicht gemessen werden, weil die dafür notwendigen technischen Voraussetzungen im Rahmen der Arbeit nicht gegeben waren. Insofern war dieser Fehler nicht quantifizierbar. Die Modellannahme der Zyklensfreiheit ist gegebenenfalls nachteilig, wenn etwa die Frage nach der Fortpflanzung einer Kontamination im Prozessfluss zu untersuchen ist, die unter Vernachlässigung der Rückflüsse und den entstehenden Kreisläufen nicht vollständig beantwortet werden kann.

Eine weitere Quelle ist in den *Messstellen* zu finden. Einerseits sorgt die Messtechnik mit ihren Toleranzen für Ungenauigkeiten. So gilt es darauf zu achten, dass Geräte mit geringen Toleranzwerten und geeigneten Messprinzipien verwendet werden. Andererseits ist die Anzahl der Sensoren im vorliegenden Prozess zu gering für eine lückenlose Erfassung. Mit dem beschriebenen Ersatz durch Softsensoren kann hier zu großen Teilen Abhilfe geschaffen werden. Dennoch bleibt auch diese

Option bei Durchflusssensoren eine Abschätzung auf Basis von Bilanzierungsrechnungen. Der größte Unsicherheitsfaktor sind in diesem Zusammenhang jedoch die auf Expertenschätzungen basierenden Annahmewerte. In ihrer statischen Eigenschaft können sie der dynamischen Realität nur unzureichend gerecht werden.

Große Tanks sind eine weitere Fehlerquelle. Sie bergen das Problem, dass die Stoffe dort eine lange Verweilzeit aufweisen und verschiedenen Chargen ausreichend Raum und Zeit zur Vermischung geboten wird. Aus praktischer Sicht ist dann keine hinreichend genaue Verfolgbarkeit mehr gewährleistet. Zwar konnten im Trockenstärke-Prozess alle Tanks als ausreichend gering im Volumen identifiziert werden, sodass keine umfangreiche Vermischung von Chargen auftritt. Jedoch besteht dieses Problem in anderen Anlagenteilen, sodass es im Sinne der Allgemeingültigkeit der Aussagen mit aufgeführt werden soll.

Zuletzt sei das *Anlagenmodell* selbst erwähnt. Da kein digitales Modell der Anlage existiert, musste die datentechnische Grundlage hierfür selbst geschaffen werden. Dabei wurden die Längen der verbindenden Rohrleitungen zwischen den Apparaten der einzelnen Prozessschritte nur geschätzt. Auch wenn die Auswirkung dieser Tatsache als gering eingeschätzt wird, so ist sie doch vorhanden.

Trotz der bestehenden Fehlerquellen lässt sich abschließend konstatieren, dass das angestrebte Ziel einer *hinreichend genauen* Lösung erfüllt wird, wie durch die Expertenreviews bestätigt werden konnte. Es bleibt aber Raum für *Optimierungspotentiale*:

So könnte eine aufwendigere *Traceability-Methode* verwendet oder kombiniert werden, indem etwa punktuell Simulationsverfahren zum Einsatz kommen. Eine geeignete Stelle hierfür sind etwa die Hydrozyklonanlagen (SHZ und KHZ) und die Weizenmühle, deren komplexes Verweilzeitverhalten bisher noch nicht im Detail untersucht worden ist.

Eine größere Anzahl von *Sensoren* stellt das größte Potential dar. Insbesondere an den Abgängen der Grob- und Feinfasern besteht Bedarf an Durchflusssensoren im Nassprozess, um die statischen Annahmewerte durch dynamische Sensorwerte zu ersetzen. Der Anlagenteil der Stärketrocknung ist ebenfalls unterversorgt. Zusätzliche Sensoren zur Erfassung des Produktflusses wären hier von großem Vorteil. Der generelle Ersatz von Softsensoren durch physische Sensoren ist zwar aufgrund der Kontinuität des Prozessflusses nicht zwingend erforderlich, würde jedoch auch zu einer Erhöhung der Genauigkeit beitragen.

Das Problem *großer Tanks* wäre lösbar, indem man statt eines großen Tanks mehrere kleine verwendet, die kaskadiert befüllt und entleert werden. Die Genauigkeit der Produktverfolgung ist vermutlich kein ausreichend motivierender Anlass für derartige Investitionen in Umbauten an Bestandsanlagen. Für Neubauten könnte dies allerdings eine nützliche Anregung sein.

Schließlich wäre ein *digitales Anlagenmodell* von großem Vorteil. Damit wäre es möglich, eine direkte Verbindung zwischen dem Anlagenabbild und dem digitalen Produktabbild herzustellen. Diese Anlagendaten könnten genutzt werden, um das Prozessmodell exakt abzubilden und zukünftige Änderungen an der Anlage direkt

zu berücksichtigen. Darüber hinaus bildet es die Grundlage für Simulationsverfahren, mit denen etwa Zyklen im Prozess weitreichend einbezogen werden können.

Ein letzter wichtiger Diskussionsaspekt ist die *Übertragbarkeit dieses Konzepts* auf die Prozesse anderer Anlagen. Aufgrund der Vielgestaltigkeit der Produktionsverfahren und der Komplexität von Anlagen in der Prozessindustrie ist eine allgemeingültige Aussage schwierig zu treffen. Aber da das zugrundeliegende Prinzip der Verweilzeitermittlung nicht prozessspezifisch ist, ist eine weitgehende Übertragbarkeit unter Beachtung der in Kapitel 4.1 vorgenommenen Einschränkung des Geltungsbereichs gewährleistet.

