

Abschlussbericht

Prozess 4.0 Ultraeffizienz und Digitalisierung Teil 4: Ressourceneffizienz durch Digitalisierung in der Prozessindustrie

von

Anto Jurisic, Dieter Stapf
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Technische Chemie

Nirvana Delgado Otalvaro, Karla Herrera Delgado, Jörg Sauer
Institut für Katalyseforschung und -technologie

Michael Klumpp, Roland Dittmeyer
Institut für Mikroverfahrenstechnik

Förderkennzeichen: L7518004

Laufzeit: 01.02.2018 – 31.01.2019

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

Oktober 2019



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhalt

1. Einleitung	4
2. Bestandsaufnahme Digitalisierungsthemen	5
2.1. <i>Struktur, Digitalisierungsthemen und Begrifflichkeiten</i>	5
2.1.1. Digitale Technologien	5
2.1.2. Geschäftsprozesse	6
2.1.3. Ressourcen	6
2.1.4. Digitale Werkzeuge	6
2.2. <i>Methodik zur Bestandsaufnahme von Digitalisierungsthemen</i>	6
2.2.1. Experteninterviews	7
2.2.2. Literaturrecherche	8
2.3. <i>Auswertung</i>	9
2.3.1. Experteninterviews	9
2.3.2. Literaturrecherche	15
3. Bewertungsmethodik für Ressourceneffizienzpotenzial durch Digitalisierung	17
3.1. <i>Literaturrecherche</i>	17
3.2. <i>Stoffflussanalyse</i>	17
3.3. <i>Bilanzen und Indikatorberechnung</i>	18
3.3.1. Massenbilanz / Ressourceneffizienz	18
3.3.2. Energiebilanz / Energieeffizienz	18
3.3.3. Energiebilanz / Exergieeffizienz	19
3.3.4. Kohlenstoffbilanz / Klimaeffizienz	19
4. Prozesssimulation und Anwendung auf beispielhafte Industrieprozesse	19
4.1. <i>Beispiel 1: Herstellungsverfahren in der Zementindustrie</i>	20
4.1.1. Prozessmodellierung mithilfe von Simulationswerkzeugen	20
4.2. <i>Beispiel 2: Chemische Industrie – Der bioliq®-Prozess</i>	22
4.2.1. Prozessmodellierung mit Hilfe von Simulationswerkzeugen	22
5. Prozessbewertung / Optimierung durch Prozesssimulation	23
5.1. <i>Beispiel 1: Herstellungsverfahren in der Zementindustrie</i>	23
5.2. <i>Beispiel 2: Der bioliq®- Prozess</i>	26
5.3. <i>Indikative Übertragung des Einsparungspotentials mittels Hochrechnung</i>	27
6. Zusammenfassung der Projektergebnisse	29
7. Allgemeines Literaturverzeichnis	31
Anhang	33
A. <i>Aufgeschlüsselte relative Häufigkeit: Herausforderungen und Limitierungen</i>	33
B. <i>Aufgeschlüsselte relative Häufigkeit: Geplante digitale Technologien und Werkzeuge</i>	33
C. <i>Zusätzliche Beispiele aus dem Experteninterviews</i>	34
D. <i>Anwendungsbeispiele</i>	35
E. <i>Relative Häufigkeit der Nennungen: Digitale Technologien</i>	53
F. <i>Relative Häufigkeit der Nennungen: Geschäftsfelder</i>	53
G. <i>Relative Häufigkeit der Nennungen: Ressourcen</i>	54
H. <i>Zusätzliche Literaturbeispiele</i>	54
I. <i>Schematische Darstellung der Durchführung einer Stoffflussanalyse</i>	57
J. <i>Beschreibung der modellierten Prozesse (Zementindustrie)</i>	58

K.	<i>Beispielprozess 1: Herstellungsverfahren in der Zementindustrie</i>	<i>61</i>
L.	<i>Leitsystem bioliq - Digitalisierung</i>	<i>65</i>
M.	<i>Indikatorenauswertung (Zementindustrie)</i>	<i>66</i>
N.	<i>Beispielprozess 2: Der bioliq®- Prozess</i>	<i>68</i>

1. Einleitung

Die Prozessindustrie mit ihrer besonderen Ressourcenrelevanz ist charakterisiert durch komplex vernetzte, kapitalintensive Produktionsanlagen, die schon heute zum Zwecke der Steuerung von Qualität, Umsatz und Ausbeute einen beispielhaft hohen Automatisierungsgrad aufweisen. Damit ergibt sich ein hohes Potential für Digitalisierungsansätze in der Produktionsoptimierung, in der Vernetzung von (unternehmensübergreifenden) Wertschöpfungsketten, aber auch in Forschung- und Entwicklung sowie der Ausbildung. Die Auswirkungen beim Übergang von der heutigen Produktion in eine Prozessindustrie 4.0 auf den Ressourcenverbrauch und die damit verbundenen Chancen wurden bisher noch nicht systematisch betrachtet. Dieses Projekt hat deshalb zur Aufgabe, die Zusammenhänge zwischen Ressourceneffizienz und Digitalisierung für die Prozessindustrie in Baden-Württemberg aufzuzeigen, die zu erwartenden Auswirkungen von vielfältigen Digitalisierungsmaßnahmen auf den Ressourcenverbrauch der Produktion strukturiert und übersichtlich zu quantifizieren und damit für Entscheidungsträger und Öffentlichkeit eine Transparenz zu ermöglichen, die die Auswahl geeigneter Implementierungsstrategien zur Sicherstellung eines geringeren Ressourcenverbrauchs und einer nachhaltigeren Produktion durch Digitalisierung unterstützt. Synergetisch werden zusätzliche Aufgabenstellungen für die ULTRAEFFIZIENZFABRIK erwartet. Zusammen mit den anderen Teilprojekten des Verbundvorhabens wird damit eine umfassende Betrachtung des industriellen Sektors erreicht. Dieses Teilprojekt fokussiert dabei auf die Prozessindustrie.

Die meisten Studien zu Digitalisierung und „Industrie 4.0“ zielen bisher auf die Fertigungsindustrie ab, wie beispielsweise die des VDI Zentrums Ressourceneffizienz [1].

In Ergänzung aktueller Übersichten wie beispielsweise der VCI-Deloitte-Studie [2] liegt hier der Schwerpunkt auf einer strukturierten Transparenz der Digitalisierungsthemen sowie quantitativen Aussagen zu Potentialen.

Im Einzelnen werden im Teilprojekt Prozess 4.0 eine Studie zur Bedeutung einzelner Digitalisierungsthemen für die Ressourceneffizienz in der Prozessindustrie erarbeitet (Kapitel 2), basierend auf einem einheitlichen Indikatorsatz (Kapitel 3) die Auswirkungen von Digitalen Technologien der Produktion auf die Ressourceneffizienz anhand von Fallstudien quantifiziert (Kapitel 4), und Hauptaussagen zur Ressourceneffizienz durch Digitalisierung in der Prozessindustrie im Sinne der Projektzielsetzung abgeleitet (Kapitel 5). Der Bericht enthält einen detaillierten Anhang zum Nachvollziehen der Vorgehensweise und der Ergebnisse.

2. Bestandsaufnahme Digitalisierungsthemen

In diesem Abschnitt werden Status und Perspektiven der Digitalisierung in der Prozessindustrie erarbeitet, sowie die zugrundeliegenden Begrifflichkeiten einheitlich definiert. Dies erfolgte durch Recherche, durch das Einbringen eigener Expertise und insbesondere durch strukturierte Experteninterviews mit Unternehmensvertretern von Kleinen- und mittleren Unternehmen (KMU), der Großindustrie, sowie aus der Forschung.

2.1. Struktur, Digitalisierungsthemen und Begrifflichkeiten

Im Rahmen dieses Projekts werden die Digitalisierungsthemen in vier Hauptelementen strukturiert (Abbildung 1). Für die Behandlung von Digitalisierungsthemen wurde im Rahmen dieses Projektes untersucht, welche *digitale Technologien* und *Werkzeuge* in den verschiedenen *Geschäftsprozessen* eingesetzt werden und welchen Einfluss diese auf *Ressourceneffizienz* ausüben. Diese vier Elemente werden im Folgenden beschrieben.



Abbildung 1: Hauptelemente zur Gliederung von Digitalisierungsthemen

2.1.1. Digitale Technologien

In Anlehnung an öffentliche Studien zum Thema Digitalisierung wurde eine Vorauswahl der für die Prozessindustrie relevantesten digitalen Technologien getroffen. Diese beinhaltet folgende Technologien:

- **Automatisierung:** Eine oder mehrere Einrichtungen sind so ausgerüstet, dass sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeitet [3].
- **Intelligente Steuerungskonzepte:** Konzepte für vorausschauende, adaptive, robuste fortgeschrittene Regelungstechnik und Realisierung von Self-X-Fähigkeiten wie z.B. Selbstdiagnose, Selbstkonfiguration oder Selbstheilung [4].
- **Big Data Analyse:** Big Data Analyse umfasst Methoden zur Erfassung, Speicherung, Verwaltung und Analyse von komplexen Datenbeständen aus unterschiedlichen Quellen.
- **3D-Druck:** Drucktechnologien der additiven Fertigung
- **Industrielles Internet der Dinge:** Sammelbegriff für Technologien einer globalen Infrastruktur der Informationsgesellschaften, die es ermöglicht, physische und virtuelle Gegenstände miteinander zu vernetzen und sie durch Informations- und Kommunikationstechniken zusammenarbeiten zu lassen [5].
- **Modellierung und Simulation:** Modellierung bezeichnet die vereinfachte Beschreibung eines wirklichen Systems. Modelle werden zur Abbildung und zum Verständnis der natürlichen Realität verwendet und sind in vielerlei Hinsicht von Nutzen. Simulation bezeichnet die Anwendung von Modellen zum Zwecke der Datenerzeugung mit Hilfe der Modellstruktur, z.B. zur Validierung oder zur Vorhersage der Systemreaktion [6].
- **Digital Plant:** Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen und Methoden unter anderem der Simulation und 3D-Visualisierung. Ihr Zweck ist die ganzheitliche Planung, Realisierung, Steuerung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Fabrikprozesse in Verbindung mit dem Produkt [7].

- **Digitale Produktionsdienstleistungen:** Zu den digitalen Produktionsdienstleistungen zählen beispielsweise cloud working, social media, smart services und weitere Technologien, die einer stärkeren horizontalen und vertikalen Integration dienen.

2.1.2. Geschäftsprozesse

Folgende ausgewählte Geschäftsprozesse der deutschen Prozessindustrie im Hinblick auf Industrie 4.0 werden in dieser Studie betrachtet:

- Forschung und Entwicklung
- Produktion
- Wertschöpfungsketten und Netzwerke (Supply-Chain)
- Schulung und Ausbildung

2.1.3. Ressourcen

Für die Bewertung der digitalen Technologien hinsichtlich Ressourceneffizienz werden im Rahmen dieses Projektes die für die Prozessindustrie die nachfolgenden relevantesten Ressourcen berücksichtigt:

- Rohstoff
- Hilfsstoff
- Energieträger
- Verfügbare Anlage
- Spezifische Abschreibung
- In der Wertschöpfungskette gebundenes Kapital
- Personal
- Entwicklungskosten
- Investitionsmittel
- Wartungs- und Instandhaltungskosten
- Einkaufs- und Vertriebskosten
- Entsorgungskosten

2.1.4. Digitale Werkzeuge

Als digitale Werkzeuge werden hier jene bezeichnet, die für die Realisierung und Einsetzung der digitalen Technologien notwendig sind. Beispielhafte digitale Werkzeuge sind:

- Betriebsinformationssystem
- Cloud
- Digitaler Zwilling
- Drohnen
- Energiemanagement-System
- Enterprise-Resource-Planning (ERP)-System
- Labor-Informations- und Management-System (LIMS)
- Manufacturing Execution System (MES)
- Sensoren
- Simulationssoftware
- Soft-Sensoren

2.2. Methodik zur Bestandsaufnahme von Digitalisierungsthemen

Das methodische Vorgehen für die Bestandsaufnahme von Digitalisierungsthemen ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Nach der Definition der Projektstruktur (s. Abschnitt 2.1) wurden Experteninterviews und eine systematische Literaturrecherche durchgeführt.

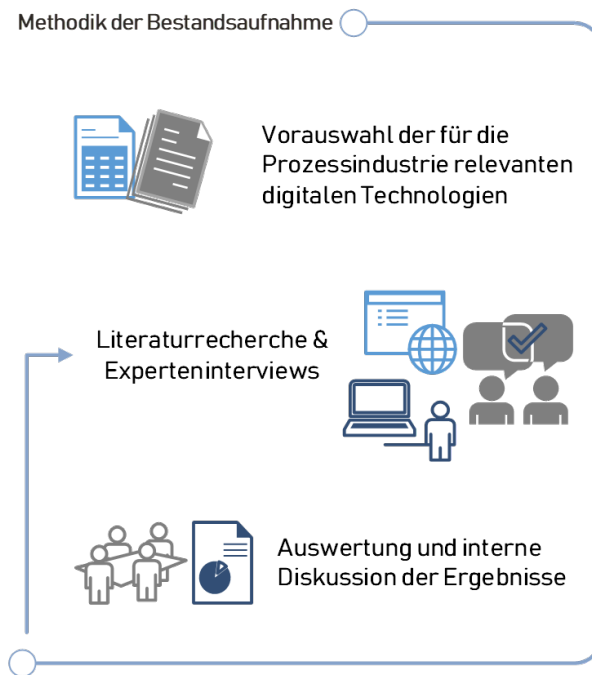


Abbildung 2: Methodik der Bestandsaufnahme von Digitalisierungsthemen

2.2.1. Experteninterviews

Mit dem Ziel den Status und die Perspektiven der Digitalisierung in der Prozessindustrie zu erarbeiten, wurden im Rahmen des Projektes Experteninterviews mit Unternehmensvertretern der Großindustrie, von KMU und von Forschungseinrichtungen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde einen Fragebogen erstellt, der als Leitpfaden für strukturierte Gespräche diente. Dieser gliedert sich in 2 Teile: allgemeine Fragen zum Einsatz von digitalen Technologien und Fragen, die sich auf ein spezifisches Beispiel (best practices) beziehen.

Fragebogen für ein produzierendes Unternehmen

Allgemein:

- Ist einer der vorausgewählten digitalen Technologien bereits im Einsatz und wenn ja, in welchem Geschäftsfeld?
- Ist eine weitere Technologie der Digitalisierung vertreten?
Wenn ja, welche?
- Was sind die Herausforderungen / Limitierungen beim Einsatz von digitalen Technologien?
- Ist der Einsatz einer oder mehrerer digitaler Technologien geplant? Wenn ja, welche?

Spezifisch:

- Können Sie ein spezifisches Beispiel zum Einsatz von digitalen Technologien nennen?
- Was war die Motivation für den Einsatz (in Bezug auf Ressourceneffizienz)?
- Welche Ressourcen werden eingespart?
- Wie groß ist das Einsparungspotenzial? Gibt es einen Business-Case?
Wie hoch ist der Reifegrad der ausgewählten Technologie gemäß
- Abbildung 3?

Für die nicht-produzierenden Unternehmen wie z.B. Dienstleister, Consulting-Unternehmen, usw. wurde der Fragebogen wie folgt angepasst:

Fragebogen für ein nicht-produzierendes Unternehmen

Allgemein:

- Welche der folgenden digitalen Technologien sind in der chemischen Industrie und angrenzenden Industriezweigen am meisten vertreten und in welchem Geschäftsfeld?
- Ist eine weitere Technologie der Digitalisierung vertreten?
Wenn ja, welche?
- Was sind die Herausforderungen / Limitierungen beim Einsatz von digitalen Technologien?
- Welche der digitalen Technologien werden sich Ihrer Meinung nach zukünftig durchsetzen?
Und wann?

Spezifisch:

- Können Sie ein spezifisches Beispiel zum Einsatz von digitalen Technologien nennen?
- Was war die Motivation für den Einsatz (in Bezug auf Ressourceneffizienz)?
- Welche Ressourcen werden eingespart?
- Wie groß ist das Einsparungspotenzial? Gibt es einen Business-Case?
Wie hoch ist der Reifegrad der ausgewählten Technologie gemäß
- Abbildung 3?



Abbildung 3: Technologiereifegrad (eigene Darstellung in Anlehnung an [8])

Nach der ersten Kontaktaufnahme und der Terminvereinbarung wurde dem jeweiligen Interviewpartner der Fragebogen zur Vorbereitung versendet. Die Gespräche wurden telefonisch und/oder persönlich durchgeführt und für die anschließende Auswertung protokolliert. Anschließend wurde eine zweistufige strukturierte Inhaltsanalyse durchgeführt. Hierbei wurden zunächst die Interviews inhaltlich strukturiert basierend auf den Themen des Fragebogens und der Projektstruktur. Darauf folgend wurden die Antworten jeder Frage kodiert, um die qualitative und quantitative Auswertung und Interpretation der Aussagen zu ermöglichen.

2.2.2. Literaturrecherche

Die Literatursuche diente der Konsolidierung von „best practices“ aus der Prozessindustrie. Der Fokus hierbei wurde auf Pressemitteilungen, Beiträge auf Homepages und Publikationen von Unternehmen der Prozessindustrie und angrenzender Industriezweige gelegt. Für die Recherche

wurden verschiedenen Wortkombinationen verwendet, welche die Schlüsselkomponenten der Projektstruktur beinhalteten, beispielsweise:

- Digitale Technologie
- Digitale Technologie + „Chemische Industrie“
- Digitale Technologie + „Ressourceneffizienz“
- Digitale Technologie + „Ressourceneffizienz“ + „Anwendungsbeispiel“ + „Chemische Industrie“.

Für die strukturierte Auswertung der Anwendungsbeispiele wurden diese tabelliert und folgende Hauptinformationen (falls gegeben) extrahiert:

- Verwendete digitale Technologien und Werkzeuge
- Geschäftsfeld auf dem die Technologien eingesetzt wurden
- Ressourcen, die im Beispiel eingespart wurden
- Umfang der Ressourceneinsparung.

2.3. Auswertung

2.3.1. Experteninterviews

Insgesamt wurden 14 Experteninterviews mit Vertretern aus den folgenden Unternehmen durchgeführt:

- Bayer AG
- BASF SE (Produktion),
- BASF SE (Innovative and Prototype Solutions)
- Boston Consulting Group (BCG)
- Celitement GmbH
- CHT-Gruppe
- ci-tec GmbH
- Clariant AG
- EDI GmbH
- EnBW Energie Baden-Württemberg AG
- Evonik Industries AG
- KIT bioliq®-Projekt (Produktion - Demonstrationsanlage)
- SGL Carbon SE
- Roche Diagnostics GmbH.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse in den Hauptelementen Digitale Technologien, Geschäftsprozesse und Ressourcen findet sich in den Anhängen D, E und F.

Frage 1: Ist einer der folgenden digitalen Technologien bereits im Einsatz und wenn ja, in welchem Geschäftsfeld?

Die Antworten zu dieser Frage wurden in einer Matrix zusammengefasst (Abbildung 4). Die befragten Experten haben berichtet, welche der genannten Technologien im Einsatz sind und in welchen Geschäftsprozessen. Die Werte in der Matrix stellen die Anzahl der Nennungen für jede Kombination Technologie-Geschäftsfeld dar. Bspw: 8 der Befragten haben berichtet, Technologien der Automatisierung und intelligente Steuerungskonzepte in der Forschung und Entwicklung zu verwenden.

Digitale Technologien	Geschäftsfelder				Gesamt
	Forschung und Entwicklung	Produktion	Wertschöpfungsketten und Netzwerke	Schulung und Ausbildung	
Automatisierung und Intelligente Steuerungskonzepte	8	14	6	5	33
Big Data Analyse	9	8	5	1	23
3D-Druck	7	6	4	1	18
Internet der Dinge	6	4	4	1	15
Modellierung, Simulation	11	9	8	7	35
Digital Plant	4	6	2	4	16
Digitale Produktionsdienstleistungen	6	8	5	1	20
Gesamt	51	55	34	20	



Abbildung 4: Gegenüberstellung digitaler Technologien und Geschäftsfelder

Die Ableitung von statistisch repräsentativen Indikatoren ist aufgrund der relativ niedrigen Anzahl von Interviews nicht zulässig. Jedoch haben sich zwischen den Befragten Trends aufgezeigt, welche im Folgenden beschrieben werden.

Mit insgesamt 55 Nennungen ist die „Produktion“ das Geschäftsfeld mit der größten Anzahl an Anwendungen der digitalen Technologien. „Die Digitalisierung wird in der chemischen Industrie seit mehreren Jahrzehnten praktiziert“ berichtet einer der befragten Experten. Auch das Feld der Forschung und Entwicklung ist mit insgesamt 51 Nennungen stark geprägt. Der Einsatz von digitalen Technologien ist zwischen den Befragten in den Geschäftsfeldern „Wertschöpfungsketten und Netzwerke“ und „Schulung und Ausbildung“ mit jeweils 34 und 20 Anwendungen, nicht so stark ausgeprägt. Dazu haben Experten folgendes berichtet:

- „Einheiten betrachten sich sehr individuell und nicht als Ganzes“
- „Die Anwendung von digitalen Technologien in der Supply-Chain ist geplant aber gegenwärtig noch zögerlich“.
- „Daten aus der gesamten Prozesskette werden zunehmend genutzt“
- „Die Anwendung von digitalen Technologien für die Schulung und Ausbildung wird erwartet aber nicht systematisch gemacht“
- „Schnittstellen mit Universitäten und Hochschulen sind notwendig für die Entwicklung von digitalen Technologien wie *Big Data*“.