Entscheidend ist eine ausreichend vorhandene Menge an Sensoren an den wichtigen Positionen. Wie das aktuelle Beispiel zeigt, ist dies nicht immer selbstverständlich, da die Steuerung einer Anlage nicht so viele Durchflusssensoren erfordert wie die Umsetzung einer lückenlosen Verfolgbarkeit. Eine weitere Voraussetzung ist die langfristige Speicherung aller beteiligten Sensordaten, die allerdings in vielen Branchen der Prozessindustrie bereits aufgrund gesetzlicher Anforderungen gegeben ist.

Die Integration des Konzepts in die bestehenden Softwaresysteme ist anhand der in den Unternehmen vorhanden Anwendungssystemlandschaft jeweils individuell zu prüfen. Die in Kapitel 4.6.2 zusammengestellte Auswahl an Optionen kann hierbei als Leitfaden dienen. Dabei sollte dem Problem der mangelnden Datenverfügbarkeit aufgrund fehlender Integration der beteiligten Systeme besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Das digitale Produktabbild kann nur dann umfassend sein, wenn auf alle benötigten und vorhandenen Daten systemübergreifend zugegriffen werden kann.

6.3 ANSPRUCHSGRUPPEN- UND NUTZENANALYSE

Zum Abschluss der Evaluierung soll analysiert werden, welche Anspruchsgruppen ein Interesse an einem digitalen Produktabbild haben könnten, welcher Nutzen für sie damit verbunden ist und wie dessen wirtschaftliche Verwertbarkeit eingeschätzt werden kann.

THOMMEN definiert den Begriff der *Anspruchsgruppen* (engl. *stakeholders*) wie folgt:

„Anspruchsgruppen sind alle internen und externen Personengruppen, die von den unternehmerischen Tätigkeiten gegenwärtig oder in Zukunft direkt oder indirekt betroffen sind.“ (Thommen 2018)

Man unterscheidet demnach interne und externe Anspruchsgruppen. Folgende *interne Anspruchsgruppen* und deren möglicher Nutzen konnten identifiziert werden:

Prozessingenieure sind dafür zuständig, Verfahren zu entwerfen und weiterzuentwickeln. Ihnen vorstehend ist der *Prozessverantwortliche*, der alle Entscheidungsbefugnisse in seinem Einflussbereich trägt und für den störungsfreien Ablauf des ihm anvertrauten Prozesses verantwortlich ist. Beiden Gruppen entsteht durch die Produktverfolgung und der gezielten Dokumentation der Qualitätsdaten ein Nutzen im Hinblick auf die Optimierung und Diagnose des Prozesses, da die Auswirkungen von Prozessschwankungen und -problemen auf die einzelnen Produktchargen besser analysiert werden können. Sie können neue chargenbezogene Ana-

lysemöglichkeiten anwenden bzw. selbst entwickeln. Die Ursachen von Qualitätsproblemen können so gezielter rückverfolgt und Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Beschaffungs- und Vertriebsmitarbeiter stehen im direkten Kontakt mit Lieferanten und Kunden. Sie sind oft die ersten, die über Qualitätsprobleme informiert werden. Die schnelle Zuordnung zwischen der Eingangs- und Ausgangslogistik in Verbindung mit den durch das digitale Produktabbild realisierten Herkunfts-, Verwendungs- und Qualitätsnachweisen kann bei der schnellen Klärung von Problemen hilfreich sein.

Ist eine einfache Problemlösung nicht möglich, treten die *Juristen* der Rechtsabteilung in Erscheinung. Auch sie haben ein nachvollziehbares Interesse an der Belegkraft der zuvor erwähnten Nachweise, die bei der Beilegung von Rechtsstreitigkeiten in der Auseinandersetzung mit Anspruchsgegnern und Behörden zum Einsatz kommen. Die Verbesserung der Nachweisbarkeit liegt also auch aus Gründen der juristischen Absicherung im Interesse des Unternehmens.

Operatoren überwachen und steuern die Anlage. Sie gehören nicht zum engeren Kreis der Anspruchsgruppen. Doch im weiteren Sinne könnte auch ihnen ein Nutzen durch die Visualisierung einer Chargenverfolgung im Prozessleitsystem entstehen. Dadurch wäre es möglich, bestimmte Anlagenereignisse, wie etwa das Herunterfahren des Prozesses für Wartungsarbeiten, auf den Chargentakt abzustimmen, da derartige Ereignisse die ordnungsgemäße Verfolgung stören.

Die folgenden *externen Anspruchsgruppen* und deren möglicher Nutzen konnten identifiziert werden:

Die *Kunden* des Unternehmens haben ein direktes Interesse an der Produktqualität. Ihr Nutzen besteht im detaillierten Qualitäts- und Herkunftsnachweis, in welchem zum Beispiel die Information zur Verfügung gestellt wird, aus welcher Rohstoffsorte und -charge ihr Produkt hergestellt wurde und dass alle Grenzwerte während der Produktion nachweislich eingehalten wurden. Dies kann auch im Hinblick auf die Kunden der Kunden wichtig sein, wenn die Informationen durch die gesamte Wertschöpfungskette mitgeführt werden sollen. Unternehmen, die an dieser Stelle fortschrittlich aufgestellt sind, haben ein zusätzliches Argument zur Kundenbindung vorzuweisen.

Auch die *Lieferanten* können ein berechtigtes Interesse an einem digitalen Produktabbild haben. Stellt ein Lieferant etwa eine Rohstoff-Kontamination nachträglich fest, muss er proaktiv agieren und eine schnellstmögliche Nachverfolgung veranlassen. Er profitiert davon, wenn die betroffenen Kunden zuverlässig und zügig ermittelt und benachrichtigt werden können.

Zuletzt seien die *Behörden* erwähnt. Wie zu Beginn erläutert, gibt es in vielen Branchen unzählige Gesetze, Richtlinien, Verordnungen und Normen, deren Einhaltung regelmäßig geprüft wird. Ein Unternehmen muss auf Anfrage alle geforderten

Nachweise über die Einhaltung der Regularien erbringen. Das digitale Produktabbild verbessert die Nachweisbarkeit der Herkunft, der Verwendung und der Qualität. So sind die Anforderungen der Behörden besser und schneller erfüllbar.

Zum Abschluss der Evaluierung soll die *wirtschaftliche Verwertbarkeit* des digitalen Produktabbilds eingeschätzt werden. Diese kann zweigeteilt gesehen werden: einerseits der wirtschaftliche Nutzen aus der praktischen Anwendung heraus, andererseits die direkte monetäre Verwertung im Sinne eines datenbasierten Geschäftsmodells. Der praktische Nutzen der Produktverfolgung und chargenbezogenen Qualitätsdokumentation ist im Rahmen der obigen Nutzenanalyse für die verschiedenen Anspruchsgruppen bereits diskutiert worden und ist argumentativ nachvollziehbar.

Eine direkte monetäre Verwertung des digitalen Produktabbilds im Sinne eines datenbasierten Geschäftsmodells ist nach aktuellem Stand kaum absehbar. Kunden werden kaum bereit sein, für detailliertere Qualitätsinformationen über – wie in diesem Beispiel – das Stärkemehl einen Aufpreis zu zahlen. Bereits die monetären Vorteile durch das digitale Produktabbild sind schwer zu quantifizieren. In Zukunft wird die Bereitstellung derartiger Informationen mutmaßlich als Selbstverständlichkeit denn als Zusatzdienstleistung gelten. Aktuell kann es als zusätzliches Verkaufsargument im Bereich des Kundenservice gesehen werden.

Bei fertigungstechnischen Produkten sind viele digitale Geschäftsmodelle vor allem der Nutzungsphase eines Produkts zuzuschreiben. Beispielsweise lassen sich im privaten Umfeld mit vielen elektrotechnischen Konsumartikeln Daten durch Nutzerinteraktionen erheben, die einen geschäftlichen Wert besitzen. Im unternehmerischen Umfeld ermöglicht die Nutzung der von Maschinen erfassten Daten etwa Geschäftsmodelle wie die vorausschauende Wartung. Auch Pay-per-Use-Modelle für fertigungstechnische Erzeugnisse sind hier denkbar.

Gerade diese Nutzungsphase ist es jedoch, die bei einem verfahrenstechnischen Produkt vollständig passiv ausfällt. Daher wird die Chance für die Entwicklung von digitalen Geschäftsmodellen basierend auf dem digitalen Produktabbild in der Prozessindustrie als eher gering eingeschätzt.

7. ABSCHLUSS

7.1 ZUSAMMENFASSUNG

Die Zielsetzung der Arbeit war es, ein Konzept für die Erzeugung eines digitalen Produktabbilds in der kontinuierlichen Prozessproduktion zu erarbeiten. Der Anwendungszweck dieses Abbilds besteht in der Nach- und Rückverfolgung von verfahrenstechnischen Produkten durch den Produktionsprozess und der Dokumentation von Produktqualitätsmerkmalen in dessen Verlauf. Dadurch sollte die Verfolgbarkeitslücke zwischen der auf Chargen basierenden Ein- und Ausgangslogistik geschlossen und eine lückenlose Verfolgbarkeit der Produkte sowie die eindeutige Zuordnung der produktqualitätsbezogenen Daten zu den Ausbringungschargen sichergestellt werden.

Die Erreichung dieses Ziels war mit spezifischen Herausforderungen verbunden. So unterscheidet sich die Prozess- von der Fertigungsindustrie insbesondere durch die verarbeiteten Stoffe. Aufgrund ihrer zumeist formlosen Beschaffenheit in der Gestalt von Fließgütern, Schüttgütern oder Gasen sind sie in der Regel nicht abzählbar und werden massen- oder volumenorientiert gemessen, sodass die Stoffmengen während des kontinuierlich ablaufenden Produktionsprozesses nicht trennscharf voneinander separierbar sind. Da deshalb auch keine Sensor- und Kommunikationstechnologien am Produkt selbst realisierbar sind, muss die Datenerfassung vollständig durch die Anlagentechnik realisiert werden.

Die Erarbeitung der Lösung erfolgte praxisnah an dem repräsentativen Beispiel eines Unternehmens der Lebensmittelindustrie. Dieses stellt aus dem Rohstoff Weizen unter anderem das Produkt Weizenstärke her. Der Weizenstärke-Produktionsprozess ist ein typischer kontinuierlicher Prozess, der in einer verfahrenstechnischen Großanlage betrieben wird. Anhand der Analyse der konkreten Verfahrensschritte dieses Prozesses und der Anlagenausrüstung wurde ein detailliertes Prozessmodell erstellt. Dieses Prozessmodell bildete zusammen mit den Informationen über die vorhandene technische Ausstattung der Anlage sowie der eingesetzten unterstützenden IT-Systeme die Grundlage für die Entwicklung des Konzepts.