Die Technologien mit den meisten Anwendungen unter den Befragten sind „Modellierung und Simulation“ mit 35 Nennungen und „Automatisierung und intelligente Steuerungskonzepte“ mit insgesamt 33 Anwendungen. Aus den Tabelle 2 kann ein Überblick der genannten Beispiele entnommen werden.

Tabelle 1: Anwendungen digitaler Technologien (Forschung und Entwicklung, Produktion)

	Forschung und Entwicklung	Produktion
Automatisierung und Intelligente Steuerungskonzepte	<ul style="list-style-type: none"> •Für die modelbasierte Steuerung 	<ul style="list-style-type: none"> •Innovative Sensorik, Softsensoren, Anwendung: advanced process control, predictive maintenance
Big Data Analyse	<ul style="list-style-type: none"> •Screening von Situationen im Markt •Analyse der Rohstoffverfügbarkeit •Zustandsüberwachung •Molecular modelling •Anlagensteuerung ohne hinterlegtes Modell. 	<ul style="list-style-type: none"> •Für die Modellerstellung als Dienstleistung •Verknüpfen von Daten aus versch. Datenquellen •Machine learning •Predictive maintenance
3D-Druck	<ul style="list-style-type: none"> •Rohstoff und Apparaten Entwicklung •Textil-Digitaldruck 	<ul style="list-style-type: none"> •Produktion von Ersatzteilen •Versuchsprodukte und Klein(st)serien zu Testzwecken
Internet der Dinge	<ul style="list-style-type: none"> •Für Trendstudien •Erfassung von Verschmutzungen in Wärmetauschern über Drucksensoren. 	<ul style="list-style-type: none"> •Erkennungs-mechanismen: Raumzugangskontrolle und IT-Applikationen
Modellierung, Simulation	<ul style="list-style-type: none"> •Modellbildung basierend auf Daten und Expertenwissen 	<ul style="list-style-type: none"> •Modelle der Fehleranalyse •Hybride Modelle, Neuronale Netze, Multi-Scala Modelle, Maschinelles Lernen
Digital Plant		<ul style="list-style-type: none"> •Testen der Erreichbarkeit von Anlageteilen •Prädiktive Instandhaltung •Anlagebau und -planung
Digitale Produktionsdienstleistungen	<ul style="list-style-type: none"> •Smart labs •Predictive Maintenance •Cloud working 	<ul style="list-style-type: none"> •Mobile Geräte •Zustandsüberwachung der Leitungen, Prognose •Remote maintenance and monitoring •Visualisierung: Tablettis für Anlagenfahrer

Tabelle 2: Anwendungen digitaler Technologien (Wertschöpfungsketten und Netzwerke, Schulung und Ausbildung)

	Wertschöpfungsketten und Netzwerke	Schulung und Ausbildung
Automatisierung und Intelligente Steuerungskonzepte	<ul style="list-style-type: none"> • Metering und billing • End-to-end Produktionsplanung 	
Big Data Analyse	<ul style="list-style-type: none"> • In der Logistik • Daten aus der gesamten Prozesskette werden genutzt für Ankunftszeiten von Waren, und Hilfsstoffen, Logistik der Entsorgung • Zusammenarbeit über Systemgrenze 	
3D-Druck	<ul style="list-style-type: none"> • Angebot von den Lieferanten: Ersatzteile aus dem Drucker 	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-Drucker in Lehrwerkstätten
Internet der Dinge	<ul style="list-style-type: none"> • Datenaustausch zwischen Industriepartnern • Gebindettracking 	<ul style="list-style-type: none"> • Unter Nutzung von mobilen Endgeräten, Smartphones, Tablettis
Modellierung, Simulation	<ul style="list-style-type: none"> • Modellierung der gesamten Prozesskette für die Skalierbarkeit • Optimale Produktionsstätte (Lage bzgl. Versandzeit und Auslastung). • Optimierung des gesamten Prozesses hinsichtlich Lieferzeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Trainingssimulatoren • Die Modellierung hilft auch für die Ausbildung: schnelles Erfassen des Expertenwissens
Digital Plant		<ul style="list-style-type: none"> • Für Augmented Reality • Für die Planung von Laboren
Digitale Produktionsdienstleistungen	<ul style="list-style-type: none"> • Cloud-dienst für den Datenzugriff • VMI (Vendor Managed Inventory) • Remote Maintenance und Monitoring 	

Frage 2: Ist eine weitere Technologie der Digitalisierung vertreten? Wenn ja, welche?

Zusätzlich zu den vorausgewählten Technologien wurden weiteren digitale Werkzeuge genannt, welche bei den jeweiligen Interview-Partnern eingesetzt werden. In dem Fall von Dienstleistern u/o Consulting Unternehmen wurden die von den Befragten bekannten Anwendungen genannt.

- **Mobile Endgeräte:** zur Datenerfassung
- **Künstliche Intelligenz:** zur Digitalisierung von Expertenwissen und Selektion von Forschungsprogrammen
- **Process Robotics:** zur Abwicklung von Geschäftsprozessen wie z.B. Ausbildung und Training oder in der Forschung
- **Modularität:** Durch die Modularisierung von Anlagen verfahrenstechnischer Prozesse wird die Entwicklungszeit und die Time-to-Market erheblich reduziert. Darüber hinaus entstehen relevante Einsparungen im Investitionsbereich und personelle Ressourcen
- **Mobiles Arbeiten**
- **Drohnen:** für Inspektionsflüge, Inventur, Überwachung von Mitarbeitern im Feld (4 Augen-Prinzip)
- **Augmented Reality:** wird in Forschung und Entwicklung und in der Produktion z.B. für die Wartung eingesetzt
- **Blockchain:** in Rahmen von Kooperationen mit Universitäten und Hochschulen wird u.a. untersucht, ob Produktionsabläufe insbesondere in unternehmensübergreifenden Wertschöpfungsketten über Blockchain-Technologien abgebildet werden können.

Frage 3: Was sind die Herausforderungen / Limitierungen beim Einsatz von digitalen Technologien?

Insgesamt wurden 13 Aspekte angesprochen, die sich limitierend auf den Einsatz von digitalen Technologien auswirken. Im Folgenden werden diese zusammen mit Kommentaren der Befragten zu jedem Aspekt vorgestellt. Die mehrfache Nennung von Herausforderungen und Limitierungen war möglich.

- **Fachliches Wissen**
 - *Absolventen sind nicht genug geschult*
 - *Datenvorbereitungen, Datenabstraktion und Interpretation ist sehr komplex und nimmt viel Zeit in Anspruch*
 - *Skills um verfügbare digitale Technologien umzusetzen sind teilweise nicht vorhanden oder entwickeln sich sehr langsam*
 - *Manager und Entscheider haben (auch altersbedingt) zu wenig Kenntnisse über die vielen Möglichkeiten*
 - *Aus der Erfahrung heraus ist das Problem nicht unbedingt altersabhängig, eher studiengangabhängig. Generell ist die persönliche Neugier und Bereitschaft zum Umdenken elementar*
 - *Zusammenhänge zwischen Produktionsdaten sind sehr schwierig zu identifizieren*
 - *Neuartige Verfahren sind sehr komplex und dadurch schwer zu verstehen und zu vermitteln*
- **Fehlende Schnittstellen**
 - *Schnittstellen zum Produzenten, zu den Kunden sind notwendig um Zusammenhänge erkennen zu können*
 - *Aufgrund fehlender Schnittstellen ist die Kommunikation zwischen unterschiedliche Software oder Systeme nicht immer möglich. Datenübertragung ist dadurch aufwändig und mit manuelle Arbeit verbunden*
- **Technische Verfügbarkeit**
 - *Big Data Analysen etc. einer Anlage funktioniert nur wenn auch viele Daten ausgelesen werden können. Hier ist oft die verbaute Technik nicht auf dem benötigten Stand der Technik*
 - *Unternehmen werden von komplexer werdenden Systemen abhängig. Um den Einsatz der digitalen Technologien zu ermöglichen muss eine ausreichende Unterstützung durch IT Systeme gewährleistet sein*
- **Kosten-Nutzen-Betrachtung**
 - *Es ist nicht absehbar ob die Anwendung von digitalen Technologien finanzielle Vorteile mit sich bringt*
 - *Vorteil der Großunternehmen vs. KMU: KMU haben keine Spezialisten, Technologieimplementierungen in der Produktion (insbes. big data, advanced control, etc.) erfolgen durch (teure) Fachberater*
- **Regulierungsrahmen**
 - *Umsetzung der Datenschutzgrundverordnung als ein prominentes Beispiel aktueller Regulierung hat einen positiven Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit*
 - *Beispiel aus der Pharmaindustrie: In den USA ist die medizinische Forschung datenbasiert, in Deutschland verlangsamen die regulativen Hürden die Entscheidungszyklen in Politik und Gesetzgebung deutlich*
- **Datenverfügbarkeit**
 - *Bestehende Daten sind meistens zweckgebunden und stehen deshalb für Forschungsvorhaben nicht zur Verfügung*
- **Datensicherheit**
- **Heterogenität der Branche**
 - *Integration der digitalen Technologien in den eigenen Workflow der Firmen ist aufgrund der Heterogenität der Branche sehr komplex*
- **Mangel an Interdisziplinarität**
 - *Die interdisziplinäre Zusammenarbeit ist schwer zu gestalten*
- **Fachkräftemangel**
 - *Vor allem beim Mittelstand erkennbar*
 - *Es gibt weder genug Prozessingenieure, die mit den digitalen Technologien vertraut sind, noch Informatiker, die Verständnis für verfahrenstechnische Prozesse haben*
- **Kosten**
 - *z.B. für Sensoren und IT-Systeme*

- **Fehlende Akzeptanz**
 - Menschen wollen Sicherheit, die durch die zunehmende Digitalisierung nicht gewährleistet werden kann
 - Offenheit für neue Technologien fehlt oft
- „Daten-Friedhöfe“:
 - Bestehende Daten werden nicht verwertet.

Der besseren Übersicht halber wurden die Ergebnisse in Abbildung 5 graphisch dargestellt. Die relative Häufigkeit (RH_i) der obengenannten Aspekte wurde auf die Anzahl der Befragten bezogen und nach Gleichung (Gl. 1) berechnet:

$$RH_i = \frac{p_i}{P} \cdot 100 \% \quad (\text{Gl. 1})$$

Mit: p_i – Anzahl der Personen, die Aspekt i genannt haben; P – Gesamtzahl der Befragten.

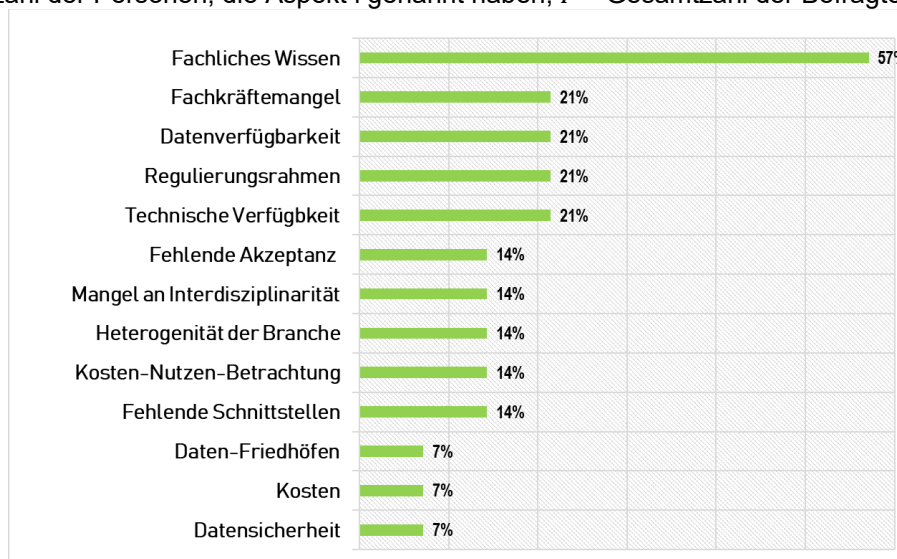


Abbildung 5: Relative Häufigkeit: Herausforderungen und Limitierungen beim Einsatz von digitalen Technologien

Für die Aufschlüsselung der Ergebnisse nach *Großindustrie* und *KMU + Großforschung* wurde p_i auf die Gesamtzahl der Befragten der jeweiligen Gruppe bezogen, beispielsweise:

$$RH_{i,\text{Großindustrie}} = \frac{p_{i,\text{Großindustrie}}}{P_{\text{Großindustrie}}} \cdot 100 \% \quad (\text{Gl. 2})$$

Die aufgeschlüsselten Ergebnisse können Abbildung 19 (Anhang A) entnommen werden.

Frage 4: Ist der Einsatz einer oder mehrerer digitaler Technologien geplant? Wenn ja, welche? Und wann?

Eine graphische Darstellung der Ergebnisse befindet sich für alle Befragten in Abbildung 6. Die nach *Großunternehmen* und *KMU + Großforschung* aufgeschlüsselten Ergebnisse können Abbildung 20 (Anhang B) entnommen werden. Die genannten digitalen Technologien, deren Einsatz geplant ist und der dazugehörige Zeitrahmen sind im Folgenden aufgelistet:

- **Big Data Analyse** (1 – 5 Jahre)
 - Für den optimalen Betrieb
- **Blockchain** (1 – 5 Jahre)
- **Mobiles Arbeiten** (1 – 5 Jahre)
 - Digital Office
 - Remote operation
- **Künstliche Intelligenz** (3 – 7 Jahre)
 - Die bekannten Anwendungen befinden sich aufgrund der hohen Komplexität der Algorithmen, noch im Versuchsstadium. Voraussichtlich wird die Technologie zunächst in der Biologie und Pharmazie für die Versuchsplanung genutzt

- **Internet der Dinge (1 - 5 Jahre)**
 - Für Predictive Maintenance
 - Für die direkte Vernetzung von Maschinen, Wissen, Daten aus unterschiedlichen Plattformen, usw.
- **3D-Druck (1 Jahr)**
- **Predictive maintenance**
- **Modellprädiktive Regelung (jetzt)**
- **RFID (radio-frequency identification) (1 – 5 Jahre)**
 - Flächendeckend in der Standortlogistik
- **Kryptologie**
 - Für Wissenstransfer und Kollaboration
- **Digitale Produktionsdienstleistungen**
 - Zur Daten-Analyse
 - Für die prädiktive Instandhaltung
 - Für automatisierte Abläufe in der Produktion (Bestellabläufe, Fehleranalyse, Problemanalyse für defekte Anlagenteile).

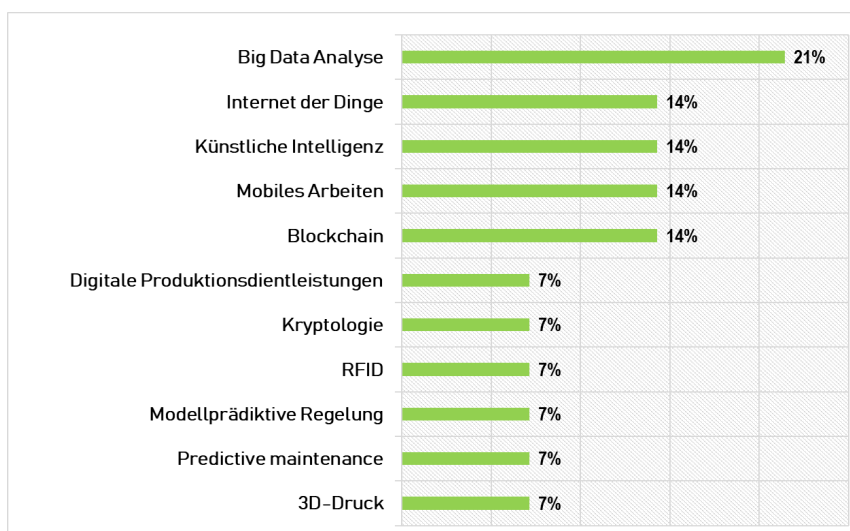


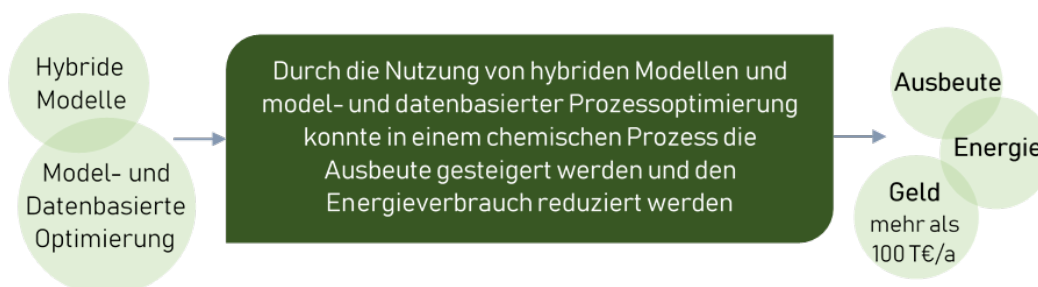
Abbildung 6: Relative Häufigkeit: Geplante digitale Technologien einschließlich digitaler Werkzeuge

Fragen 5-9: Zu einem spezifischen Anwendungsbeispiel: Eingesetzte Technologie und Reifegrad, Motivation, eingesparte Ressourcen, Einsparungspotenzial

Aus den Experteninterviews konnten insgesamt 6 Praxisbeispiele gewonnen werden, welche unter anderem Zusammenhänge zwischen den eingesetzten digitalen Technologien und erzielten Prozessverbesserungen aufzeigen. Drei dieser Beispiele sind nachfolgend präsentiert, die restlichen können Anhang C entnommen werden.

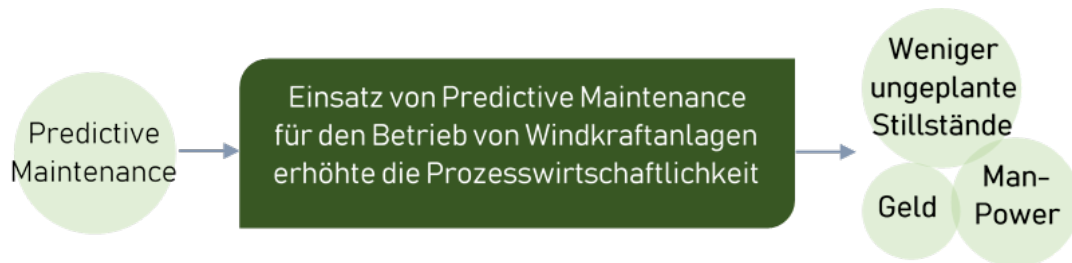
Bsp. 1: Nutzung von hybriden Modellen für die daten- und modellbasierte Prozessoptimierung

Ein chemisches Unternehmen führte den Einsatz hybrider Modelle für die daten- und modellbasierte Prozessoptimierung ein. Die Optimierung führte zu einer Steigerung der Ausbeute und einer Reduktion des Energieverbrauchs. Die Jährliche Einsparungen liegen im Bereich von mehreren Hunderttausend Euro.



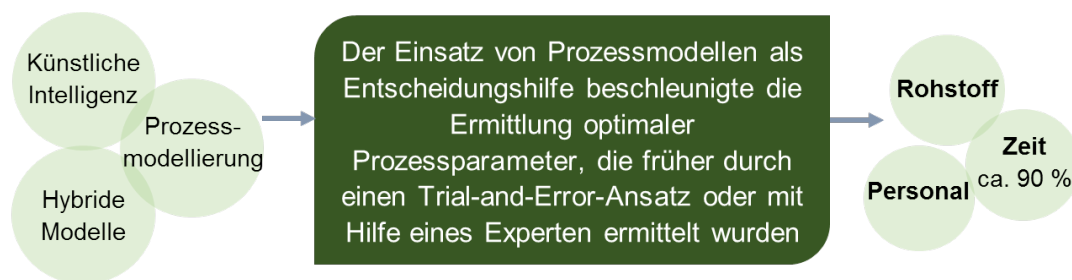
Bsp. 2: Predictive Maintenance für die Erhöhung der Prozesswirtschaftlichkeit

Die modellprädiktive Wartung (predictive maintenance) wurde für den Betrieb von Windkraftanlagen eingesetzt, um die Prozesswirtschaftlichkeit zu erhöhen. Durch diese Technologie konnten ungeplante Stillstände reduziert werden und die Kosten gesenkt werden. Zusätzlich wurden dadurch Mitarbeiter entlastet und die Wertigkeit ihrer Arbeit verschoben.