Den Kern des Konzepts bildet das konzeptuelle Datenmodell, welches die Grundlage für eine softwaretechnische Umsetzung zur Abbildung der Produkt-Prozess-Struktur darstellt. Weitere wichtige Konzeptbestandteile sind die Berechnungen zur Produktverfolgung, die die genaue Zuordnung von Chargen und Produktqualitätsdaten erst ermöglichen, sowie das Prinzip der Softsensoren, mit denen das Problem der Datenerfassungslücken gelöst werden konnte. Die Produktverfolgungsberechnungen basieren dabei auf dem Prinzip der Ermittlung der mittleren Verweilzeit des Produktstroms in den einzelnen Prozessschritten. Sie nutzen hierfür die Informationen über Apparate- und Rohrleitungsvolumina sowie der durchfließenden Stoffströme und deren Dichte. Softsensoren funktionieren datenbasiert, indem sie die Daten bestehender Prozesssensoren als Eingangswerte nutzen um Ausgangswerte zu berechnen. Sie kommen an den Stellen zum Einsatz, an denen Hardware-Sensoren fehlen.

Für den Konzeptentwurf wurde eine Vorgehensweise vorgestellt, die auf dem von der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) empfohlenen Migrationspfad zur Erhebung eines digitalen Schattens basiert. Die angewandte Vorgehensweise integriert diesen Migrationspfad und besteht insgesamt aus fünf Schritten: Zieldefinition, Festlegung der Datenerfassung, Festlegung der Datennutzung, Bewertung von Umsetzungsoptionen und die Umsetzung. Wesentlich für die Erzeugung eines digitalen Produktabbilds ist die Datenerfassung. Im Rahmen einer Datenbedarfsanalyse und eines -abgleichs wurden die benötigten Stammdaten der Anlagenausrüstung sowie die Bewegungsdaten der Messtellen und deren Art der Datenerfassung definiert. Im Schritt der Datennutzung wurde festgelegt, wie diese Daten verwendet werden, um die Produktverfolgung und -qualitätsdokumentation zu realisieren. Bei der Bewertung von Umsetzungsoptionen wurden verschiedene Softwaresystemklassen in Bezug auf ihre Eignung für eine softwaretechnische Implementierung des Konzepts diskutiert. Im letzten Schritt wurde die im Unternehmen durchgeführte prototypische Umsetzung beschrieben, die positiv verifiziert und validiert werden konnte.

Die Vielfältigkeit der Verfahren in der Prozessindustrie bedingte eine Einschränkung des Geltungsbereichs. So ist das in dieser Arbeit entwickelte Konzept des digitalen Produktabbilds anwendbar für kontinuierlich in einer Monoanlage betriebene Prozesse, die einen einzelnen Rohstoff als Ausgangsgut verwenden (Prinzip der Kuppelproduktion). Die digitale Abbildung konzentriert sich auf ein einzelnes Produkt, das aus diesem Rohstoff hergestellt wird. Dabei wird vom Normalbetrieb der Anlage mit unveränderlichen Fließwegen der Stoffe ausgegangen. Darüber hinaus beschränkt sich das Konzept auf die Produktlebenszyklusphase der Produktion.

Zusammenfassend konnte mit den Ausführungen dieser Arbeit gezeigt werden, dass sich auch für verfahrenstechnische Produkte ein digitales Produktabbild realisieren lässt. Die Nutzenpotentiale sind aufgrund der Beschaffenheit und der Marktstellung der verarbeiteten Stoffe zwar nicht so groß wie in der Fertigungsindustrie, jedoch konnten einige Anwendungen beschrieben werden. Dazu zählen die Verfolgbarkeit von Stoffen durch einen kontinuierlich arbeitenden verfahrenstechnischen Prozess in Verbindung mit der Dokumentation von Produktqualitätsdaten im Verlauf der Produktion.

Abschließend ist anzumerken, dass das beschriebene Konzept zwar an einem speziellen Anwendungsfall entworfen wurde, die zugrunde liegende Vorgehensweise, das konzeptuelle Datenmodell, die Traceability-Berechnungen und das Prinzip der Softsensoren jedoch auch auf andere kontinuierliche Produktionsprozesse angewandt werden können, sofern sie die Anforderungen an den in Kapitel 4.1 definierten Geltungsbereich erfüllen.

7.2 AUSBLICK

Es sind mehrere Ansätze denkbar, um das vorgestellte Konzept weiterzuentwickeln. Sie beziehen sich vorrangig auf die getroffenen Einschränkungen des Geltungsbereichs und die Datenverfügbarkeit.

Bisher erstreckt sich das digitale Produktabbild lediglich auf die Produktlebenszyklusphase der Herstellung. Um ein umfassenderes Abbild eines Produkts zu erhalten, kann in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden, wie auch die Produktentstehungsphase (Entwurfsphase) mit einbezogen werden kann. Mutmaßlich wird hierfür ein Bezug zu einem digitalen Anlagenmodell herzustellen sein, da ein verfahrenstechnisches Produkt nicht unabhängig vom Produktionsprozess beschreibbar ist. Die Vernetzung einer entsprechenden Lösung mit einem PLM wird hierbei in vielen Fällen erforderlich sein.