Bsp. 3: Einsatz von künstlicher Intelligenz und Prozessmodellierung in der Produktion

Die Ermittlung von Prozessparameter in der Produktion wurde durch den Einsatz von hybriden Modellen und künstlicher Intelligenz beschleunigt. Die mit Hilfe von Produktionsdaten und Expertenwissen entwickelten Prozessmodelle agieren als Entscheidungshilfe für die Ermittlung von Prozessparametern, welche früher durch einen tri-and-error-Ansatz oder durch einen Experten festgelegt wurden. Der Entscheidungsprozess wurde von einer Stunde auf 5 Minuten verkürzt



2.3.2. Literaturrecherche

In Rahmen der Literaturrecherche konnten insgesamt 164 Anwendungsbeispiele konsolidiert werden. Eine Liste der Beispiele mit den dazugehörigen Quellen kann dem Anhang D entnommen werden. Die Ergebnisse der Literaturrecherche werden in diesem Abschnitt im Vergleich zu den der Experteninterviews graphisch dargestellt. Die Abbildungen zeigen:

- Welche digitalen Technologien eingesetzt wurden (Abbildung 21 – Anhang E)
- In welchen der Geschäftsfelder die Anwendungen stattfanden (Abbildung 22 – Anhang F)
- Welche Ressourcen eingespart wurden (Abbildung 23 – Anhang G)

sowohl unter den Befragten als auch in den Literaturbeispielen. Die Berechnung der relativen Häufigkeit erfolgte nach Gleichung (Gl. 3) für die Literaturbeispiele:

$$RH_{i,Literatur} = \frac{Abs. H_i}{BP} * 100 \% \quad (Gl. 3)$$

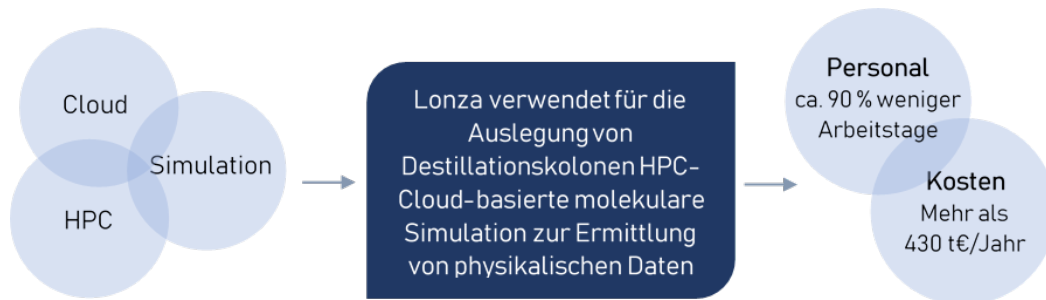
Mit: Abs. H_i – Absolute Häufigkeit der Nennungen von Item i ; BP – Gesamtzahl von Best Practices.

Ausgewählte Literaturbeispiele

Aus der Literaturrecherche wurden insgesamt 10 Anwendungsbeispiele ausgewählt und vergleichbar mit den Beispielen aus den Experteninterviews dokumentiert. Im Folgenden werden 3 dieser Beispiele dargestellt. Weitere Beispiele sind im Anhang H zu finden.

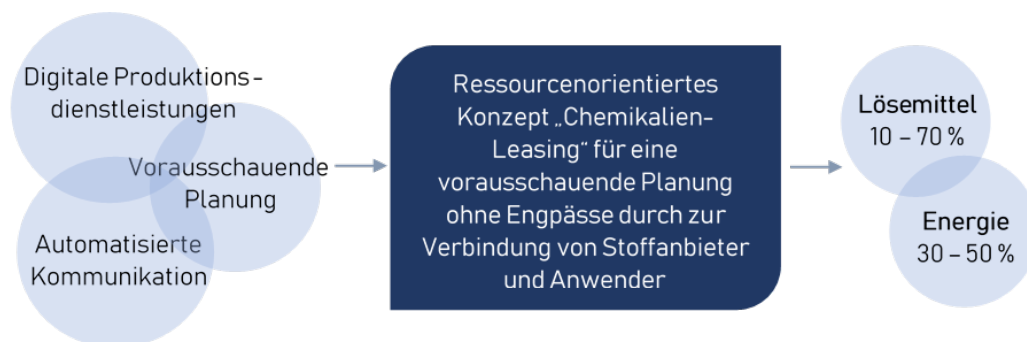
Literaturbeispiel 1: HPC-Cloud-basierte molekulare Simulation zur Ermittlung von physikalischen Daten [9]:

Die für die Auslegung von Destillationskolonnen notwendigen physikalischen Daten wurden bei Lonza experimentell ermittelt. Ein Fallbeispiel zeigte, dass durch die Verwendung von HPC-Cloud-basierten molekularen Simulationen, die üblichen Kosten für die Auslegung einer Kolonne um ca. 86 t€ gesenkt werden konnten u.a. durch Reduzierung des erforderlichen Personals von 100 auf 9 Arbeitstage. In der Regel projiziert Lonza mehr als 5 Destillationsverfahren in Jahr wodurch Ersparnisse in Höhe von mehr als 430 t€ erwartet werden.



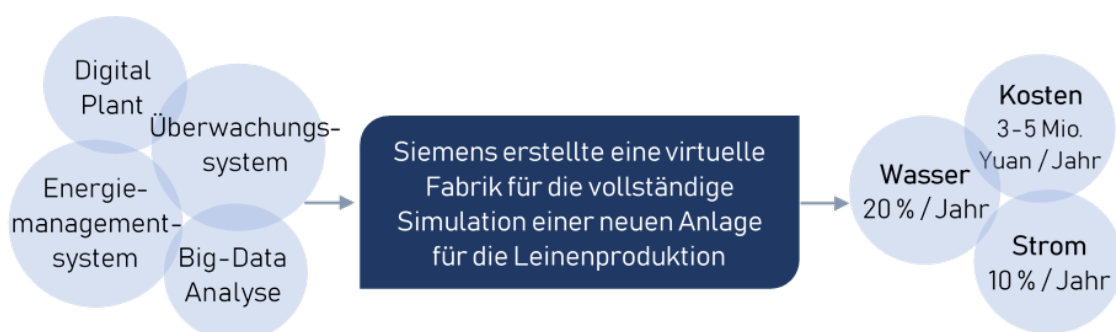
Literaturbeispiel 2: Innovatives dienstleistungsorientiertes Geschäftsmodell: „Chemikalienleasing“ [10]:

Das innovative dienstleistungsorientierte Geschäftsmodell Chemikalienleasing ist darauf ausgerichtet, durch eine intensivierete Vernetzung zwischen den verschiedenen Akteuren entlang der Wertschöpfungsketten, den Ressourceneinsatz zu optimieren. Das Konzept führt zu wirtschaftlichen Vorteilen für Anbieter und Anwender und zu einem reduzierten und nachhaltigeren Chemikalienverbrauch [11]. Nach [10], S. 53 können durch das Konzept Einsparungen zwischen 10 und 70 % Lösemittel und zwischen 30 und 50 % Energie erzielt werden.



Literaturbeispiel 3: Bau einer neuen digitalen Fabrik [12]:

Siemens-Experten haben eine virtuelle Fabrik für die vollständige Simulation einer neuen Anlage (auf der Basis einer alten Anlage) der Kingdom Holdings Ltd erstellt. Die digitale Fabrik integriert Informations- und Automationssysteme und umfasst die IT-Ausrüstung (u.a. die Netzwerkarchitektur, Schnittstellen) sowie das mechanische Layout. Zusätzlich zu Prozess-Verbesserungen der alten Anlage wurde ein Energiemanagement- sowie ein Überwachungssystem mit einer Big-Data-Software eingesetzt. Die Simulationen sagen eine jährliche Reduktion des Wasserverbrauchs von 20 %, des Stromverbrauchs von 10 % und der Kosten von 3 bis 5 Millionen Yuan, voraus.



3. Bewertungsmethodik für Ressourceneffizienzpotenzial durch Digitalisierung

Um den Einfluss von Digitalisierungstechnologien und –Werkzeugen auf Industrieprozesse einheitlich und nachvollziehbar zu bewerten, müssen die Prozesse mathematisch beschrieben und der Einfluss auf charakteristische Kennzahlen quantifiziert werden. Dieser Abschnitt der Studie umfasst die Hauptschritte der Ressourceneffizienzbewertung in Kombination mit weiteren wesentlichen technischen Effizienzgrößen mit besonderer Relevanz für die Nachhaltigkeit. Die Bewertungsmethodik für Effizienzpotenziale wird in Anlehnung an bestehende Methoden und Ansätze zusammengefasst. Weiterhin wird die Bewertungsmethodik auf Basis detaillierter Bilanzierungen eigener verfahrenstechnischer Prozesse validiert.

Auf Basis der Stoffflussanalyse für ein bestimmtes System lassen sich Effizienzindikatoren ermitteln.

3.1. Literaturrecherche

Einen technischen Prozess definiert man als Gesamtheit der Vorgänge in einer technischen Anlage. Hierbei werden Materie und Energie physikalisch bzw. chemisch umgewandelt, transportiert und gespeichert. Die Prozessbewertung basiert auf den bestehenden Daten der Prozesse bzw. Prozessketten. In Simulationsprogrammen werden Prozessketten als Verknüpfung unterschiedlicher Komponenten betrachtet, die durch Material bzw. Energieflüsse verknüpft werden. Innerhalb der Komponenten finden die oben genannten Veränderungen statt. Die Komponenten werden mittels mathematischer Modelle beschrieben.

3.2. Stoffflussanalyse

Die Stoffflussanalyse ist eine Methode zur Beschreibung, Gestaltung und Bewertung komplexer Systeme. Bei der Beschreibung eines Systems geht es darum, Flüsse und Prozesse zu identifizieren. Ausschlaggebend sind immer die Aufgabenstellung und die daraus abgeleiteten Ziele, die den Umfang des Systems bestimmen. Bei der Stoffflussanalyse gilt es, die Bilanzen für Masse, Elemente und Energie aufzustellen. Daraus abgeleitet werden Indikatoren der Prozessbewertung ermittelt (Effizienzindikator = Nutzen / Aufwand in %, siehe Abbildung 7: Bilanzen der Stoffflussanalyse

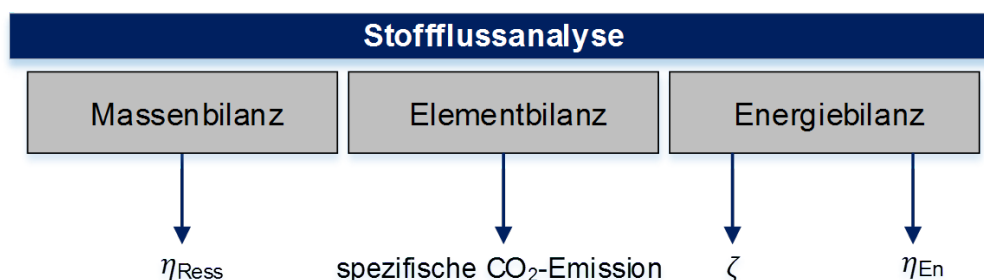


Abbildung 7: Bilanzen der Stoffflussanalyse

Die methodischen Schritte zur Erstellung einer Stoffflussanalyse sind:

1. Aufgabenstellung und Zielsetzung
2. Systemdefinition
3. Massenbilanz.

Bilanzen stellen die in einer bestimmten Zeitspanne beim stationärem Betrieb in ein System eintretenden und austretenden Ströme dar. Die räumlichen Grenzen (Bilanzgrenzen) sind entsprechend der Fragestellung festzulegen. Damit das Ziel einer gut abgestützten Stoffflussanalyse erreicht wird kann es notwendig sein, mehrere Iterationsschritte durchzuführen. Insbesondere muss man Teile des Systems hinreichend beschreiben und Systemgrenzen geeignet wählen, sodass alle die Systemgrenze überschreitenden Energie- und Stoffströme ermittelt werden können. Die Vorgehensweise ist im Anhang I dargestellt [13].

3.3. Bilanzen und Indikatorberechnung

Hier werden vier Effizienzindikatoren in Anlehnung an die Abbildung 8 genannten Berechnungsvorschriften ermittelt: Ressourceneffizienz, Energieeffizienz, Exergieeffizienz sowie Klimateffizienz.

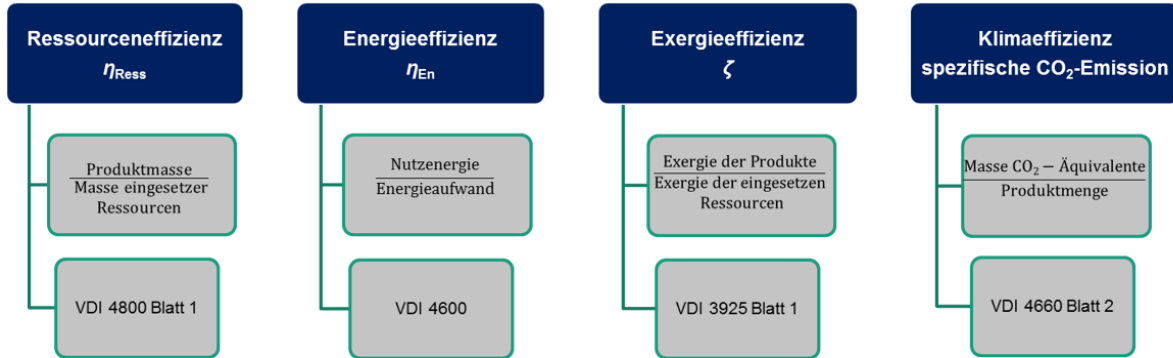


Abbildung 8: Berechnung der Effizienzindikatoren bei der Prozessbewertung.

3.3.1. Massenbilanz / Ressourceneffizienz

Die Massenbilanz stellt den Kern der Systemanalyse dar. Um eine Massenbilanz aufzustellen, ist zunächst die Identifikation der wichtigsten Systemteile durchzuführen. Dies ist die Basis für ein grundlegendes Verständnis des Systems und der Bedeutung seiner Komponenten.

Die Ressourceneffizienz ist als Verhältnis einer bestimmten Produktmenge zum dafür nötigen Ressourceneinsatz definiert:

$$\text{Ressourceneffizienz} = \frac{\text{Produktmenge}}{\text{Menge eingesetzter natürlicher Ressourcen}} \quad (\text{Gl. 4})$$

Eine erhöhte Ressourceneffizienz stellt sich ein, wenn ein bestimmter Nutzen mit geringerem Einsatz an natürlichen Ressourcen erreicht wird. Erhöht sich der technisch-funktionelle Nutzen (größerer Zähler) und bleibt der Einsatz an natürlichen Ressourcen gleich (gleicher Nenner), erhöht sich ebenfalls die Ressourceneffizienz [14].

3.3.2. Energiebilanz / Energieeffizienz

Für die Erstellung der Energiebilanz ist der kumulierte Energieaufwand zu definieren. Der kumulierte Energieaufwand (KEA) gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Guts entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann [15].

$$\text{KEA} = \text{KEA}_H + \text{KEA}_N + \text{KEA}_E \quad (\text{Gl. 5})$$

Hier wird nur KEA_H betrachtet.

Aus der Energiebilanz werden unterschiedliche energetische Wirkungsgrade definiert [16]:

1. Thermischer Wirkungsgrad: Nutzbare thermische Energie bezogen auf die gesamte dem System zugeführte Energie
2. Elektrischer Wirkungsgrad: Nutzbare elektrische Energie bezogen auf die gesamte dem System zugeführte Energie
3. Gesamtwirkungsgrad: Summe der nutzbaren Energie bezogen auf die gesamte dem System zugeführte Energie.

Hier wird der Gesamtwirkungsgrad ermittelt. Für die Aufstellung der Energiebilanzen werden diverse Prozess- und Stoffdaten benötigt, so z.B.:

- Chemisch gespeicherte Energie, die in Form einer chemischen Verbindung in einem Energieträger gespeichert ist und bei chemischen Reaktionen freigesetzt werden kann
- Fühlbare Wärmen, z.B. mittlere spezifische Wärmekapazität.

3.3.3. Energiebilanz / Exergieeffizienz

Exergie ist der Anteil der Gesamtenergie eines Systems oder Stoffstroms, welcher Arbeit verrichten kann, wenn er in das thermodynamische Gleichgewicht mit seiner Umgebung tritt. Im Gegensatz zur Energie kann Exergie vernichtet werden, weil sie keine Erhaltungsgröße darstellt.

Somit lässt sich die Aussage treffen, dass die Exergie ein Maß für die Qualität der Energie ist. In der folgenden Tabelle sind verschiedene Energieformen präsentiert. Mithilfe dieser Tabelle ist es möglich, Exergiewerte verschiedener Energieformen gemeinsam gegenüber zu stellen, d.h. die Qualität der Energieformen gegenseitig zu vergleichen (siehe Tabelle 3) [13].

Tabelle 3: Exergie bei verschiedenen Energieformen [13]

Energieform	Theoretische maximale mechanische Energie (Exergie)
mechanische Energie	100 %
elektrische Energie	100 %
Sonnenstrahlung	~93 %
chemische Energie	Absolutwert ähnlich dem Heizwert (Hu), hochwertig bei niedrigem Oxidationszustand
Wärme	Hoch bei hoher, niedrig bei niedriger Temperatur

Die Exergiebilanz stützt sich auf dieselben Definitionen, Systemgrenzen und Zeitrahmen wie die Energiebilanz. Der exergetische Wirkungsgrad – oft auch als Gütergrad bezeichnet – ist definiert als der Quotient aus Zielenergie und insgesamt zugeführter Exergie. Vernichtet ein Prozess Exergie, steht sie dem gesamten Energiesystem nicht zur Verfügung. Entsprechend entsteht im Energiesystem zusätzlicher Energiebedarf.

3.3.4. Kohlenstoffbilanz / Klimaeffizienz

Ein wichtiger Aspekt im Kontext der Klimaeffizienz sind freigesetzte Treibhausgase. Die Klimawirksamkeit der Treibhausgase wird in CO₂- Äquivalenten (CO₂-Eq.) gemessen. Aus diesem Grund werden in dieser Studie die auf das Produkt bezogenen spezifischen CO₂-Emissionen der Beispielprozessen analysiert und quantifiziert.

Parameter, die Einflüsse auf die Menge der CO₂- Emission haben, sind:

- Brennstoffmenge, die in einem Prozess eingesetzt wird
- CO₂-Emissionen der Stoffumwandlung [17].

4. Prozesssimulation und Anwendung auf beispielhafte Industrieprozesse

Mithilfe der digitalen Technologie „Simulation“, basierend auf Prozessmodellen, werden im Folgenden Beispielhaft verfahrenstechnische Industrieprozesse anhand von Stoffflussanalyse und Effizienzindikatorberechnung analysiert und bewertet.

Reale, industrielle Beispiele sind aus Gründen des Wettbewerbs in der Regel nicht vollständig dokumentiert und damit nicht vollständig nachvollziehbar. Daher werden im Rahmen dieser Studie die Prozesssimulationen und Bilanzierungen für KIT-Anlagen durchgeführt, die zwei Sparten der Prozessindustrie repräsentieren: Steine und Erden / Zement (Celitement®-Prozess) sowie Chemie

(bioliq®- Prozess). Modellbildung und Simulation erfolgt mit der Simulationssoftware HSC SIM sowie Epsilon® Professional. Die Prozesssimulation beinhaltet folgende Schritte:

1. Prozesskettendefinition
2. Komponentendefinition
3. Thermodynamische Berechnung bzw. Parametrierung oder Modellierung der Prozessgrößen.

4.1. Beispiel 1: Herstellungsverfahren in der Zementindustrie

Da die Zementindustrie durch einen hohen Energieeinsatz und einen hohen Verbrauch an wertvollen Rohstoffen, verbunden mit spezifisch hohen Treibhausgasemissionen gekennzeichnet ist, wurden im Rahmen dieses Projektes verschiedene verfahrenstechnische Prozesse der Zementherstellung analysiert, modelliert, bewertet und verglichen.

Abbildung 9 zeigt den Verfahrensablauf der Herstellung von Portlandzement.

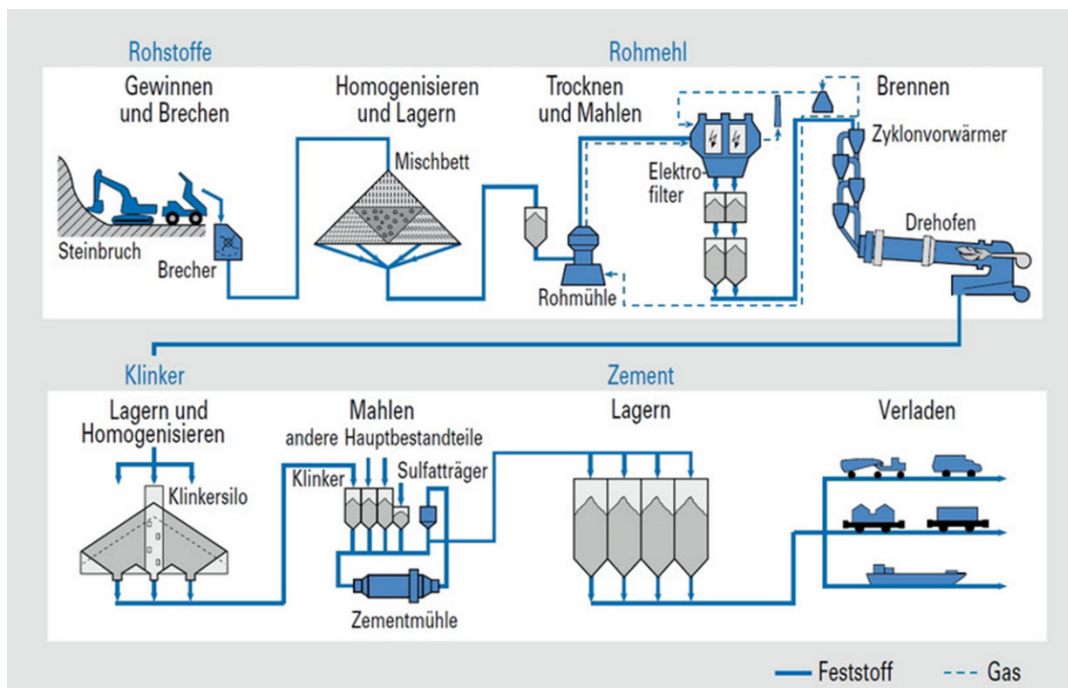


Abbildung 9: Schematischer Verfahrensablauf der Herstellung von Portlandzement [18]

4.1.1. Prozessmodellierung mithilfe von Simulationswerkzeugen

Mithilfe des Simulationswerkzeuges HSC Chemistry 9 (HSC-SIM), eines Flowsheet-Simulationsprogramms mit einer detaillierten thermodynamischen Datenbasis insbesondere für mineralische Stoffumwandlung mit Schwerpunkt Metallurgie, wurden drei unterschiedliche Prozesse der Zementherstellung modelliert und auf Basis detaillierter Bilanzierungen bewertet. Die modellierten verfahrenstechnischen Prozesse sind:

1. Herstellungsverfahren von Alit (Tricalciumsilikat), Hauptkomponente im Portlandzement; Industriestandard
2. Herstellungsverfahren von Belit (Dicalciumsilikat); Nebenkomponente im Portlandzement, Hauptkomponente in Zementen für besondere Anwendungen
3. Herstellungsverfahren von Celitement (Calciumsilikathydrat, neuartiges zementäres Bindemittel und neuartiger Herstellungsprozess), 2 Varianten auf Basis zweier unterschiedlicher Rohstoffe; stellvertretend für alternative kalkarme Bindemittel.

Die Prozesse sind im Anhang J beschrieben. Die detaillierten Prozessschemata befinden sich im Anhang K.

Annahmen und Vereinfachungen der Prozessmodellierung:

In allen Prozessschritten / Komponenten wird das Thermodynamische Gleichgewicht angenommen. Nichtgleichgewichts-Zustände (z.B. Metastabilität der Zementphasen) werden nicht berücksichtigt.

- Thermodynamisches Gleichgewicht als Basis
- Definition der Systemgrenzen
 - Identische Ausgangsstoffe: Kalkstein und Sand
 - Keine Betrachtung der Rohmaterialgewinnung (Steinabbau, Transport)
 - Benötigten Quellen für die Erzeugung der elektrischen Energie sind nicht berücksichtigt
- Bedarf an elektrischer Energie für die Mahlprozessschritte ist in der Modellierung mit HSC SIM nicht implementiert: wichtige Beiträge werden daher bei der in Kenngrößenermittlung berücksichtigt
- Alle Modellgrößen sind auf Masse Produkt bezogen, unterschiedliche Produkteigenschaften spielen keine Rolle
- Alle modellierten Prozesse basieren auf gleichen Ausgangsstoffen: Kalkstein (Calciumcarbonat) und Sand (Siliziumdioxid)
- Definierte Systemgrenzen in Flowsheet-Modellen umfassen die gleichen Hauptprozessschritte in der Prozesskette.

Modellierungsbeschränkungen im Simulationswerkzeug HSC-SIM:

- Vernachlässigung der technischen Eigenschaften von Apparaten in der Prozesskette; dies wird als Blackbox-Modellierung bezeichnet
- Keine Möglichkeit der Modellierung der Reaktionskinetik im Prozess
- Annahme der Gleichheit der thermodynamischen Daten des Celitement-Produktes und bekannter Calcium-Silikat-Hydrate ($2\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2,5 \text{H}_2\text{O}$).

Abbildung 10 zeigt Modellaufbau und Systemgrenzen. Als Gesamtsystem wird hier die Stoffumwandelnde Prozessindustrie und deren Effizienz betrachtet. Effizienz der Gewinnung und Bereitstellung der Eingangsgrößen sowie Auswirkungen der Produkt- und der Nebenproduktnutzung einschließlich Transportaufwand im Sinne einer ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse werden hier nicht betrachtet. Einzige Ausnahme sind die an die Umwandlung der Energieträger gebundenen CO₂-Emissionen: der physikalische Energieträger Strom wird mit den CO₂-Emissionen gemäß aktuellem Strommix Deutschland berücksichtigt [19].

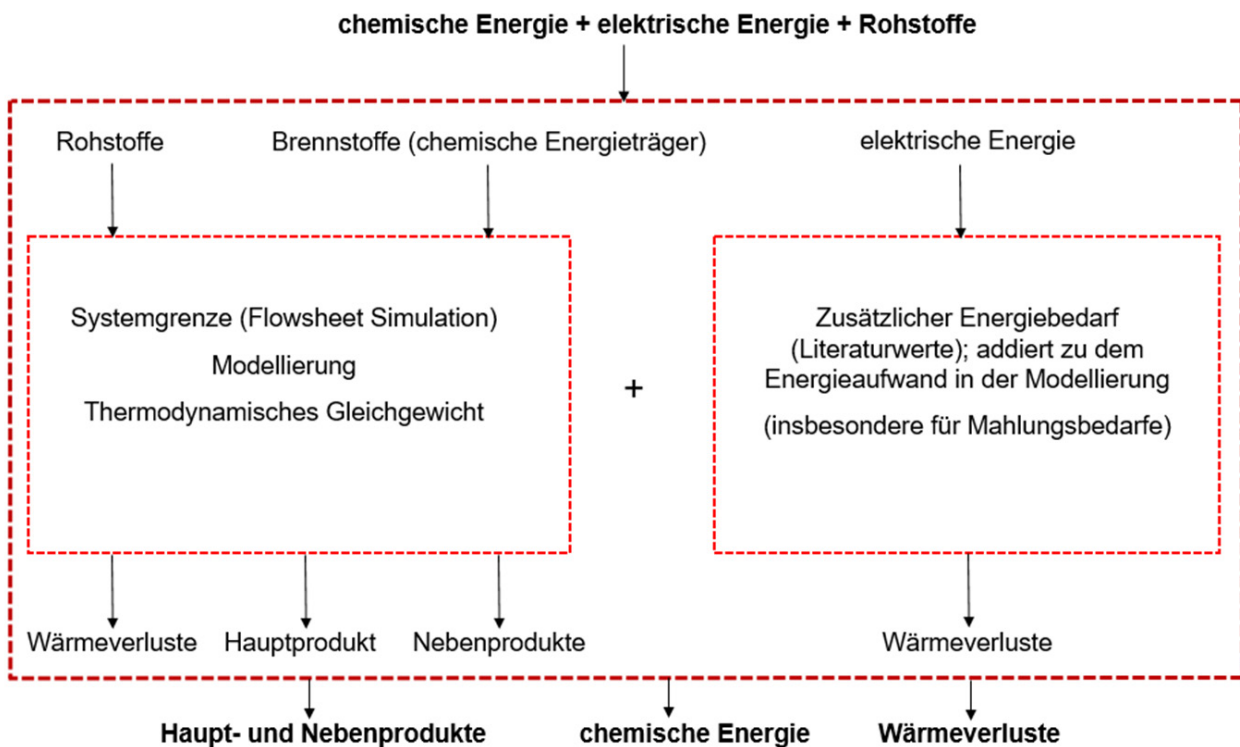


Abbildung 10: Allgemeine Modellübersicht

4.2. Beispiel 2: Chemische Industrie – Der bioliq®-Prozess

Der zweite Beispielprozess ist der bioliq®-Prozess. Das bioliq®-Verfahren wurde am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen aus Restbiomasse entwickelt. Der gesamte Prozess wird im Pilotmaßstab am KIT betrieben und umfasst die Prozessschritte Pyrolyse – Vergasung – Gasreinigung – Benzinsynthese [20], siehe Abbildung 11: Prozessschritte des bioliq®-Verfahrens [20]

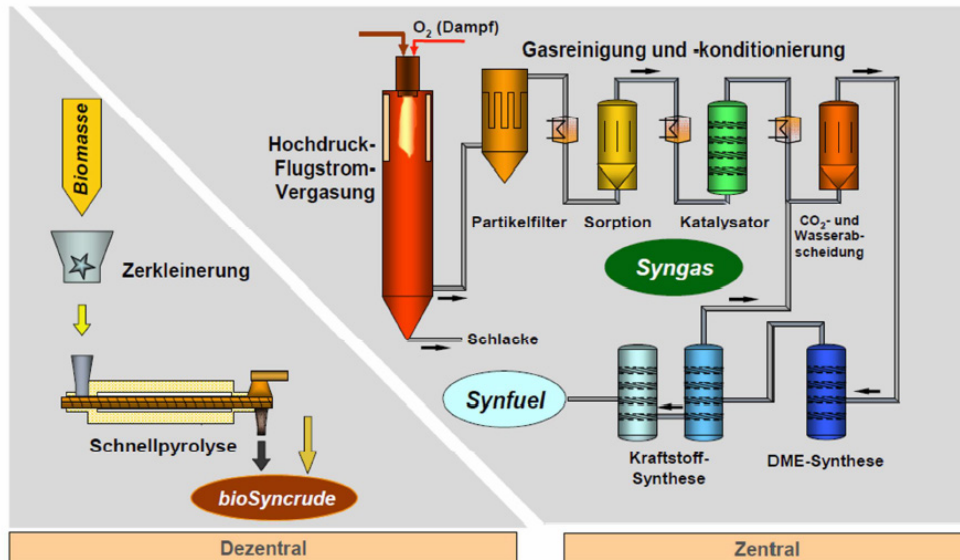


Abbildung 11: Prozessschritte des bioliq®-Verfahrens [20]

Hier wird der zentrale Hochtemperaturteil des Prozesses, bestehend aus Vergasung und Gasreinigung zu Herstellung von Synthesegas aus komplexen Sekundärrohstoffen betrachtet (Abbildung 12). Die notwendige Qualität des Synthesegases wird in solchen Prozessen in der Regel durch eine ausreichend hohe Vergasungstemperatur sichergestellt, zulasten der Synthesegasausbeute und damit der Ressourceneffizienz, da ein Teil des Rohstoffes zur Erzeugung eben dieser Temperatur im Vergaser verbrannt wird, anstatt Synthesegas zu erzeugen.

4.2.1. Prozessmodellierung mit Hilfe von Simulationswerkzeugen

Mithilfe des Simulationswerkzeuges Epsilon® Professional wurde der bioliq®-Prozess simuliert. Dieses Flowsheet-Simulationsprogramm eignet sich besonders für die Anwendung auf komplexe thermodynamische Kreisprozesse der Energieumwandlung, die mit dem hier betrachteten Hochtemperaturteil des bioliq®-Prozesses verwandt sind.

Gegenüber der existierenden Pilotanlage wurden dabei folgende Änderungen durchgeführt:

- Scale-up des Prozesses auf industriellen Großmaßstab
- Vollständige energetische Integration des Prozesses, u.a. Konfiguration des Verfahrens als Wärmenutzungssystem → Steigerung des energetischen Gesamtwirkungsgrades durch die Umwandlung der fühlbaren Wärme des Gases in Hochdruckdampf und elektrische Energie.

Im Rahmen dieses Projektes wurden dabei zwei Fälle untersucht:

- **Fall 1:** Konventioneller Vergaserbetrieb mit einer rechnerischen Prozesstemperatur von 1500 °C
- **Fall 2:** Physikalisch-chemisches Optimum (ca. 1250 °C Vergasungstemperatur). In der Regel ist dieses Optimum mit konventionaler Anlagentechnik nicht erreichbar, da beispielsweise für solche Hochtemperatur/Hochdruck-Prozessbedingungen keine Temperatursensoren existieren, ein empirischer „Sicherheitsabstand“ vom Optimum eingehalten wird, um Produktverluste durch schwankende Rohstoffzusammensetzung zu vermeiden, etc. Digitalisierungstechnologien wie die systematische Auswertung großer Datensätze (Big Data + Künstliche Intelligenz) können

grundsätzlich den Betrieb im Optimum in Echtzeit ermöglichen. Dies wird durch die Prozesssimulation dargestellt.

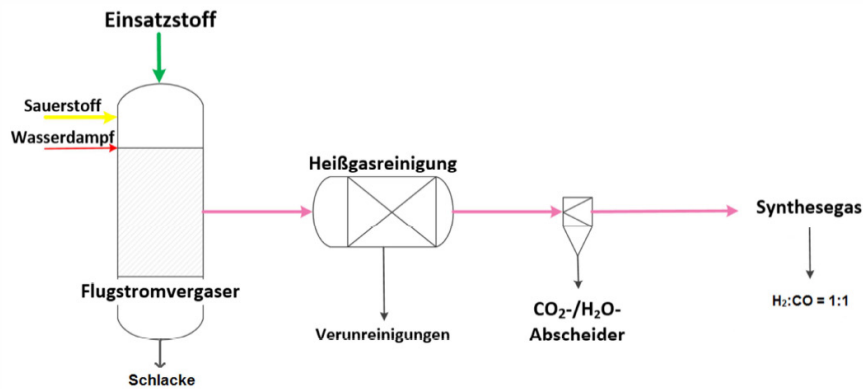


Abbildung 12: Vereinfachte Prozesskonfiguration der Synthesegaserzeugung

Die bioliq-Anlage verfügt über modernste Leit- und Automatisierungstechnik, eine maximale Ausstattung mit Prozesssensorik und eine detaillierte Prozessdatenerfassung, als Voraussetzung für die Anwendung und Validierung der o.g. Digitalisierungstechnologien und –methoden (siehe Anhang L).

5. Prozessbewertung / Optimierung durch Prozesssimulation

5.1. Beispiel 1: Herstellungsverfahren in der Zementindustrie

Hier werden die drei unterschiedlichen, existierenden und noch nicht großtechnische existierenden, Prozesse mittels der Digitalen Technologie „Modellierung und Simulation“ gegenübergestellt, um die eine ganzheitliche Betrachtung der Prozesseffizienz zu ermöglichen.

In den Tabellen im Anhang M ist die Indikatorenauswertung im Herstellungsverfahren von Alit, Belit sowie Celitement nach Variante 1 (Rohstoffbasis: Calciumcarbonat, Einsatzstoff gelöschter Kalk) und Variante 2 (Rohstoffbasis: Calciumcarbonat, Einsatzstoff Belit) detailliert gelistet. Nachfolgende Abbildungen zeigen den Vergleich in Bezug auf oben genannte Indikatoren.

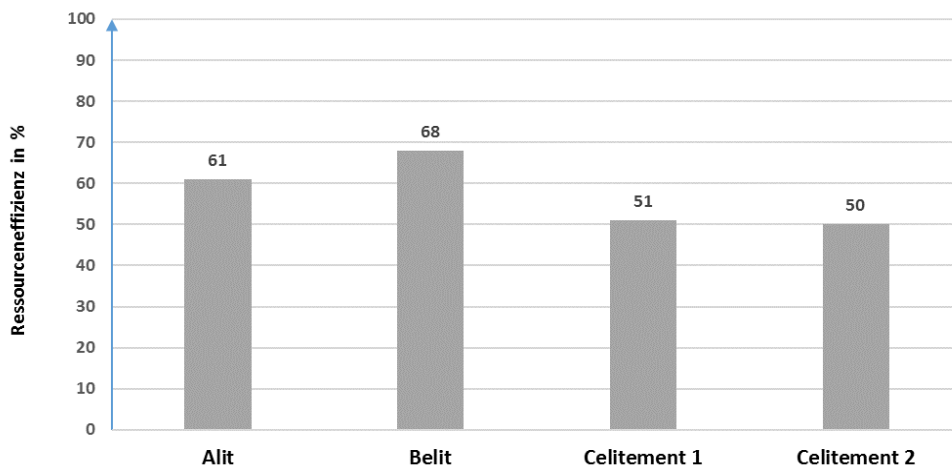


Abbildung 13: Ressourceneffizienz, Simulationsergebnisse

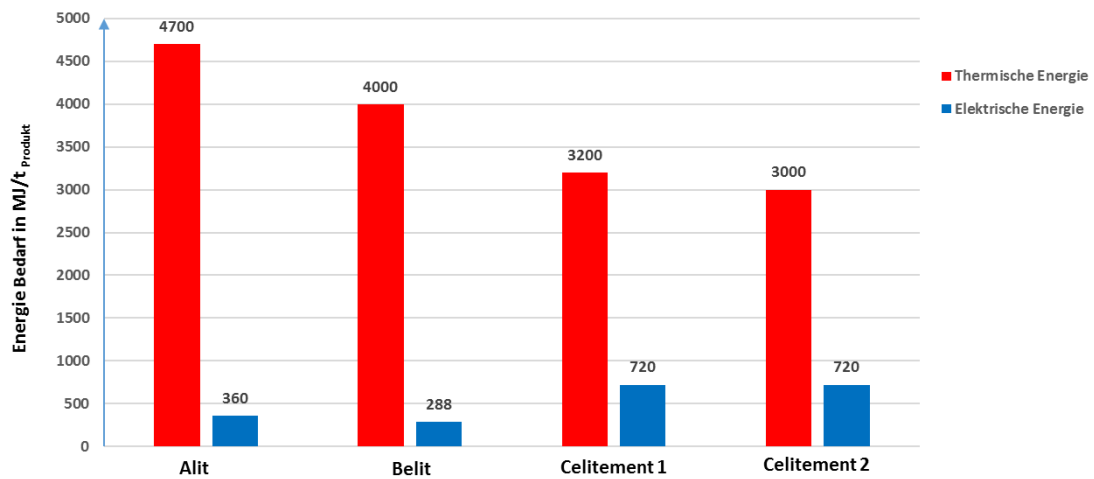


Abbildung 14: spezifischer Bedarf an thermischer und elektrischer Energie, Simulationsergebnisse

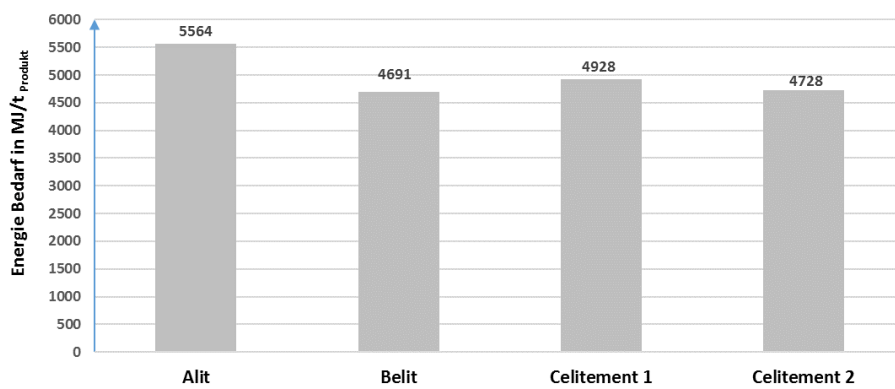


Abbildung 15: Gesamter spezifischer Energiebedarf, Simulationsergebnisse

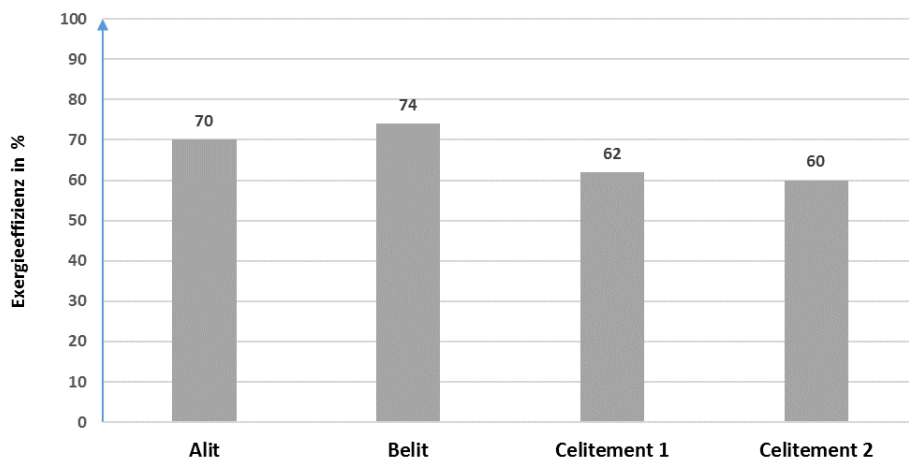


Abbildung 16: Exergieeffizienz, Simulationsergebnisse

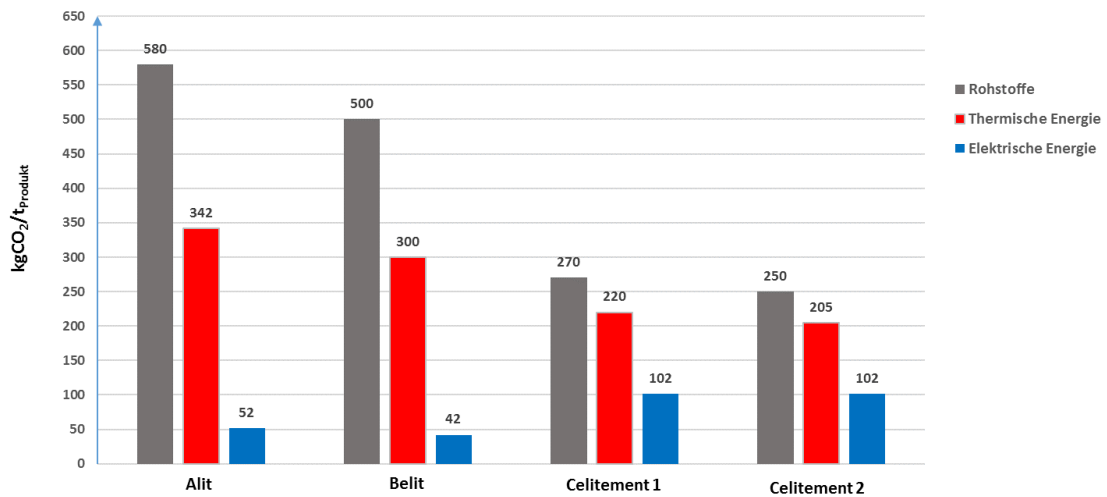


Abbildung 17: Spezifische CO₂-Emission (rohstofflich und energetisch bedingt), Simulationsergebnisse