Die Ausweitung des Betrachtungsbereichs über die Unternehmensgrenzen hinweg würde die Zusammenarbeit zwischen Kunden und Lieferanten transparenter gestalten. Das digitale Produktabbild könnte insofern erweitert werden, dass etwa dezentrale Datenbanktechnologien genutzt werden, um alle Teilnehmer der Wertschöpfungskette zu vernetzen und allen Anspruchsgruppen die Produktinformationen zugänglich zu machen. Hierfür könnte etwa auf Blockchain- oder Tangle-basierte Lösungen zurückgegriffen werden.

In Bezug auf das betrachtete Unternehmen sollen schließlich noch einige Empfehlungen gegeben werden, um den Nutzen des Konzepts zu erhöhen. Zuerst wäre es vorteilhaft, wenn die prototypische Lösung in eine softwaretechnische Umsetzung innerhalb des PIMS überführt würde. Auf diese Weise sind eine erweiterte Datenhaltung und auch die Zugangskontrolle zu den Daten möglich. Darüber hinaus wäre die Nachrüstung weiterer Prozesssensoren der Genauigkeit der Produktverfolgung zuträglich, da dann auf Annahmewerte verzichtet werden könnte. Schließlich kann die weitere Integration der vorhandenen IT-Systeme durch Ausnutzung der verfügbaren Schnittstellen ermöglichen, die Daten aller beteiligten Systeme an einem Punkt – zum Beispiel dem PIMS – zu aggregieren und so eine umfassendere Datennutzung zu erlauben.

LITERATURVERZEICHNIS

- Bauernhansl, Thomas; Krüger, Jörg; Reinhart, Gunther; Schuh, Günther (2016): WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Hg. v. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP). Darmstadt. Online verfügbar unter https://www.ipa.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2016-06-23_der-wgp-standpunkt-industrie-4-0.html.
- Beplate-Haarstrich, Lutz (2007): Entwicklung eines Korndummies zur direkten Markierung von Getreide mittels Radiofrequenzidentifikation (RFID) als technische Möglichkeit zur Rückverfolgung. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen. Fakultät für Agrarwissenschaften.
- DIN EN 62424:2010, 2010-01: Darstellung von Aufgaben der Prozessleittechnik – Fließbilder und Datenaustausch zwischen EDV-Werkzeugen zur Fließbilderstellung und CAE-Systemen (IEC 62424:2008); Deutsche Fassung EN 62424:2009.
- Europäische Union (2002): Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2002 zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festlegung von Verfahren zur Lebensmittelsicherheit. VO EU 178/2002. In: *Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.)* (L 31), S. 1–24, zuletzt geprüft am 04.08.2018.
- Graef, Norbert (2016): Industrie 4.0-Gesamtkonzept. Zusammenspiel von intelligenten Infrastrukturen, Paradigmen und technologischen Komponenten. In: Armin Roth (Hg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin Heidelberg: Springer Gabler, S. 73–82.
- Grieves, Michael; Vickers, John (2017): Digital Twin. Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Franz-Josef Kahlen, Shannon Flumerfelt und Anabela Alves (Hg.): *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. New Findings and Approaches*. Basel: Springer International Publishing, S. 85–114.
- Gronau, Norbert (2018): Enterprise Resource Planning-System. In: Norbert Gronau, Jörg Becker, Natalia Kliewer, Jan Marco Leimeister und Sven Overhage (Hg.): *Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik*. Online-Lexikon. Berlin: GITO. Online verfügbar unter <http://www.encyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de>, zuletzt geprüft am 17.08.2018.
- Grösser, Stefan (2018): Digitaler Zwilling. Hg. v. Springer Gabler (Gabler Wirtschaftslexikon). Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitaler-zwilling-54371/version-277410>, zuletzt aktualisiert am 19.02.2018, zuletzt geprüft am 03.07.2018.
- Heimbold, Tilo (2015): Einführung in die Automatisierungstechnik. Automatisierungssysteme, Komponenten, Projektierung und Planung. München: Carl Hanser.
- Hemming, Werner; Wagner, Walter (2008): Verfahrenstechnik. 10. Auflage. Würzburg: Vogel.