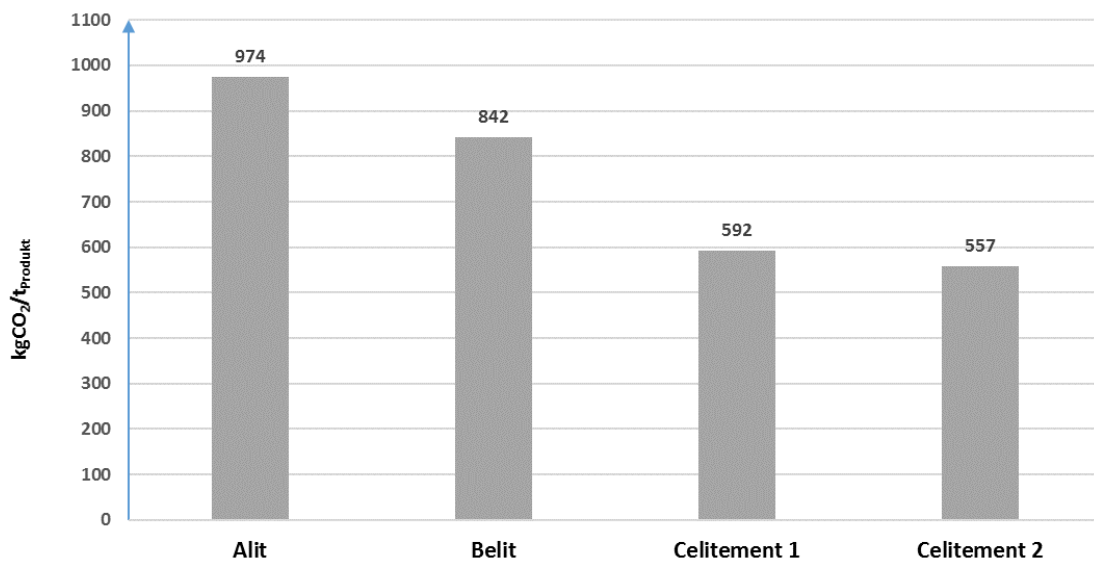


Abbildung 18: Gesamte spezifische CO₂-Emission, Simulationsergebnisse

Ressourceneinsatz:

Im Vergleich zu Celitement ist bei der Portlandzementherstellung (Alit) die dreifache Menge an Kalkstein notwendig, um die gleiche Menge an Bindemittel zu erhalten, bei Belit die Doppelte.

Energiebedarf:

Grund für den niedrigeren Energiebedarf bei der Celitementherstellung gegenüber der Portlandzementherstellung und der Belitherstellung ist die niedrigere Temperatur und die verringerte Kalkmenge.

Exergieverluste:

Die größten exergetischen Verluste zeigt der Celitement-Prozess. Der Herstellungsprozess von Belit hat den höchsten Wert der Exergieeffizienz, weil eine Optimierung des Herstellungsverfahrens von Belit mit Gasrezirkulationskreisläufen durchgeführt wurde.

CO₂- Emission:

Der wichtigste Grund für die niedrige CO₂-Emission bei der Celitementherstellung ist das gegenüber Portlandzement und auch Belit niedrigere Ca:Si Verhältnis, die CO₂-Einsparung ergibt sich aus dem kalkärmeren Hauptprodukt. Zusätzlich wird wegen der niedrigeren Prozesstemperatur weniger Energie und damit weniger Brennstoff benötigt.

In Tabelle 4 werden die Effizienzwerte der verschiedenen Zementprozesse gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Effizienzindikatoren z.T. gegenläufig sind. Deutlich wird damit bekannterweise, dass eine Maximierung der Ressourceneffizienz mit einer Verschlechterung in anderen Bereichen, beispielsweise der Energieeffizienz einhergehen kann.

Tabelle 4: Übersicht der Effizienzwerte der simulierten Prozesse aus der Zementindustrie

Prozess	Effizienzgröße			
	Ressourceneffizienz η_{Ress}	Energieeffizienz η_{En}	Exergieeffizienz ζ	spezifische CO ₂ -Emission
Zementherstellungsprozess				
Alitherstellungsprozess (modifizierter Portlandzementherstellungsprozess)	63 %	61 %	70 %	974 kg _{CO₂} / t _{Produkt}
Belitherstellungsprozess (zwei Kreisläufe)	66 %	68 %	74 %	842 kg _{CO₂} / t _{Produkt}
Celitementherstellungsprozess (Variante 1)	75 %	51 %	62 %	592 kg _{CO₂} / t _{Produkt}
Celitementherstellungsprozess (Variante 2)	78 %	50 %	60 %	557 kg _{CO₂} / t _{Produkt}

5.2. Beispiel 2: Der bioliq[®]- Prozess

Tabelle 5 zeigt die Simulationsergebnisse der Effizienzgrößen im bioliq-Verfahren für beide Fälle, Stand der Technik bzw. dem Optimierungspotenzial durch Digitalisierung. Das detaillierte Prozessschema befindet sich im Anhang N.

Tabelle 5: Vergleich der Effizienzgrößen im bioliq-Verfahren

Prozess	Effizienzgröße			
	Ressourceneffizienz η_{Ress}	Energieeffizienz η_{En}	Exergieeffizienz ζ	spezifische CO ₂ -Emission
bioliq [®] - Prozess				
Fall 1: Konventioneller Vergaserbetrieb (1500 °C)	33,8 %	84,1 %	87,1 %	695 kg _{CO₂} / t _{Produkt}
Fall 2: Physikalisch-chemisches Optimum (1250 °C)	35,5 %	86,2 %	89,1 %	665 kg _{CO₂} / t _{Produkt}

Tabelle 6 fasst einige Hauptprozesseigenschaften beider Fälle zusammen. Der Kaltgaswirkungsgrad (Verhältnis zwischen dem Energieinhalt des Produktgases nach dem Vergasungsschritt und dem Energieinhalt des Energieträgers vor der Vergasung im Rohzustand) liegt für Fall 2 höher als bei Fall 1.

Tabelle 6: Simulationsergebnisse: Haupt- und Nebenprodukteigenschaften

Produkt: Synthesegas	Fall 1 Vergasungstemperatur 1500 ° C	Fall 2 Vergasungstemperatur 1250 ° C
H ₂ :CO Verhältnis	1:1	1:1
Massenstrom in t/h	64,9	65,9
Heizwert in MJ/kg	16,8	17,1
Thermische Leistung in MW	303,4	312,4
Kaltgaswirkungsgrad in %	73,87	76,05

Um die Temperatur im Fall 2 (1250°C) gegenüber Fall 1 (1500°C) zu reduzieren, wurde die Sauerstoffmenge im Fall 2 reduziert, da diese einen direkten Einfluss auf die Vergasungstemperatur hat. Eine geringere Vergasungstemperatur hat folgende Auswirkungen:

- Steigerung aller Effizienzindikatoren
- Steigerung des Kaltgaswirkungsgrades.

Um diese Potentiale zu heben, ist der Einsatz digitaler Technologien (big data-Anwendungen sowie Künstliche Intelligenz) notwendig. Damit ließen sich durch die Erstellung entsprechender Algorithmen die Identifikation und Auswahl von optimalen Prozessparametern automatisieren. Dies erlaubt die Effizienzsteigerungen und das Minimieren des Fehlerrisikos beim Betrieb der Anlage.

Auffallend ist der scheinbar niedrige Ressourceneffizienzwert des Prozesses von < 40% auch im physikalisch/chemischen Optimum. Hier zeigt sich, dass für viele stoffumwandelnden Prozesse die Ressourceneffizienz keine geeignete Bewertungsgröße darstellt, auch wenn der Wert durch Anwendung moderner Digitalisierungstechnologien und –werkzeuge gesteigert werden kann. Aufgabe dieses für die Basischemie repräsentativen Prozesses ist die Umwandlung schwieriger aber nachhaltiger Rohstoffe in einfache Chemiebausteine, das Synthesegas. Hierbei soll vor allem die chemisch gespeicherte Energie des Rohstoffes im Synthesegas zurückgewonnen werden. Dies gelingt in Ultraeffizienter Weise, wie es durch den Kaltgaswirkungsgrad ausgedrückt wird. Der energiearme Anteil des Rohstoffes wird dabei zu großen Teilen nachhaltig in Wasser umgewandelt. Zudem wird die thermische Energie hochwertig genutzt, sodass sich besonders hohe energetische und exergetische Wirkungsgrade ergeben. Die gemäß Definition des Effizienzindikators ausgewiesene CO₂-Emission beruht auf erneuerbarem (biogenen) Einsatzstoff, ist also Klima neutral. Wiederum wird deutlich, dass Optimierung nur ganzheitlich aufgrund der unterschiedlichen Indikatoren beurteilt werden kann und insbesondere Prozessverständnis notwendig ist.

5.3. Indikative Übertragung des Einsparungspotentials mittels Hochrechnung

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben ergibt sich durch Optimierung der Prozessparameter bzw. der Prozessgestaltung auch unter Zuhilfenahme von Digitalisierungstechnologien die Chance, enorme Effizienzsteigerungen durchzuführen und Prozesse ganzheitlich zu Optimieren. Gezeigt wurde dies für die betrachteten Prozesse auf entsprechend vorhandener Datenbasis für die Ressourcen-, Energie-, Exergie- und Klimateffizienz.

Auch in Anbetracht gegenwärtiger gesellschaftlicher und politischer Diskussionen bezüglich der Verringerung von CO₂-Emissionen auch im industriellen Sektor („Dekarbonisierung“) soll an dieser Stelle insbesondere auch auf die Klimateffizienz – gemessen an der emittierten Menge an CO₂ pro Tonne Produkt – eingegangen werden.

Sicherlich können die im folgenden dargestellten Extrapolationen der Ergebnisse dieser Studie auf die entsprechenden Industrien lediglich dazu dienen das Potential aufzuzeigen, welches durch die Nutzung von digitalen Technologien zur Prozessoptimierung und Umsetzung neuer Prozessführungen gehoben werden könnte. Das konkrete Potential und die Umsetzung von Maßnahmen zur Ressourceneffizienzsteigerung sind maßgeblich von der Gestaltung der Prozesse – meist eingebettet in Prozessketten und -abläufe – abhängig und können schwerlich generalisiert werden. Bemerkenswerter Weise konnte bezogen auf das Jahr 1990 in Deutschland eine Reduktion des auf das BIP-normierten CO₂-Ausstoßes um 38 % erzielt werden (Zahlen von 2008) [21], wengleich der Energiebedarf – womit der CO₂-Ausstoß korreliert – der deutschen Industrie seit dem Jahr 2000 nahezu konstant im Bereich zwischen 2,3 und 2,8 GJ pro 1.000 € Produktionswert stagniert [22]. Den Löwenanteil im Bereich der Prozess bedingten CO₂-Emissionen nimmt in Deutschland der Bereich „Keramik, verarbeitete Steine und Erden“ ein (18,7 Mio. von in Summe 45,8 Mio. Tonnen CO₂ im Jahr 2016) [23], für chemische Erzeugnisse liegt der Wert der Prozess bedingten Emissionen bei etwa 5,8 Mio. Tonnen, für die gesamte Herstellung chemischer Erzeugnisse werden 30,5 Mio. Tonnen für das Jahr 2013 berichtet [24]. Sollte sich für die gesamte Herstellung chemischer Erzeugnisse allein durch die Anpassung von Prozessparametern unter Zuhilfenahme digitaler Technologien das Potential einer Klimateffizienzsteigerung von 4,3 % heben lassen welches in dieser Studie nur durch die Anpassung der Vergasungstemperatur simulativ ermittelt werden konnte (vgl. Tabelle 8), entspräche dies demnach einer beträchtlichen CO₂-Einsparung von 1,3 Mio. Tonnen. Für gesamt Baden-Württemberg listet das Statistische Landesamt [25] für das Jahr 2016 über den Industriesektor (ohne Strom- und Fernwärmeverbrauch) kumuliert CO₂-Emissionen von 8,6 Mio. Tonnen. Ebenfalls unter o.g. Annahme einer Effizienzsteigerung um 4,3 % ergibt sich hier ein Einsparpotential von 0,36 Mio. Tonnen CO₂.

Exemplarisch sollen im Folgenden die Ergebnisse der Prozesssimulation dieser Studie auf die gesamtdeutsche Zementindustrie extrapoliert werden. Im Jahr 2017 wurde in der deutschen Zementindustrie für die Herstellung von 34 Mio. Tonnen Zement 52,4 Mio. Tonnen Rohstoff eingesetzt [18]. Daraus ergibt sich in Anlehnung an o.g. Definition der Ressourceneffizienz ein Wert von $\eta_{\text{Ress}} = 64,8 \%$. Dieser Wert entspricht in etwa dem in Abschnitt 5.1 berichteten Wert für die Alitherstellung auf Basis der Prozesssimulation dieser Studie (63 %).

In [26] wird für die Zementindustrie ein über die letzte Dekade nahezu konstanter Wert von etwa 30 Mio. Tonnen CO₂ berichtet. Mit der in dieser Studie ermittelten Klimateffizienz von 974 kg_{CO2}/t_{Zement} für die Alitherstellung entspricht dies einer Produktionsmenge von knapp 30 Mio. Tonnen Zement, was sich gut mit den o.g. Werten für das Jahr 2017 deckt.

Überträgt man nun die potentielle Ressourceneffizienzsteigerung um 15 % zwischen der Alitherstellung und der Zementherstellung nach dem Celiment-Verfahren (Variante 2, siehe Tabelle 4) auf diesen integralen Wert, so zeigt sich ein mögliches Einsparpotential von gut 7,8 Mio. Tonnen Rohstoffeinsatz. Mit analoger Übertragung der Simulationsergebnisse dieser Studie auf die integralen Werte der gesamtdeutschen Zementindustrie ergibt sich eine potentielle Steigerung der Klimateffizienz um 48 % was einem Einsparpotential an emittiertem CO₂ von 14,1 Mio. t CO₂ entspricht.

Diese genannten Extrapolationen geben eine Einschätzung des Potentials, welches hinsichtlich Ressourceneffizienz in der Prozessindustrie teils ungenutzt vorhanden ist und unter anderem durch Maßnahmen wie der Nutzung von neuen digitalen Technologien sowie insbesondere auch durch disruptive Prozessinnovationen gehoben werden könnten.

Das Potential hinsichtlich der Ressourceneffizienz anderer neuer Digitalisierungswerkzeuge lässt sich derzeit hingegen kaum in Zahlen greifen. Beispielhaft sei hier die additive Fertigung genannt: Auch wenn vereinzelt aus der industriellen Praxis Erfolgsmeldungen publiziert werden (siehe z.B. Literaturbeispiel 10 in Abschnitt 2.3.2), so haben sich auch in den Experteninterviews die Aussagen der DECHEMA e.V. in ihrer „Roadmap Chemical Engineering“ [27] bestätigt: Die additive Fertigung bietet die Chance maßgeschneiderte Reaktoren und Prozesskomponenten zu fertigen, welche letztendlich die Leistungsfähigkeit des Prozesses – und ggf. auch die Ressourceneffizienz – steigern, wengleich sich die Technologie derzeit noch in einer Forschungsphase befindet in der sowohl in Theorie als auch Praxis noch weitere Fortschritte erzielt werden müssen für eine breite Anwendbarkeit dieser Technologie mit all ihren vielversprechenden Chancen.

6. Zusammenfassung der Projektergebnisse

Das Teilprojekt „Prozess 4.0“ im Rahmen des BW-Plus Verbundvorhabens „Ultraeffizienz und Digitalisierung“ legte erstmals den Schwerpunkt auf die Betrachtung des Digitalisierungspotenzials in der Prozessindustrie, die insbesondere Chemie, Zement, Metallurgie und Abfall-/Entsorgungswirtschaft umfasst.

Bestandsaufnahme und Transparenz der Digitalisierungsthemen

Eine strukturierte Bestandsaufnahme der Digitalisierungsthemen mittels Literaturrecherche, repräsentativen Experteninterviews und transparenter Auswertung zeigte die Wichtigkeit von digitalen Technologien und Werkzeugen insbesondere für die Produktion. Minimierung von Verlusten, Beherrschung von Komplexität und Optimierung der Betriebsführung stehen im Vordergrund. Wesentliche Ressourcen sind Energieträger, Einsatzstoffe und (mittelbar über Kosteneffizienz) Kapital. Keine Digitalisierungstechnologie bzw. kein Digitalisierungswerkzeug dominiert. Jedoch steht die Nutzung der Daten der meist hoch automatisierten Prozesse insgesamt an erster Stelle, wenn es um Ressourceneffizienz geht. Roadblocks können die Komplexität insgesamt, die Ressource Mensch (notwendige Ausbildung und das lebenslange Lernen) sowie die Flexibilisierung der Rahmenbedingungen sein. Insbesondere Mittelstandsunternehmen benötigen im komplexen Digitalisierungsumfeld Unterstützung bei der Implementierung mit begrenztem Aufwand, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Nachvollziehbare, messbare Fallbeispiele zur Bewertung des Digitalisierungseinflusses auf die Ressourceneffizienz fehlen nahezu vollständig: einerseits werden aus Wettbewerbsgründen in der Regel keine Daten bereitgestellt, andererseits wirken meist mehrere Technologien oder Werkzeuge zusammen und es sind viele davon noch nicht umfassend implementiert.

Ressourceneffizienzbewertung mit ganzheitlichem Indikatorsatz und Fallbeispiele

Um diese Problematik zu umgehen, wurden Prozessindustriebeispiele aus der Großforschung, die Prozessdaten zur Verfügung stellen kann, bewertet. Die Bewertung erfolgte in den Dimensionen Ressourceneffizienz, Energieeffizienz, Exergieeffizienz und Klimateffizienz, um Trade-offs zwischen den wichtigsten Zielsetzungen deutlich zu machen. Die Beschränkung auf den Indikator „Ressourceneffizienz“ ist unzureichend, da Produktionsprozesse beispielsweise mehrere Ressourcen gleichzeitig benötigen und mit dem Ziel einer minimalen Umweltauswirkung einen relativ hohen Verbrauch an (unkritischen) Ressourcen zeigen können. Betrachtungen und Optimierungen müssen immer ganzheitlich erfolgen, eine maximale Ressourceneffizienz kann beispielsweise steigende erneuerbare Energiebedarfe und sogar zusätzliche CO₂-Emissionen zur Folge haben.

Mittels umfassender Prozesssimulation wurden zwei Beispielthemen bearbeitet, deren Daten am KIT durch Produktionsanlagen im Demonstrationsmaßstab vorhanden sind: a) Erneuerung des besonders klimarelevanten Industriesektors „Steine und Erden“ durch Kalk- bzw. CO₂-arme Zementherstellungsverfahren; b) synthetische Kraftstoffherstellung auf Basis nachhaltiger biogener Einsatzstoffe.

Auswirkung der Digitalisierung auf die Ressourceneffizienz

Die Potentialbewertung mit ganzheitlichem Ansatz zeigte im Fall a) das hohe Potential disruptiver Technologieinnovationen durch Anwendung des Digitalisierungswerkzeugs „Simulation“: eine drastische Reduzierung der CO₂-Emissionen in Baden-Württemberg bei ca. 15%iger Erhöhung der Ressourceneffizienz und gleichbleibender Energieeffizienz. Im Fall b) wurde beispielhaft eine 5%-ige Erhöhung der Ressourceneffizienz durch Anwendung von KI / big data aufgezeigt.