- Himmel (Hg.) (2016): Gorator Nasszerkleinerungssysteme. hoelschertechnik-gorator. Online verfügbar unter http://www.himmelinfo.de/wp-includes/images/content/download/de/gorator/nasszerkleinerungssysteme/broschuere_gorator_hoelscher_12seiter_digital_20160620.pdf, zuletzt aktualisiert am 20.06.2016, zuletzt geprüft am 07.04.2018.
- Huber, Walter (2016): Industrie 4.0 in der Automobilproduktion. Ein Praxisbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Ignatowitz, Eckhard; Fastert, Gerhard (2011): Chemietechnik. 10. Auflage. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel.
- Intern (2017): Werkspräsentation. Internes Dokument des Unternehmens.
- Intern (2018a): Prozessaufnahme mit dem Prozessverantwortlichen. Interviewmaterial vom 09.04.-20.04.2018. Durchgeführt am Unternehmensstandort.
- Intern (2018b): R&I-Flussdiagramme der Anlagendokumentation. Internes Dokument des Unternehmens.
- Kagermann, Henning; Lukas, Wolf-Dieter (2011): Industrie 4.0. Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. Hg. v. VDI Verlag. Online verfügbar unter <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>, zuletzt aktualisiert am 01.04.2011, zuletzt geprüft am 13.07.2018.
- Kagermann, Henning; Wahlster, Wolfgang; Helbig, Johannes (Hg.) (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. acatech. München.
- Kessler, Rudolf W. (2006): Strategien für wissensbasierte Produkte und Verfahren. In: Rudolf W. Kessler (Hg.): Prozessanalytik. Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis. Weinheim: Wiley-VCH, S. 3–23.
- Kirsch, Burghard; Odenthal, Alois (1999): Fachkunde Müllereitechnologie - Werkstoffkunde. 4. Auflage. München: Bayerischer Müllerbund.
- Kölbel, Herbert; Schulze, Joachim (1967): Fertigungsvorbereitung in der Chemischen Industrie. Wiesbaden: Gabler.
- Kuhn, Thomas (2017): Digitaler Zwilling. Hg. v. Gesellschaft für Informatik. Online verfügbar unter <https://gi.de/informatiklexikon/digitaler-zwilling/>, zuletzt aktualisiert am 02.11.2017, zuletzt geprüft am 03.07.2018.
- Kvarnström, Björn (2008): Traceability Methods for Continuous Processes. Licentiate Thesis. Luleå University of Technology. Department of Business Administration and Social Sciences.
- Kvarnström, Björn; Bergquist, Bjarne (2011): Improving traceability in continuous processes using flow simulations. In: *Production Planning & Control* 23 (5), S. 396–404. DOI: 10.1080/09537287.2011.561813.

- Lanninger, Volker; Wendt, Oliver (2012): Customizing von Standardsoftware. Online verfügbar unter <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/is-management/Einsatz-von-Standardanwendungssoftware/Customizing-von-Standardsoftware>, zuletzt aktualisiert am 23.10.2012, zuletzt geprüft am 16.08.2018.
- Lanninger, Volker; Wendt, Oliver (2018): Erweiterungsprogrammierung. In: Norbert Gronau, Jörg Becker, Natalia Kliewer, Jan Marco Leimeister und Sven Overhage (Hg.): Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik. Online-Lexikon. Berlin: GITO. Online verfügbar unter <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de>, zuletzt geprüft am 16.08.2018.
- Lottspeich, Friedrich; Zorbas, Haralabos (Hg.) (1998): Bioanalytik. Heidelberg: Spektrum (Spektrum Lehrbuch).
- Maurer, Michael (2012): Anforderungen an ein modernes Prozessleitsystem (PLS). In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Michael Beckmann (Hg.): Energie aus Abfall. Band 9. Neuruppin: TK-Verlag, S. 271–290.
- Meudt, Tobias; Pohl, Malte; Metternich, Joachim (2017): Die Automatisierungspyramide - Ein Literaturüberblick. Studienarbeit. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Center für industrielle Produktivität (CiP).
- Mönch, Lars (2018): Manufacturing Execution System. In: Norbert Gronau, Jörg Becker, Natalia Kliewer, Jan Marco Leimeister und Sven Overhage (Hg.): Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik. Online-Lexikon. Berlin: GITO. Online verfügbar unter <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de>, zuletzt geprüft am 17.08.2018.
- Müller, Gerhard (Hg.) (1992): Lexikon Technologie. Metallverarbeitende Industrie. 2. Auflage. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel (Bibliothek des Technikers).
- Panetta, Kasey (2017): Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2018. Hg. v. Gartner (Smarter With Gartner). Online verfügbar unter <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018/>, zuletzt aktualisiert am 03.10.2017, zuletzt geprüft am 16.07.2018.
- Pötter, Thorsten; Folmer, Jens; Vogel-Heuser, Birgit (2017): Enabling Industrie 4.0 - Chancen und Nutzen für die Prozessindustrie. In: Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl und Michael ten Hompel (Hg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4. Allgemeine Grundlagen. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg (Springer Reference Technik), S. 69–81.
- DIN EN ISO 9001:2005, 2005-12: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe.
- Roth, Armin (Hg.) (2016): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin Heidelberg: Springer Gabler.