Handlungsempfehlungen

Digitalisierung kann in der Prozessindustrie 5 – 10% weitere Ressourceneffizienz ermöglichen. Effizienzgewinne betreffen Rohstoffeinsatz, Energieaufwand und Verringerung des Ausstoßes von Treibhausgasen. Dies hat einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit wegen der Dominanz der Rohstoff- und Energiekosten in den Herstellkosten der Produkte. In der Prozessindustrie liegt auch der größte Einfluss auf den Ressourcenverbrauch des Industriesektors insgesamt. Der Einsatz von KI / datenbasierten Methoden hat hierbei das größte Potential. Wegen des Implementierungsaufwands und der notwendigen Expertise benötigen gerade KMUs hierbei Unterstützung. Praxisbeispiele und gezielter fachlicher Austausch in geeigneten Foren ist ebenfalls gerade für KMU besonders wünschenswert.

Die Ergebnisse des Projekts wurden am 18.9.2019 im Forum Chemie 4.0, veranstaltet durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft BW, den Verband der Chemischen Industrie BW und das KIT, vorgestellt. Mit diesem Forum unter dem Thema „Ressourceneffizienz durch Digitalisierung in der Prozessindustrie“ mit mehr als 70 Vertretern besonders der mittelständischen Industrie, von Technologieprovidern und Interessierten wurde der praxisbezogenen Austausch für das Themengebiet mit Fokus Chemische Industrie erfolgreich etabliert.

7. Allgemeines Literaturverzeichnis

- [1] VDI Zentrum Ressourceneffizienz, „Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0; Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes,“ Juni 2017. [Online]. Available: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie_Ressourceneffizienz_durch_Industrie_4.0.pdf. [Zugriff am 30 August 2019].
- [2] VERBAND DER CHEMISCHEN INDUSTRIE e.V., „Chemie 4.0 Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.vci.de/services/publikationen/broschueren-faltblaetter/vci-deloitte-stuideo-chemie-4-punkt-0-langfassung.jsp>. [Zugriff am 30 August 2019].
- [3] „DIN V 19233: Leittechnik – Prozessautomatisierung– Automatisierung mit Prozessrechensystemen, Begriffe,“ Deutsches Institut für Normung e. V..
- [4] „Intelligente Steuerung und Regelung für flexible Automatisierung,“ Frauenhofen IEM, Heinz Nixdorf Institut, 2015.
- [5] „Zentrum für Internet of Things und AI,“ [Online]. Available: www.ziot.de/internet-of-things. [Zugriff am 24 Mai 2019].
- [6] „Institut für Umweltforschung, RWTH Aachen,“ [Online]. Available: <http://www.bio5.rwth-aachen.de/index.php/forschung/modellierung-und-simulations/9-definition-modellierung-und-simulation>. [Zugriff am 23 Mai 2019].
- [7] „Digitale Fabrik Grundlagen VDI-Richtlinie 4499, Blatt 1,“ *VDI Richtlinien*, p. 3, Februar 2008.
- [8] NASA, „Technology Readiness Level,“ NASA, [Online]. Available: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html. [Zugriff am 23 September 2019].
- [9] „Fortissimo Case Studies - Enabling Manufacturing SMEs to benefit from High-Performance-Computing-Cloud-based Simulations,“ 2016.
- [1] L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli und J. Fischer, „Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes,“ 2017.
- [1] „Umweltbundesamt / "Chemikalienleasing",“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/chemikalien-reach/forschungs-entwicklungsvorhaben/chemikalienleasing>. [Zugriff am April 2019].
- [1] „Siemens / "Digital factory and lean management",“ [Online]. Available: <http://w2.siemens.com.cn/stories/StoryShow/GetStoryDetail/107?culture=en-US&sourceId=1>. [Zugriff am April 2019].
- [1] Verein Deutscher Ingenieure, Methoden zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren VDI-Richtlinie 3925, Blatt 1, Berlin: Beuth Verlag, 2016.
- [1] Verein Deutscher Ingenieure, Ressourceneffizienz, Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien VDI-Richtlinie 4800, Blatt 1, Berlin: Beuth Verlag, 2016.
- [1] Verein Deutscher Ingenieure, Kumulierter Energieaufwand (KEA), Begriffe, Berechnungsmethoden VDI-Richtlinie 4600, Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [1] Verein Deutscher Ingenieure, Energiekenngrößen, Grundlagen-Methodik VDI-Richtlinie 4661, Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [1] Verein Deutscher Ingenieure, Umrechnung spezifischer Emissionen bei der Energieumwandlung VDI-Richtlinie 4660, Blatt 2, Berlin: Beuth Verlag, 2017.
- [1] „Verein Deutscher Zementwerke "Zementindustrie im Überblick 2018/2019““.
- [1] Umwelt Bundesamt, „Spezifische Emissionsfaktoren für den deutschen Strommix,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/spezifische-emissionsfaktoren-fuer-den-deutschen>. [Zugriff am 20 Januar 2018].
- [2] Karlsruhe Institute of Technology, „bioliq Biomass to Liquid Karlsruhe,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.bioliq.de/55.php>.
- [2] „Statistisches Bundesamt / "Veränderung der CO2-Emissionen je produzierter BIP-Einheit",“ [Online]. Available:

- <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167888/umfrage/veraenderung-der-co-emissionen-weltweit-je-produzierter-bip-einheit/>. [Zugriff am Mai 2019].
- [2
2] „Statistisches Bundesamt / "Energieverbrauch der Industrie in Deutschland im Verhältnis zum Produktionswert",“ [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/240703/umfrage/energieeffizienz-der-industrie-in-deutschland/>. [Zugriff am Mai 2019].
- [2
3] „Statistisches Bundesamt / "Prozessbedingte CO2-Emissionen in Deutschland nach ausgewählten Produktionsbereichen",“ [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/510783/umfrage/industrielle-co2-emissionen-nach-sektor/>. [Zugriff am Mai 2019].
- [2
4] „Statistisches Bundesamt / "Kohlendioxid-Emissionen bei der Herstellung von chemischen Erzeugnissen in Deutschland",“ [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/483449/umfrage/kohlendioxid-emissionen-bei-der-herstellung-von-chemischen-erzeugnissen-in-deutschland/>.
- [2
5] „Statistisches Landesamt Baden-Württemberg / "Kohlendioxid-Emissionen nach Sektoren - Verursacherbilanz",“ [Online]. Available: <https://www.statistik-bw.de/Umwelt/Luft/22503045.tab?R=LA>. [Zugriff am Mai 2019].
- [2
6] Verein Deutscher Zementwerke e.V., Zement Taschenbuch, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2002.
- [2
7] „Roadmap Chemical Engineering,“ DECHEMA e.V., Frankfurt a.M., 2017.
- [2
8] „Deutsche Leasing AG / "Aus Tradition innovativ",“ [Online]. Available: <https://www.deutsche-leasing.com/de/themenwelt/mittelstand-4-0/produktion4-0>. [Zugriff am 24 Mai 2019].
- [2
9] Bilfinger, *Digitalisierung setzt neue Benchmarks bei der Prozessindustrie*, Berlin: Online Verfügbar: https://www.wvis.eu/fileadmin/wvis_downloads/Termine/Vortraege-OMV-2018/2018-06-06-Bilfinger-Franz-Braun-Digitalization-WVIS-Treffen-Berlin.pdf, 2018.
- [3
0] „Chemie Technik / "Bilfinger startet Pilotprojekt zur Digitalisierung mittelständischer Chemieunternehmen",“ [Online]. Available: <https://www.chemietechnik.de/bilfinger-startet-pilotprojekt-zur-digitalisierung-mittelstaendischer-chemieunternehmen/>. [Zugriff am 2019 Mai 24].
- [3
1] „INOSIM Software GmbH,“ [Online]. Available: <https://www.inosim-software.com/index.php/de/referenzen/success-stories/469-prozessentwicklung-und-optimierung-durch-scale-up-eines-biotechnologischen-prozesses.html>. [Zugriff am 24 Mai 2019].
- [3
2] „Siemens / "Siemens sets innovation milestone with first 3D-printed parts for industrial steam turbine",“ [Online]. Available: [https://www.siemens.com/press/en/feature/2018/powergenerationservices/2018-04-3d-parts.php?content\[\]=PS](https://www.siemens.com/press/en/feature/2018/powergenerationservices/2018-04-3d-parts.php?content[]=PS). [Zugriff am 24 Mai 2019].
- [3
3] P. Stemmerman, U. Schweike, K. Garbev und G. Beuchle, „Celitement-eine nachhaltige Perspektive für die Zementindustrie,“ *CEMENT INTERNATIONAL*, Bd. Vol.8, pp. 52-66, 2010.
- [3
4] M. Eberhardt, *Leitsystem Bioliq Vorlagen*, Karlsruhe, 2016.

Anhang

A. Aufgeschlüsselte relative Häufigkeit: Herausforderungen und Limitierungen

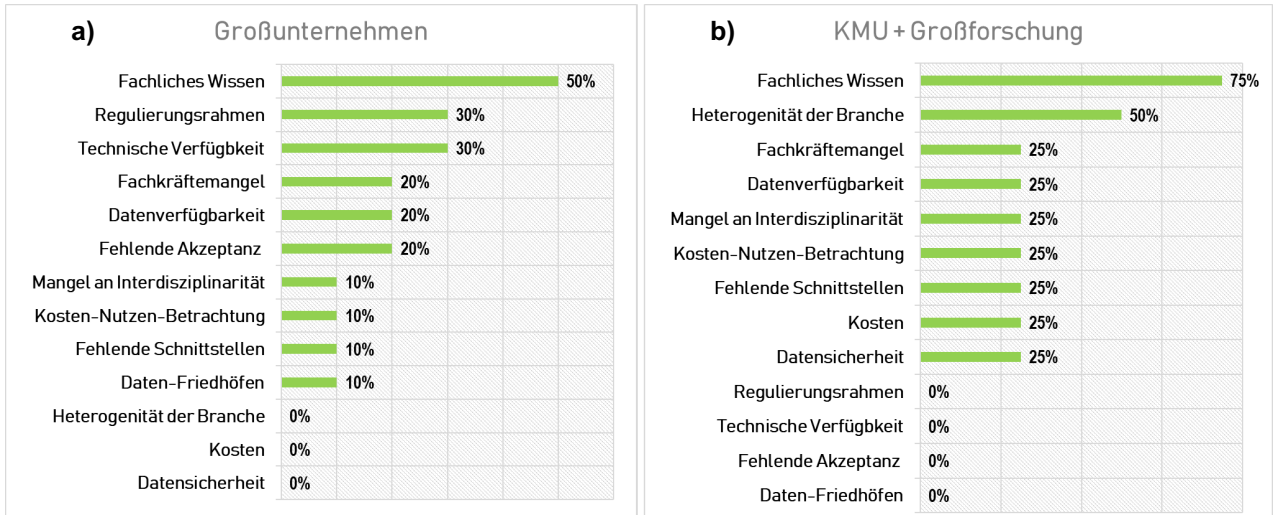


Abbildung 19: Relative Häufigkeit: Herausforderungen und Limitierungen beim Einsatz von digitalen Technologien Aufgeschlüsselt nach Großunternehmen (a) und KMU + Großforschung (b)

B. Aufgeschlüsselte relative Häufigkeit: Geplante digitale Technologien und Werkzeuge

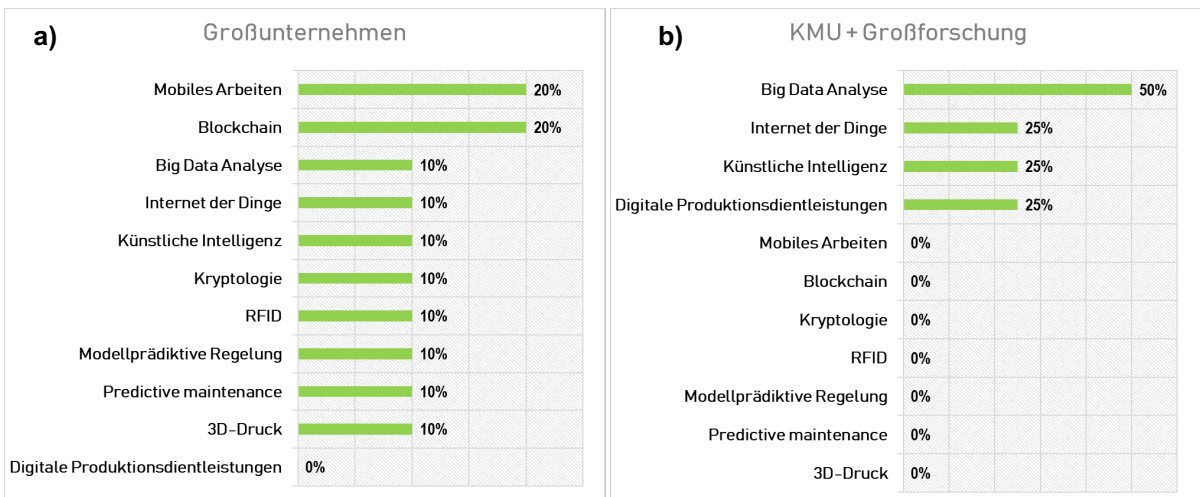
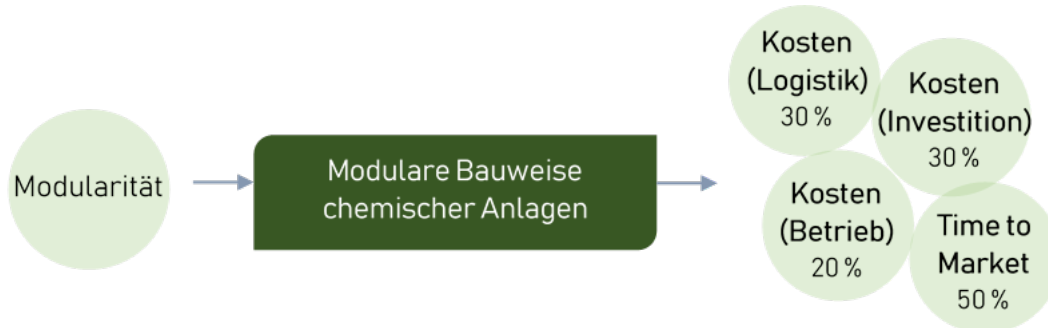


Abbildung 20: Relative Häufigkeit Geplante digitale Technologien Aufgeschlüsselt nach Großunternehmen (a) und KMU + Großforschung (b)

C. Zusätzliche Beispiele aus dem Experteninterviews

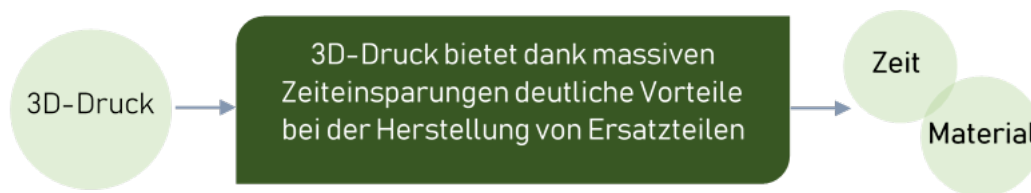
Bsp. 4: Modulare Anlagen

Durch die modulare Bauweise chemischer Anlagen werden Einsparungen in verschiedenen Bereichen erzielt bspw. in der Logistik, in der Entwicklung sowie im Betrieb und im Investitionsbereich.



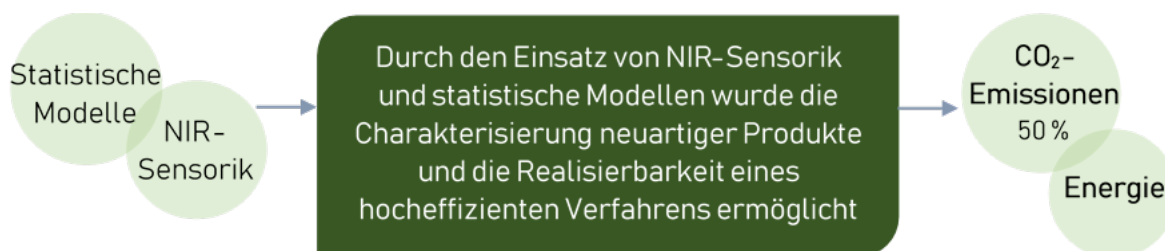
Bsp. 5: Mit 3D-Druck schneller zum Produkt

3D-Druck wird für den Prototypenbau, die Kleinserienfertigung, die Ersatzteileherstellung und insbesondere für komplette Neuentwicklungen eingesetzt. Die Technologien der additiven Fertigung ermöglichen neben der Nutzung vom Bauraum und der Fertigung von optimierten Geometrien, auch Material- (kein Verschnitt) und vor allem massive Zeiteinsparungen. Aufgrund dieser Zeiterparnis ist der 3D-Druck für die Ersatzteilherstellung von hoher Relevanz. Allerdings stellt die Entwicklung und Herstellung von Komponenten, die mit gängigen Herstellungsverfahren nicht möglich ist, die größte Motivation für den Einsatz dieser Technologien dar.



Bsp. 6: Einsatz von NIR-Sensorik und statistischen Modellen zur Charakterisierung neuartiger Produkte

Für die Realisierbarkeit eines innovativen Herstellungsprozesses von hochleistungsfähigen hydraulischen Bindemitteln war es notwendig ein Nahinfrarotspektroskopie-basiertes Sensorsystem einzusetzen und die damit gewonnenen Spektren mittels statistischer Modelle auszuwerten. Der innovative Herstellungsprozess ist energetisch hoch effizient und ermöglicht eine 50 prozentige Reduktion der CO₂-Emissionen (im Vgl. zum traditionellen Herstellungsprozess ähnlicher Produkte)



D. Anwendungsbeispiele

Nr.	Anwendungsbeispiel	Quelle
1	Online-Prozesssteuerung beim Industriellen Schmieden	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 45
2	Sensorgestützte Sortieranlage zur Metallausschleusung erhöht die Recyclingrate von Metall	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 45
3	Optimierung von Hilfs- und Betriebsstoffen durch dynamische Prozesssteuerung bei der Behandlung von Stahl	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 47
4	Nahrungsmittelindustrie, Fahrzeugbau, Metallerzeugung und Kunststoffindustrie: Abschaltung von Maschinen in Schwachlastzeiten	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 46
5	Bedarfsgerechte Steuerung in der Fertigung von Statoren	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 47
6	Bedarfsgerechtes Ansteuern elektronischer Motoren in der Fertigung	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 47
7	Intelligente Steuerung der Prozessperipherie	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 48
8	Galvanisieren - Online-Überwachung	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 49
9	Universität Duisburg-Essen & Hochschule Kempen - Software zur Erkennung von Optimierungspotenzialen durch Data-Mining	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 45
10	MSR Technologies GmbH - Steuerung von industriellen Verfahren durch Datenmonitoring	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 49
11	Metallurgisches Internet der Dinge	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 55
12	Digitalisierung der Landwirtschaft (Precision Farming)	Deloitte and VCI, "Chemie 4.0 - Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch," 2017, pp 30

13	US Food and Drug Administration (FDA) das Epilepsie-Medikament „Spritam“ als weltweit erste 3D-gedruckte Tablette zugelassen.	Deloitte and VCI, “Chemie 4.0 Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch,” 2017
14	Additiv gefertigter prototyp des Frontflügel für ein Formel 1 Rennauto	Electro Optical Systems: “Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung.” [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/additive-fertigung-von-front-spoiler-mockups-bei-williams-martini-racing [Accessed: 23-Sep-2019]
15	Schnelle Produktion von hochwertigen Durchflussmessgeräten zu geringen Kosten mit Additiver Fertigung	Electro Optical Systems, “Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung.” [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen [Accessed: 23-Sep-2019]
16	Technologie zur Serienherstellung von Produkten aus Gold mittels additiver Fertigung	Electro Optical Systems, “Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung.” [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/glaenzende_aussichten [Accessed: 23-Sep-2019]
17	Digitalisierung beim industriellen Schmieden	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, “Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes,” 2017, pp 45
18	Industriellen Schmieden - bedarfsgerechte Beheizung der Glühöfen (Echtzeit EB)	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, “Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes,” 2017, pp 45
19	Softwaregestützte Auslegung von Extruder- und Plastifiziereinheiten	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, “Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes,” 2017, pp 49
20	Verschnittminimierung durch Online-Schneidepläne	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, “Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes,” 2017, pp 49
21	Digitale Zwillinge als Methode für die Optimierung der Chemieproduktion	Deloitte and VCI, “Chemie 4.0 - Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch,” 2017
22	Simulation-based product design in high-pressure polymerization technology	Dechema, “Roadmap Chemical Reaction Engineering,” no. May 2017, pp 39
23	BASF - Development of a high-fidelity, detailed kinetic model of its batch expanded-polystyrene process	World Economic Forum, “Digital Transformation Initiative: Chemistry and Advanced Materials Industry,” no. January 2017, pp 13