- Schaudel, D.; Urbas, Leon; Tauchnitz, Thomas; Früh, K. F. (Hg.) (2018): Handbuch der Prozessautomatisierung. Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen. DIV Deutscher Industrieverlag. 6. Auflage. Essen: DIV Deutscher Industrieverlag.
- Schemm, Jan Werner (2009): Zwischenbetriebliches Stammdatenmanagement. Lösungen für die Datensynchronisation zwischen Handel und Konsumgüterindustrie. Berlin Heidelberg: Springer.
- Schenk, Michael; Wirth, Siegfried; Müller, Egon (2014): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.
- Schönsleben, Paul (2016): Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Schuh, Günther (2018): PLM (Product Lifecycle Management). In: Norbert Gronau, Jörg Becker, Natalia Kliewer, Jan Marco Leimeister und Sven Overhage (Hg.): Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik. Online-Lexikon. Berlin: GITO. Online verfügbar unter <http://www.encyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de>, zuletzt geprüft am 19.08.2018.
- Schulte, Mark Alexander (2018): Digitaler Zwilling. Was ist dran am Digital-Twin-Hype? Hg. v. IDG Business Media (Computerwoche). Online verfügbar unter <https://www.computerwoche.de/a/was-ist-dran-am-digital-twin-hype,3545308>, zuletzt aktualisiert am 27.06.2018, zuletzt geprüft am 03.07.2018.
- Siepmann, David (2016a): Industrie 4.0 - Grundlagen und Gesamtzusammenhang. In: Armin Roth (Hg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin Heidelberg: Springer Gabler, S. 16–34.
- Siepmann, David (2016b): Industrie 4.0 - Technologische Komponenten. In: Armin Roth (Hg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin Heidelberg: Springer Gabler, S. 47–72.
- Stelzer, Ralph (2018): Produktdatenmanagement. In: Norbert Gronau, Jörg Becker, Natalia Kliewer, Jan Marco Leimeister und Sven Overhage (Hg.): Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik. Online-Lexikon. Berlin: GITO. Online verfügbar unter <http://www.encyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de>, zuletzt geprüft am 19.08.2018.
- Thommen, Jean-Paul (2018): Anspruchsgruppen. Hg. v. Springer Gabler (Gabler Wirtschaftslexikon). Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/anspruchsgruppen-27010/version-250673>, zuletzt aktualisiert am 14.02.2018, zuletzt geprüft am 07.08.2018.
- Vahrenkamp, Richard; Siepermann, Christoph (2008): Produktionsmanagement. 6. Auflage. München: De Gruyter.
- Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (Hg.) (2017): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2. Automatisierung. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg (Springer Reference Technik).

- Wächter, Michael (2011): Chemielabor. Einführung in die Laborpraxis. Weinheim: Wiley-VCH.
- Weckenmann, Albert; Dietlmaier, Adrian; Akkasoglu, Gökhan (2014): Qualitätssicherung und Traceability in der Montage. In: Klaus Feldmann, Volker Schöppner und Günter Spur (Hg.): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. 2. Auflage. München: Hanser (Edition Handbuch der Fertigungstechnik), S. 834–856.
- Yang, Gang (2005): Produktionsplanung in komplexen Wertschöpfungsnetzwerken. Ein integrierter hierarchischer Ansatz in der chemischen Industrie. Zugl.: Berlin, Technische Universität, Dissertation, 2004. Wiesbaden: DUV (Gabler Edition Wissenschaft).
- ZVEI (Hg.) (2010): Manufacturing Execution Systems (MES). Branchenspezifische Anforderungen und herstellernerneutrale Beschreibung von Lösungen. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, Fachverband Automation. Frankfurt.

ANHANG

A.1 VERGLEICH VON KONTINUIERLICHEM UND DISKONTINUIERLICHEM PROZESS

Eigenschaft	Kontinuierlich	Diskontinuierlich
Investitionskosten	Hoch	Niedrig bis mittel
Automatisierungsgrad	Sehr hoch	Niedrig bis mittel
Flexibilität bzgl. Variationsbreite	Niedrig	Hoch
Verweil-/Reaktionszeit pro Stufe	Niedrig	Hoch
Durchsatzmengen	Hoch bis sehr hoch	Gering bis mittel

Tabelle A-1: Vergleich von kontinuierlichem und diskontinuierlichem Prozess

Quelle: In Anlehnung an (Schenk et al. 2014, S. 685)

A.2 NOTATIONSELEMENTE DES PROZESSMODELLS

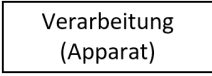
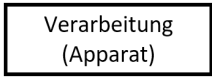
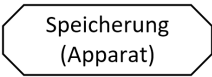

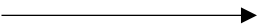


Notation	Bedeutung
	Verarbeitung
	Verarbeitung (Beginn einer Prozessstufe)
	Speicherung/Lagerung
	Hauptproduktfluss (1.0 pt.)
	Untergeordneter Stofffluss (0.25 pt.)
	Messtelle (einfach und zusammengefasst)
	Signalverbindung

Tabelle A-2: Vollständige Notationselemente des Prozessmodells

A.3 GEGENÜBERSTELLUNG VON FERTIGUNGS- UND PROZESSINDUSTRIE

Eigenschaft	Fertigungsindustrie	Prozessindustrie
Materialart	Stückgut	Fließ-/Schüttgut, Gas
Produktionstyp	Diskrete Fertigung	Prozessfertigung
Produktionsart	Losgrößenproduktion	Chargenproduktion und kontinuierliche Produktion
Produktstruktur	Stücklisten	Rezepturen, Formeln
Produktstruktur-Konvergenz	Konvergierend (Baumstruktur)	Divergierend (umgekehrte Baumstruktur)
Materialeinsatz, erforderliche Ressourcen	Komponenten, Bauteile, Hilfsstoffe, Energie	Rohstoffe, Vorprodukte, Hilfsstoffe, Energie
Aktionen vor Verarbeitungsstart	Transportieren, Messen, Lagern	Transportieren, Wiegen, Lagern
Verarbeitungsarten (Transformationsarten)	Stoffumformung (Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten)	Stoffumwandlung, -aufbereitung und -gewinnung (mechanisch bzw. physikalisch, thermisch, chemisch, elektrisch, biologisch, kombiniert)
Transport	Handhaben, Fördern, Umschlagen, Kommissionieren	Pumpen, Schwerkraftförderung, Stetig-/Gurtband-/Schneckenförderung
Speicherung/Lagerung	Behälter, Regale, Freiflächen	(Druck-)Behälter, Tanks, Silos
Arbeitsanweisungen	montage-, handhab- und qualitätssichernde Anweisungen	z.B. Dosier-, Wiege-, Rühr-, Filter-, Mahl-Anweisungen
Ersetzbarkeit manueller Tätigkeiten durch Mechanisierung	meist möglich	eingeschränkt, prozessabhängig
Durchführung qualitätssichernder Maßnahmen	jederzeit	prozessabhängig
Fertigungsdauer	genau definiert	prozessabhängig
Unterbrechung des Fertigungsprozesses	jederzeit möglich, meist ohne Nachteile	prozessabhängig
Produktfolge	meist problemlos	eingeschränkt
Lagerfähigkeit der Zwischen- & Fertigprodukte	meist problemlos	eingeschränkt
Folgen bei Qualitätsmängeln	bezieht sich meist nur auf einen Teil der Fertigung	gesamte Charge fehlerhaft, hohe Entsorgungskosten
Anlagenkosten	abhängig vom Mechanisierungsgrad	abhängig vom Prozess