24	Lonza - HPC-Cloud-based molecular simulation	M. Winter, "Digitization in the Chemical Industry," in PRACE Scientific & Industrial Conference, 2016, pp 26
25	Labor-am-Chip-Systeme (Lab on Chip)	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 53
26	Fraunhofer IFF - Software für die virtuelle Produktentwicklung und Inbetriebnahme für eine konsequente, digital unterstützte Parallelisierung der Entwicklung	M. Schenk, "9. Fachtagung »Anlagenbau der Zukunft«,“ in Anlagenbau 4.0 – Stand und Perspektiven für Betreiber, Planer und Kontraktoren, 2016
27	Airliquide - Connected Eyewear – Visualizing Information in Augmented Reality	World Economic Forum, "Digital Transformation Initiative: Chemistry and Advanced Materials Industry," no. January, 2017
28	Fully-digital design of Boeing 777/787 and ARJ21 aircrafts	J. Zhou, "Digitalization and intelligentization of manufacturing industry," <i>Adv. Manuf.</i> , vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2013, pp 5
29	Data and Models for Digital Construction of In-service Pipelines	Wang Jinzhu, Wang Zegen, Duan Linlin et al. "Data and Models for Digital Construction of In-service Pipelines; Oil & Gas Storage and Transportation", 2010, pp 4
30	Smarte Produktionsdienstleistungen	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 50
31	Steigerung von Transparenz und Effizienz in der Fertigung	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, pp 52
32	Endress+Hauser - Vorausschauende Wartung mit Proline 300 und dem Industrie 4.0 Ready-Konzept	C. Rützel, Endress+Hauser Messtechnik "Digitalisierung in der Prozessindustrie. Vorausschauende Wartung mit Proline 300 und dem Industrie 4.0 Ready-Konzept," 2017. [Online]. Available: https://www.chemanager-online.com/themen/mess-automatisierungstechnik/digitalisierung-der-prozessindustrie . [Accessed: 16-Apr-2018].
33	Sogeti - Additive Fertigung für den neuen A350 XWB	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen . [Accessed: 11-Apr-2018]
34	Erstflug einer 3D-gedruckten Komponente der primären Flugsteuerung im Airbus A380	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen [Accessed: 23-Sep-2019]

35	Additive gefertigtes Bauteil mit integrierten Kühlkanälen aus Aluminium	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/case_studies/erstflug-einer-3d-gedruckten-komponente-der-primären-flugsteuerung [Accessed: 23-Sep-2019]
36	Additiv gefertigte Kühlung für Formula Student-Rennwagen	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenz/automobil-dhbw-engineering_additiv-gefertigte-kuhlung-fuer-formula-student-rennwagen [Accessed: 23-Sep-2019]
37	3D gedruckter Greifer in 4 statt 21 Tagen hergestellt. Kostenerstparnis 50%	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. Available: https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/industrieller-3d-druck-ermoglicht-neue-geschaeftpotenziale [Accessed: 23-Sep-2019]
38	Additiv gefertigter Mikrobrenner zur optimalen Verbrennung von gasförmigen und flüssigen Kraftstoffen	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/industrie-euro-k-additiv-gefertigter-mikrobrenner-zur-optimalen-verbrennung-von-gasformigen-und-flussigen-kraftstoffen-6fd7bcf33bb81d5b [Accessed: 23-Sep-2019]
39	Herstellung bionischer Assistenzsysteme mittels additiver Fertigung	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/festo [Accessed: 23-Sep-2019]
40	Senkung der Wartungskosten von industriellen Gasturbinen durch Reparaturtechnologie auf Basis der Additiven Fertigung	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/siemens [Accessed: 23-Sep-2019]
41	Bau einer additiv gefertigte Roboterhand für den Pharmabereich	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/case_studies/eos-ass-maschinenbau-fertigt-additiv-roboterhand [Accessed: 23-Sep-2019]
42	Additive Fertigung von Formeinsätzen mit optimierten Kühlkanälen durch additive Fertigung ermöglicht signifikante Einsparungen	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/fwb [Accessed: 23-Sep-2019]
43	Additive Fertigung ermöglicht konturnahe Kühlkanäle für optimale Abführung der beim Produktionsvorgang entstehenden Wärme beim Spritzgießen	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/innomia [Accessed: 23-Sep-2019]

44	Produktivitätsgewinn bei geringer Ausschussquote bei der Herstellung von Spritzgussteilen durch Nutzung additiv gefertigter Werkzeugen mit konturnahen Kühlkanälen	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/salcomp [Accessed: 23-Sep-2019]
45	Maximale Gestaltungsfreiheit und Flexibilität bei der Herstellung von Orthesen durch additive Fertigung	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/orthesen-additiv-gefertigt [Accessed: 23-Sep-2019]
46	Produktion eines passgenauen Schädelimplantats mittels Additiver Fertigung	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/medizin-alphaform-passgenaues-schadelimplantat-additiv-gefertigt-971719034f7b1302 [Accessed: 23-Sep-2019]
47	Biokompatiblen Werkstoffs für additiv gefertigte Implantate	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/universitaet-michigan-biokompatibler-werkstoff-zur-additiven-fertigung [Accessed: 23-Sep-2019]
48	BEGO USA - Patientenspezifischer Zahnersatz aus leistungsfähigen Legierung mit Additiver Fertigung	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. Available: https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen . [Accessed: 11-Apr-2018]
49	Additive Fertigungstechnologie beschleunigt Entwicklung medizinischer Instrumente	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/deputy-spine [Accessed: 23-Sep-2019]
50	Herstellung stereotaktischer Plattformen für die Neurochirurgie mittels additiver Fertigung	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/fhc [Accessed: 23-Sep-2019]
51	Additiv gefertigten Schädelimplantate	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/additive_gefertigte_schaedelimplantate [Accessed: 23-Sep-2019]
52	Additiv gefertigten Schädel, Kiefer- und Gesichtsimplantate	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/kundenreferenzen/ceit-additive-fertigung-fuer-kranio-implantate [Accessed: 23-Sep-2019]

53	Alphaform - Passgenaues Schädelimplantat additiv gefertigt	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. Available: https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen . [Accessed: 11-Apr-2018]
54	Additiv gefertigtes Kniegelenk für einen Kater	Electro Optical Systems, "Anwendungsbeispiele für die Anwendung additiver Fertigung." [Online]. https://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/cyrano [Accessed: 23-Sep-2019]
55	Microsens - Entwicklung einer Managementsoftware zur Überwachung und Datenauswertung sämtlicher Sensor-, Nutzungs- oder Performedaten	N. Zacharias, "Industrie- und Gebäudeautomation in einer einzigen IP-Infrastruktur. Von der Produktion bis zum Backoffice," 2018. [Online]. Available: https://wirautomatisierer.industrie.de/systeme/datenkommunikation-security/von-der-produktion-bis-zum-backoffice/ . [Accessed: 16-Apr-2018]
56	Bachmann - Automatisierung von Batteriespeichern	"Bachmann: Automatisierung von Batteriespeichern," 2018. [Online]. Available: https://wirautomatisierer.industrie.de/systeme/datenkommunikation-security/bachmann-automatisierung-von-batteriespeichern/ . [Accessed: 16-Apr-2018]
57	BASF - Ausbildung mit Tablet und digitalem Notizbuch	Bundesarbeitgeberverband Chemie e.V., "Lernen für das Arbeiten 4.0," 2018. [Online]. Available: https://www.chemie-arbeitgeber.de/digitalisierung/lernen-fuer-das-arbeiten-40/ . [Accessed: 16-Apr-2018].
58	Provalidis - Virtuelles Training für die Anlage	Bundesarbeitgeberverband Chemie e.V., "Lernen für das Arbeiten 4.0," 2018. [Online]. Available: https://www.chemie-arbeitgeber.de/digitalisierung/lernen-fuer-das-arbeiten-40/ . [Accessed: 16-Apr-2018].
59	Sächsische Bildungsgesellschaft - Mit Datenbrille an die Analyse	Bundesarbeitgeberverband Chemie e.V., "Lernen für das Arbeiten 4.0," 2018. [Online]. Available: https://www.chemie-arbeitgeber.de/digitalisierung/lernen-fuer-das-arbeiten-40/ . [Accessed: 16-Apr-2018].
60	BASF-Supercomputer liefert Beitrag zur Digitalisierung in der Forschung	B. Lau, "BASF-Supercomputer in Ludwigshafen gestartet," <i>Presse-Information</i> , 2017. [Online]. Available: https://www.basf.com/de/company/news-and-media/news-releases/2017/10/p-17-332.html . [Accessed: 17-Apr-2018] B. Lau, "BASF baut mit HPE einen Supercomputer für die globale Chemieforschung," <i>Gemeinsame Presse-information</i> , 2017. [Online]. Available: https://www.basf.com/de/company/news-and-media/news-releases/2017/03/p-17-152.html . [Accessed: 17-Apr-2018]
61	Digitale Zwillinge von Häfen in Rotterdam oder Hamburg	U. Weber, "Wie Unternehmen von einem digitalen Zwilling profitieren," <i>Computerwoche von IDG</i> , 2018. [Online]. Available: https://www.computerwoche.de/a/wie-

		unternehmen-von-einem-digitalen-zwilling-profitieren,3544454. [Accessed: 18-Apr-2018]
62	Porsche - Vergleich aller Fertigungsschritte in Echtzeit mit einem digitalen Abbild	U. Weber, "Wie Unternehmen von einem digitalen Zwilling profitieren," <i>Computerwoche von IDG</i> , 2018. [Online]. Available: https://www.computerwoche.de/a/wie-unternehmen-von-einem-digitalen-zwilling-profitieren,3544454 . [Accessed: 18-Apr-2018]
63	Siemens - Werk in Amberg gilt als Paradebeispiel für eine intelligente Fabrik und auch für die Umsetzung eines Digital Twin im großen Maßstab	U. Kreutzer, "Digitale Fabrik 99,99885 Prozent Qualität," <i>Pictures of the Future</i> , pp. 1–5, 2014
64	Siemens - Digitale Ölsuche mit Ultraschall	C. Rüth, "Die Zukunft von Öl und Gas : Digitale Ölsuche mit Ultraschall," <i>Pictures of the Future</i> , pp. 3–5, 2017.
65	GlaxoSmithKline - Reaction Monitoring Using Mid-Infrared and Ultraviolet Spectroscopy	L. L. Simon <i>et al.</i> , "Assessment of recent process analytical technology (PAT) trends: A multiauthor review," <i>Org. Process Res. Dev.</i> , vol. 19, no. 1, pp. 3–62, 2015
66	AstraZeneca - Temperature Cycling and Adaptive Direct Nucleation Control (ADNC) for the production of AZD7009, a potential cardiovascular drug	L. L. Simon <i>et al.</i> , "Assessment of recent process analytical technology (PAT) trends: A multiauthor review," <i>Org. Process Res. Dev.</i> , vol. 19, no. 1, pp. 3–62, 2015
67	Machine-assisted organic synthesis using camera-enabled techniques	S. V. Ley, R. J. Ingham, M. O'Brien and D. L. Browne, "Camera-enabled techniques for organic synthesis," <i>Beilstein J. Org. Chem.</i> , vol. 9, pp. 1051–1072, 2013
68	Prototype continuous-flow liquid–liquid extraction system using open-source technology combined with a a simple webcam setup	M. O'Brien, P. Koos, D. L. Browne, and S. V. Ley, "A prototype continuous-flow liquid–liquid extraction system using open-source technology," <i>Org. Biomol. Chem.</i> , vol. 10, no. 35, p. 7031, 2012
69	Siemens - Nahtloser Austausch von Engineering-Daten mit der Software COMOS	Siemens AG, "Digitalisierung über den Life-Cycle," 2018. [Online]. Available: https://www.siemens.com/global/de/home/branchen/chemische-industrie/digitalisierung.html . [Accessed: 24-Apr-2018].
70	Siemens - Softwarewerkzeuge zur Simulation anstelle von Prototypen	Siemens AG, "Digitalisierung über den Life-Cycle," 2018. [Online]. Available: https://www.siemens.com/global/de/home/branchen/chemische-industrie/digitalisierung.html . [Accessed: 24-Apr-2018].

71	Siemens - Softwarewerkzeuge zur Simulation anstatt Prototypen	Siemens AG, "Digitalisierung über den Life-Cycle," 2018. [Online]. Available: https://www.siemens.com/global/de/home/branchen/chemische-industrie/digitalisierung.html . [Accessed: 24-Apr-2018].
72	Kingdom Holdings Ltd. (China) - Modernisierung eines Standorts	Siemens AG, "Digitalisierung über den Life-Cycle," 2018. [Online]. Available: https://www.siemens.com/global/de/home/branchen/chemische-industrie/digitalisierung.html . [Accessed: 24-Apr-2018].
73	Kingdom Holdings Ltd. (China) - Bau einer neuen, digitalen Fabrik (Siemens-Lösung)	Siemens AG, "Digitalisierung über den Life-Cycle," 2018. [Online]. Available: https://www.siemens.com/global/de/home/branchen/chemische-industrie/digitalisierung.html . [Accessed: 24-Apr-2018].
74	Windmöller & Hölscher - Synchronisierte Prozessschritte durch intelligent vernetzte Maschinen	Deutsche Leasing AG, "Aus Tradition innovativ," 2018. [Online]. Available: https://www.deutsche-leasing.com/de/themenwelt/mittelstand-4-0/produktion4-0 . [Accessed: 24-Apr-2018].
75	Hydro Aluminium Recycling Deutschland GmbH - Röntgenanlage und verschiedene Siebverfahren für die akkurate Sortierung innerhalb des Recyclingverfahrens	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017
76	Bsp. aus der chemischen Industrie: Anwendung des Informationssystems System TeBIS® der Firma Steinhaus zur Speicherung und Auswertung aller verfügbaren Daten über den Energie- und Materialverbrauch eines Produktionsbetriebs in einer zentralen Datenbank	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017, PP 50
77	Betriebsinformationssysteme in Kombination mit Messsensorik für CIP in einer Getränkeherstellungsfirma	Zettl, E.; Hawthorne, C.; Joas, R.; Lahl, U.; Litz, B.; Zeschmar-Lahl, B. und Joas A, "Analyse von Ressourceneffizienzpotenzialen in KMU der chemischen Industrie" Available: [http://www.bzl-gmbh.de/de/sites/default/files/VDI-ZRE-Chemiestudie-Ressourceneffizienz.pdf], 2014
78	„Chemikalien-Leasing“	L. Schebek, J. Kannengießer, A. Campitelli, and J. Fischer, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes," 2017
79	AkzoNobel Intertrac Vision – Boosting Fuel Efficiency with Advanced Analytics and Coatings	World Economic Forum, "Digital Transformation Initiative: Chemistry and Advanced Materials Industry," no. January, 2017

80	TRUMPF Lasertechnik - das eoda data science environment im Einsatz bei TRUMPF Lasertechnik	eoda GmbH, "Das eoda data science environment im Einsatz bei TRUMPF Lasertechnik," 2017. [Online]. Available: http://www.eoda.de/de/predictive-maintenance-bei-trumpf.html . [Accessed: 04-May-2018]
81	Technischen Universität Dresden - Das Pandora-System steht für die Digitalisierung im Labor 4.0	chemanager-online, "Das Labor der Zukunft," <i>GIT Labor-Fachzeitschrift</i> , 2018. [Online]. Available: https://www.chemanager-online.com/themen/forschung-labor/das-labor-der-zukunft . [Accessed: 04-May-2018]
82	Technischen Universität Dresden - Petrijet-Plattformtechnologie	chemanager-online, "Das Labor der Zukunft," <i>GIT Labor-Fachzeitschrift</i> , 2018. [Online]. Available: https://www.chemanager-online.com/themen/forschung-labor/das-labor-der-zukunft . [Accessed: 04-May-2018]
83	Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. - Energieautarke Sensorik und Interaktion mit mobilen Anwendern (BW)	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018. Plattform Industrie 4.0 [Online]. Available: https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Anwendungsbeispiele/188-esima/beitrag-esima.html [Accessed 15.5.18]
84	CHT Germany GmbH - Vernetzte Prozesssteuerung in der Chemie	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018. Plattform Industrie 4.0 [Online]. Available: https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Anwendungsbeispiele/364-cht-vernetzte-prozesssteuerung/beitrag-cht.html [Accessed 15.5.18]
85	Cassantec Prognostics - Prognosetechnologie für die Industrie: Datenbasierte Informationen über die Zukunft	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018. Plattform Industrie 4.0 [Online]. Available: https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Anwendungsbeispiele/241-cassantec-prognostics-prognosetechnologie-fuer-die-industrie/beitrag-cassantec-prognostics-prognosetechnologie-fuer-die-industrie.html [Accessed 15.5.18]
86	3D-Druck in der Schwerelosigkeit	NASA official website [Online]. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/explorer/Investigation.html?#id=1039 [Accessed: 23-Sep-2019]
87	Sonden zur Markierung von Fischen (zur Erstellung von wissenschaftlichen Bewegungsprofilen) hergestellt durch 3D-Druck	CSIRO [Online]. https://www.csiro.au/en/News/News-releases/2013/Scientists-use-3D-printing-to-track-big-fish [Accessed: 23-Sep-2019]

88	Potential zur Energie- und Emissionseinsparung durch Additive Fertigung im Falle von Leichtbaukomponenten in Flugzeugen	Huang, Runze, et al. "Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components." Journal of Cleaner Production 135 (2016): 1559-1570.
89	Additive Manufacturing (3D-printing) of spare parts for industrial gas turbines	Siemens [Online] https://www.energy.siemens.com/hq/en/services/industrial-applications/additive-manufacturing.html [Accessed: 07-Jun-2018]
90	Fallstudie (Metastudie): Herstellung eines Hebels durch Additive Fertigung im Vergleich zum Spritzguss	B.P. Conner et al., Additive Manufacturing 1-4 (2014) 64-76
91	Herstellung der Gießformen durch AM für unsichtbare Zahnspangen angepasst auf den individuellen Kiefer der jew. Patienten (Invisalign® Nennung in Metastudie).	B.P. Conner et al., Additive Manufacturing 1-4 (2014) 64-76
92	Designstudie zu optimierter Brennerspitze	Siemens [online] https://www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/industrie-und-automatisierung/die-zukunft-der-fertigung-fenchelfackel.html [Accessed: 14-Jun-2018]
93	Vergleich der Ressourcenbilanz (Energy, Roh- und Recyclingmaterial) am Beispiel der Reparatur eines Gasturbinenebrenners	F. Walachowicz et al. Journal of Industrial Ecology 21 (2017) S203-S215
94	Div. Fallbeispiele von Kunden von ExOne (3D-Druck)	ExOne [online] https://www.exone.com/Resources/Case-Studies [Accessed: 14-Jun-2018]
95	Prozessoptimierung über die Cloud - Energiemanagement mit IoT und Big Data	WAGO "Prozessoptimierung über die Cloud" [Online]. Available: https://www.wago.com/at/energiemanagement/cloud-prozessoptimierung [Accessed 16.08.18]
96	Lastmanagement: Strom sparen über die Cloud	WAGO "Prozessoptimierung über die Cloud" [Online]. Available: https://www.wago.com/at/energiemanagement/cloud-prozessoptimierung [Accessed 16.08.18]
97	Schnellerer Aufbau und Umrüstung verfahrenstechnischer Anlagen mit modularer Prozessautomation	WAGO "Auf dem Weg zur wandlungsfähigen Produktion" [Online]. Available: https://www.wago.com/at/digitalisierung/wandlungsfahigkeit/referenz-dima-automatisierung [Accessed 16.08.18]

98	Bilfinger Connected Asset Performance (BCAP®) - Ein ganzheitliches Konzept zur Vernetzung bislang isolierter Daten-Silos auf einer Plattform	Bilfinger "Digitalisierung setzt neue Benchmarks bei der Anlageneffizienz in der Prozessindustrie" [Online]. Available: https://www.wvis.eu/fileadmin/wvis_downloads/Termine/Vortraege-OMV-2018/2018-06-06-Bilfinger-Franz-Braun-Digitalization-WVIS-Treffen-Berlin.pdf [Accessed 16.08.18]
99	Simulationswerkzeug minimiert Umweltbelastung und Kosten in der Biotechnologie	Process: Chemie-Pharma-Verfahrenstechnik "Simulationswerkzeug minimiert Umweltbelastung und Kosten in der Biotechnologie" [Online]. Available: https://www.process.vogel.de/simulationswerkzeug-minimiert-umweltbelastung-und-kosten-in-der-biotechnologie-a-305697/ [Accessed 17.08.18]
100	Simulation in der Planung: So erhöht die Simulation die Anlagenverfügbarkeit	PharmaTec: Forschung-Technik-Praxis "So erhöht Simulation die Anlagenverfügbarkeit" [Online]. Available: https://www.process.vogel.de/so-erhoeht-simulation-die-anlagenverfuegbarkeit-a-377477/ [Accessed 17.08.18]
101	Ein Modell für Konzerne: Clariant implementiert unternehmensweit INOSIM Prozesssimulation	INOSIM "Ein Modell für Konzerne: Clariant implementiert unternehmensweit INOSIM Prozesssimulation" [Online]. Available: https://www.inosim-software.com/index.php/de/unternehmen/nachrichten/372-ein-modell-fuer-konzerne-clariant-implementiert-unternehmensweit-inosim-prozesssimulation.html [Accessed 17.08.18]
102	Bilfinger steigert die Effizienz und Verfügbarkeit von Anlagen und senkt die Instandhaltungskosten in der Prozessindustrie	chemanager-online "Brückenbauer zwischen Prozessindustrie und IT" [Online]. Available: https://www.chemanager-online.com/themen/dienstleistungen/brueckenbauer-zwischen-prozessindustrie-und-it [Accessed 17.08.18]
103	Selbstkalibrierende Sensoren für die Implementierung von Industrie 4.0	Konstruktionspraxis "Selbstkalibrierende Sensoren ausgezeichnet" [Online]. Available: https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/selbstkalibrierende-sensoren-ausgezeichnet-a-722006/ [Accessed 17.08.18]
104	Software-Einsatz für die Prozessentwicklung und -optimierung	INOSIM "Prozessentwicklung und -Optimierung durch Scale-Up eines biotechnologischen Prozesses" [Online]. Available: https://www.inosim-software.com/index.php/de/referenzen/success-storys/469-prozessentwicklung-und-optimierung-durch-scale-up-eines-biotechnologischen-prozesses.html [Accessed 17.08.18]