Tabelle A-3: Unterschiede zwischen Fertigungs- und Prozessindustrie

Quelle: In Anlehnung an (Vahrenkamp und Siepermann 2008, S. 87), (Schenk et al. 2014, S. 681, 687, 689), (Graef 2016, S. 75)

A.4 GENERISCHES KONZEPTUELLES DATENMODELL

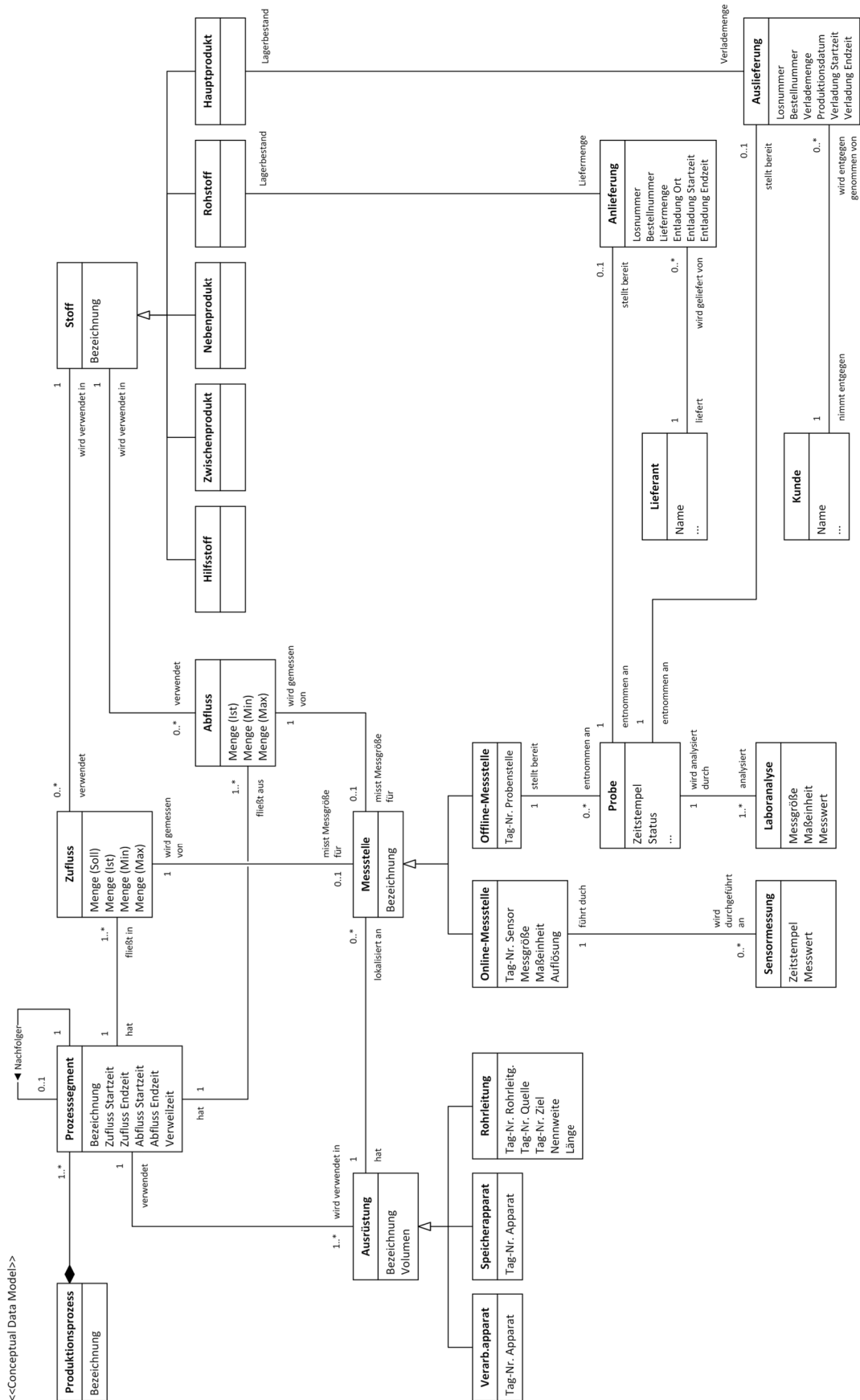


Abbildung A-1: Generisches konzeptuelles Datenmodell

SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig, ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift Mike Richter