105	Erfolgreicher Testlauf einer 3D-gedruckten Gasturbinenschaufel	Siemens [Online] https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/services/maintenance/parts/additive-manufacturing.html [Accessed: 23-Sep-2019]
106	Erstes 3D-gedrucktes Bauteil für Dampfturbine	Siemens [Online] https://www.siemens.com/press/en/feature/2018/powergeneration/services/2018-04-3d-parts.php?content[]=PS [Accessed: 23-Sep-2019]
107	Erstes 3D-gedrucktes Bauteil (Impeller einer Pumpe) angewendet in einem Atomkraftwerk	Siemens [Online] https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-sets-milestone-first-3d-printed-part-operating-nuclear-power-plant?content[]=PS [Accessed: 23-Sep-2019]
108	PRO Weil Simulation hilft, SIM Prozesse besser zu verstehen	SEBASTIAN HEMMAN, Ingenieurbüro für Prozesssimulation, [Online] URL: http://pro-sim.de/start.html [Accessed: 29-Nov-2018]
109	BAVC-Präsident Kai Beckmann fordert flächendeckende Förderung aller Unternehmen beim Thema Digitalisierung.	CHEManager-Online, "BAVC fordert flächendeckende Förderung und Weiterbildung beim Thema Digitalisierung", 2018, URL: https://www.chemanager-online.com/themen/personal/bavc-fordert-flaechendeckende-foerderung-und-weiterbildung-beim-thema-digitalisierung [Accessed: 29-Nov-2018]
110	Computergestützte Chemie-Covestro baut digitale Forschung und Entwicklung aus	PROCESS-Online, "Covestro baut digitale Forschung und Entwicklung aus", 2018. URL: https://www.process.vogel.de/covestro-baut-digitale-forschung-und-entwicklung-aus-a-777733/ [Accessed: 29-Nov-2018]
111	DCS-Portal in der Plant Solution von Engineering Base	AUCOTEC, DCS- Portal in der Plant Solution von Engineering Base [Online] URL: https://www.aucotec.com/de/plant-solutions/instrumentation-control/dcs-portal/ [Accessed: 29-Nov-2018]
112	PCS7-Anbindung spart vier Wochen Arbeit	AUCOTEC, EB von AUCOTEC als Drehscheibe auch für das Engineering der Litsystem- Software, 2018. [Online] URL: https://www.aucotec.com/de/success-stories/grundstoffe/pcs7/ [Accessed: 29-Nov-2018]
113	Modulare Produktion Gea und Siemens nutzen Automatisierungsstandard- Module Type Package	PROCESS-Online, "Modulare Produktion. Gea und Siemens nutzen Automatisierungsstandard MTP", 2018. [Online] URL: https://www.process.vogel.de/gea-und-siemens-nutzen-automatisierungsstandard-mtp-a-780172/ [Accessed: 30-Nov-2018]

114	Bosch Rexroth- Industrieller Funkkusschrauber Nexo	ZVEI- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie, "Welche Kriterien müssen Industrie-4.0-Produkte 2019. erfüllen," 2018, pp 14
115	Festo- Energieeffizienz- Modul	ZVEI- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie, "Welche Kriterien müssen Industrie-4.0-Produkte 2019. erfüllen," 2018, pp 16
116	Speicherprogrammierbare Steuerung Simatic S7-1500	ZVEI- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie, "Welche Kriterien müssen Industrie-4.0-Produkte 2019. erfüllen," 2018, pp 20
117	Speicherprogrammierbare Steuerung Modicon M251	ZVEI- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie, "Welche Kriterien müssen Industrie-4.0-Produkte 2019. erfüllen," 2018, pp 22
118	Lidar Sensor R2000	ZVEI- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie, "Welche Kriterien müssen Industrie-4.0-Produkte 2019. erfüllen," 2018, pp 24
119	Augmented Reality: Sofort mehr Realität Augmented Reality in der Prozessindustrie	INDUSTRY OF THINGS- Online, "Augmented Reality: Sofort mehr Realität", 2018., URL: https://www.industry-of-things.de/augmented-reality-sofort-mehr-realitaet-a-730182/ [Accessed: 03-Dez-2018]
120	Augmented Reality: Sofort mehr Realität Augmented Reality in der Fabrikautomation- Flugzeugbau	INDUSTRY OF THINGS- Online, "Augmented Reality: Sofort mehr Realität", 2018., URL: https://www.industry-of-things.de/augmented-reality-sofort-mehr-realitaet-a-730182/ [Accessed: 03-Dez-2018]
121	Tarakos Virtual made Reality taraVRbuilder 2018: 3D Animation und Simulation leicht gemacht	tarakos Virtual made Reality- Online, "taraVRbuilder 2018: 3D- Animation und Simulation leicht gemacht, 2018., URL: https://www.tarakos.de/taravrbuilder.html [Accessed: 03-Dez-2018]
122	KUKA. ArcTech Mit Produkten der KUKA.ArcTech-Familie wird der KUKA Roboter zum Schweißprofi	KUKA- Online, "KUKA.ArcTech", 2018.URL: https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/software/applikationssoftware/kuka_arctech [Accessed: 03-Dez-2018]
123	Industrie 4.0 mit KUKA Toledo Production Operations	KUKA- Online, "Industrie 4.0 mit KUKA Toledo Production Operations", 2018. URL: https://www.kuka.com/de-de/branchen/loesungsdatenbank/2016/04/solution-systems-toledo-production [Accessed: 03-Dez-2018]
124	KUKA Smart Production	KUKA- Online, "KUKA Smart Production", 2018. URL: https://www.kuka.com/de-de/technologien/industrie-4-0/industrie-4-0-smartproduction/ [Accessed: 03-Dez-2018]

125	Matrix- Produktion: ein Beispiel für Industrie 4.0	KUKA- Online, "Matrix- Production: ein Beispiel für Industrie 4.0", 2018. URL: https://www.kuka.com/de-de/branchen/loesungsdatenbank/2016/10/solution-systems-matrix-produktion [Accessed: 03-Dez-2018]
126	Tablet für besondere Härtefälle für den Einsatz bei Energieerzeugern und- versorgern	PROCESS-Online, "Tablet für besondere Härtefälle für den Einsatz bei Energieerzeugern und -versorgern",2018. URL: https://www.process.vogel.de/tablet-fuer-besondere-haertefaelle-fuer-den-einsatz-bei-energieerzeugern-und-versorgern-a-773313/ [Accessed: 03-Dez-2018]
127	Modernes Batchsystem schlägt Excelliste	PROCESS-online, "Wie halten Sie´s mit den Produktionsdaten? Modernes Batchsystem schlägt Excelliste",2018. URL: https://www.process.vogel.de/wie-halten-sies-mit-den-produktionsdaten-modernes-batchsystem-schlaegt-excelliste-a-777056/ [Accessed: 03-Dez-2018]
128	Cloud- Services für digitale Zwillinge Siemens und Bentley Systems schaffen ganzheitlichen Kontext für digitale Komponenten	CHEManager-online, Volker Oestreich, "Cloud Services für digitale Zwillinge", 2018, URL: https://www.chemanager-online.com/themen/strategie/cloud-services-fuer-digitale-zwillinge [Accessed: 04-Dez-2018]
129	Simulation ohne Gitter Software simuliert chemische Prozesse auf neuem Weg	PROCESS-online, "Software simuliert chemische Prozesse auf neuem Weg",2018. URL: https://www.process.vogel.de/software-simuliert-chemische-prozesse-auf-neuem-weg-a-725027/ [Accessed: 04-Dez-2018]
130	Drahtlose Sensoren für die smarte Fertigung	DIGITALENGINEERING MAGAZIN-online, "Drahtlose Sensoren für die smarte Fertigung",2018. URL: https://www.digital-engineering-magazin.de/drahtlose-sensoren-fuer-die-smarte-fertigung [Accessed: 04-Dez-2018]
131	Dosiertchnik Intelligente Lösungen fürs digitale Fluidmanagement	PROCESS-online, "Intelligente Lösungen fürs digitale Fluidmanagement",2018. URL: https://www.process.vogel.de/intelligente-loesungen-fuers-digitale-fluidmanagement-a-769122/ [Accessed: 04-Dez-2018]

132	Rohrleitungsisometrien auf Knopfdruck Über Rohrleitungen, Rohrklassen und die Vorfertigung	prozesstechnik-online, "Über Rohrleitungen, Rohrklassen und die Vorfertigung",2018. URL: https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/anlagen-chemie/engineering/ueber-rohrleitungen-rohrklassen-und-die-vorfertigung/ [Accessed: 04-Dez-2018]
133	Startklar für Wasser 4.0 Schraubengebläse steigern Energieeffizienz bei der Abwasseraufbereitung	prozesstechnik-online, Marcus Jungkunst, "Schraubengebläse steigern Energieeffizienz bei der Abwasseraufbereitung",2018. URL: https://prozesstechnik.industrie.de/food/anlagen-food/kompressoren-food/schraubengeblaese-steigern-energieeffizienz-bei-der-abwasseraufbereitung/ [Accessed: 04-Dez-2018]
134	Vega auf dem Weg zu Industrie 4.0	prozesstechnik-online, Claudia Homburg, Vega auf dem Weg zu Industrie 4.0",2018. URL: https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/vega-auf-dem-weg-zu-industrie-4-0/ [Accessed: 06-Dez-2018]
135	Serialisierung mittels Cloud-Lösung	prozesstechnik-online, Dr. Susanne Vogelbein, "Serialisierung mittels Cloud-Lösung",2018. URL: https://prozesstechnik.industrie.de/pharma/msr-technik-pharma/industrie-4-0-pharma/serialisierung-mittels-cloud-loesung/#slider-intro-2 [Accessed: 06-Dez-2018]
136	So machen Sie Ihre Fabrik intelligenter SIG Robotic Magazine	prozesstechnik-online, So machen Sie Ihre Fabrik intelligenter",2018. URL: https://prozesstechnik.industrie.de/food/verpacken-food/so-machen-sie-ihre-fabrik-intelligenter-2/#slider-intro-2 [Accessed: 06-Dez-2018]
137	So funktioniert die digitale Transformation bei Evonik	prozesstechnik-online, So funktioniert die digitale Transformation bei Evonik",2018. URL: https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/msr-technik-chemie/so-funktioniert-die-digitale-transformation-bei-evonik/ [Accessed: 06-Dez-2018]
138	Methoden des maschinellen Lernen machen große Fortschritte Assistenten für die Produktion	prozesstechnik-online, Assistenten für die Produktion",2018. URL: https://prozesstechnik.industrie.de/food/msr-technik-food/industrie-4-0-food/assistenten-fuer-die-produktion/ [Accessed: 06-Dez-2018]
139	Jeder Werkstoff bekommt einen digitalen Zwilling	Industry of things-online, Jeder Werkstoff bekommt einen digitalen Zwilling",2018. URL: https://www.industry-of-things.de/jeder-werkstoff-bekommt-einen-digitalen-zwilling-a-781518/ [Accessed: 10-Dez-2018]

140	RWTH startet Konsortial-Benchmarking "KI in Forschung und Entwicklung"	Industry of things-online,RWTH startet Konsortial-Benchmarking "KI in Forschung und Entwicklung",2018. URL: https://www.industry-of-things.de/rwth-startet-konsortial-benchmarking-ki-in-forschung-und-entwicklung-a-782644/ [Accessed: 10-Dez-2018]
141	Smart Gloves: Arbeiten mit dem Handschuh 4.0	Edison-online,Smart Gloves: Arbeiten mit dem Handschuh 4.0",2018. URL: https://edison.handelsblatt.com/erleben/smart-gloves-arbeiten-mit-dem-handschuh-4-0/22740956.html?ticket=ST-1058134-42ptILmAEbCzeqVkMs3-ap1 [Accessed: 10-Dez-2018]
142	So bringen sie Bestandspumpen ins Internet der Dinge	PROCESS-online, "So bringen Sie Bestandspumpen ins Internet der Dinge",2018. URL: https://www.process.vogel.de/so-bringen-sie-bestandspumpen-ins-internet-der-dinge-a-716538/ [Accessed: 10-Dez-2018]
143	Fördertechnik digitalisieren und virtualisieren	PROCESS-online, "Fördertechnik digitalisieren und virtualisieren",2018. URL: https://www.process.vogel.de/foerdertechnik-digitalisieren-und-virtualisieren-a-782154/ [Accessed: 10-Dez-2018]
144	Prozessleitsystem mit speziellen Funktionen für Wasseranwendungen	CHEManager-online, "Prozessleitsystem mit speziellen Funktionen für Wasseranwendungen", 2018, URL: https://www.chemanager-online.com/themen/mess-automatisierungstechnik/prozessleitsystem-mit-speziiellen-funktionen-fuer-wasseranwendung [Accessed: 11-Dez-2018]
145	Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co: Herstellung von Schaumstoffeinlagen für Werkzeuge oder Bauteile	Viktor Becker, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0", 2018., pp 7 -10
146	Mader GmbH & Co.KG: Konzeption, Implementierung und Servicedienstleistungen für Druckluftsysteme	Viktor Becker, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, "Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0", 2018., pp 11 -14
147	Plug & Produce in der Chemieindustrie	prozesstechnik-online, Bernd Ebert, "Plug & Produce in der Chemieindustrie",2018. URL: https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/msr-technik-chemie/plug-produce-in-der-chemieindustrie/ [Accessed: 11-Dez-2018]

148	Roter Faden im Leneszzyklus	<p>prozesstechnik-online, Bernd Ebert, "Roter Faden im Lebenszyklus", 2018. URL: https://prozesstechnik.industrie.de/xing/roter-faden-im-lebenszyklus/ [Accessed: 11-Dez-2018]</p>
149	HoloLens in der Industrie: Augmented Reality in der Logistik	<p>Wirtschaftsförderung Bremen GmbH- online, Jann Raveling, "HoloLens in der Industrie: Augmented Reality in der Logistik", 2018 URL: https://www.wfb-bremen.de/de/page/stories/digitalisierung-industrie40/hololens-in-der-industrie-augmented-reality-in-der-logistik [Accessed: 11-Dez-2018]</p>
150	Papierlose Smart Factory Industrie 4.0- Projekt- Wenn Vernetzung mehr ist als ein Schlagwort	<p>PROCESS-online, "Industrie 4.0- Projekt- Wenn Vernetzung mehr ist als ein Schlagwort", 2019 URL: https://www.process.vogel.de/industrie-40-projekt-wenn-vernetzung-mehr-ist-als-ein-schlagwort-a-785817/ [Accessed: 07-Jan-2019]</p>
151	Smarte Sensorik reduziert Motor-Stillstandszeiten	<p>Industrie anzeiger-online, "Smarte Sensorik reduziert Motor-Stillstandszeiten", 2019 URL: https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/automatisierung/smarte-sensorik-reduziert-motor-stillstandszeiten/ [Accessed: 07-Jan-2019]</p>
152	Intelligente Analysesysteme prognostizieren Maschinenausfälle	<p>Industrie anzeiger-online, "Intelligente Analysesysteme prognostizieren Maschinenausfälle", 2019 URL: https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/intelligente-analysesysteme-prognostizieren-maschinenausfaelle/ [Accessed: 07-Jan-2019]</p>
153	Schaeffler führt Data Matrix Codes ein	<p>Industrie.de, "Schaeffler führt Data Matrix Codes ein", 2019 URL: https://industrie.de/top-list/8969/ [Accessed: 07-Jan-2019]</p>
154	Innovative Filteranlage mit vollautomatischer Steuerung gibt Mikroplastik keine Chance	<p>PROCESS-online, "Innovative Filteranlage mit vollautomatischer Steuerung gibt Mikroplastik keine Chance", 2019 URL: https://www.process.vogel.de/innovative-filteranlage-mit-vollautomatischer-steuerung-gibt-mikroplastik-keine-chance-a-783814/ [Accessed: 14-Jan-2019]</p>

155	Immer auf dem Laufenden: So kommen Thermoprozesse in die Cloud	PROCESS-online, "Immer auf dem Laufenden: So kommen Thermoprozesse in die Cloud", 2019 URL: https://www.process.vogel.de/immer-auf-dem-laufenden-so-kommen-thermoprozesse-in-die-cloud-a-789420/ [Accessed: 14-Jan-2019]
156	Erfolgreiche Instandhaltung mit Datenbrillen	prozesstechnik-online, "Erfolgreiche Instandhaltung mit Datenbrillen", 2019. URL: https://prozesstechnik.industrie.de/aktuelles-chemie/erfolgreiche-instandhaltung-mit-datenbrillen/ [Accessed: 14-Jan-2019]
157	Datenanalyse sagt Zündkerzenausfall hervor	Industrie anzeiger-online, "Datenanalyse sagt Zündkerzenausfall hervor", 2019 URL: https://industrieanzeiger.industrie.de/management/it/datenanalyse-sagt-zuendkerzenausfall-hervor/ [Accessed: 14-Jan-2019]
158	Upgrade fürs Smartphone: Fettgehalt von Lebensmitteln messen	PROCESS-online, "Upgrade fürs Smartphone: Fettgehalt von Lebensmitteln messen", 2019 URL: https://www.process.vogel.de/upgrade-fuers-smartphone-fettgehalt-von-lebensmitteln-messen-a-764890/ [Accessed: 14-Jan-2019]
159	Bühler Insights- Digitale Services in der Cloud	Prozessindustrie 4.0- Sonderausgabe 2018 * process.de/prozessindustrie-4-0 , "Process spezial", 2018., pp 49
160	So kriegen Sie Ihr Gefahrstoffmanagement in den Griff	PROCESS-online, "So kriegen Sie Ihr Gefahrstoffmanagement in den Griff", 2018 URL: https://www.process.vogel.de/so-kriegen-sie-ihr-gefahrstoffmanagement-in-den-griff-a-734907/ [Accessed: 14-Jan-2019]
161	Das größte 3D-Mixed-Reality Labor Europas steht im Magdeburg	PROCESS-online, "Das größte 3D-Mixed-Reality Labor Europas steht im Magdeburg", 2019 URL: https://www.process.vogel.de/das-groesste-3d-mixed-reality-labor-europas-steht-in-magdeburg-a-787437/ [Accessed: 14-Jan-2019]
162	Multi-Vial-Box zur digitalen Therapiekontrolle	PROCESS-online, "Multi-Vial-Box zur digitalen Therapiekontrolle", 2019 URL: https://www.process.vogel.de/multi-vial-box-zur-digitalen-therapiekontrolle-a-789766/ [Accessed: 15-Jan-2019]

163	Inline-Analyse bringt Transparenz in den Prozess	<p>prozesstechnik-online, Inline-Analyse bringt Transparenz in den Prozess",2018. URL:https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/msr-technik-chemie/inline-analyse-bringt-transparenz-in-den-prozess/ [Accessed: 15-Jan-2019]</p>
164	<p>In der Produktion den Überblick behalten Honeywell Process Solutions</p>	<p>prozesstechnik-online, In der Produktion den Überblick behalten",2018. URL:https://prozesstechnik.industrie.de/pharma/msr-technik-pharma/in-der-produktion-den-ueberblick-behalten-2/#slider-intro-3 [Accessed: 15-Jan-2019]</p>

E. Relative Häufigkeit der Nennungen: Digitale Technologien

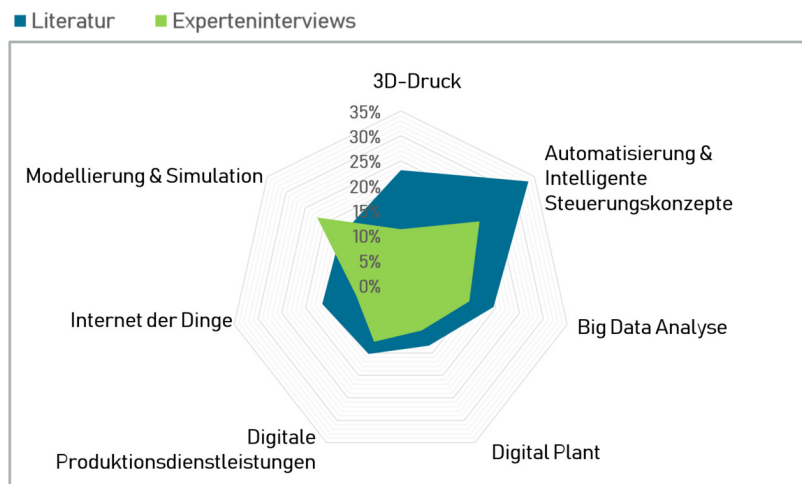


Abbildung 21: Relative Häufigkeit der Nennungen: **Digitale Technologien**. Vergleich zwischen Experteninterviews und Literaturbeispiele

F. Relative Häufigkeit der Nennungen: Geschäftsfelder

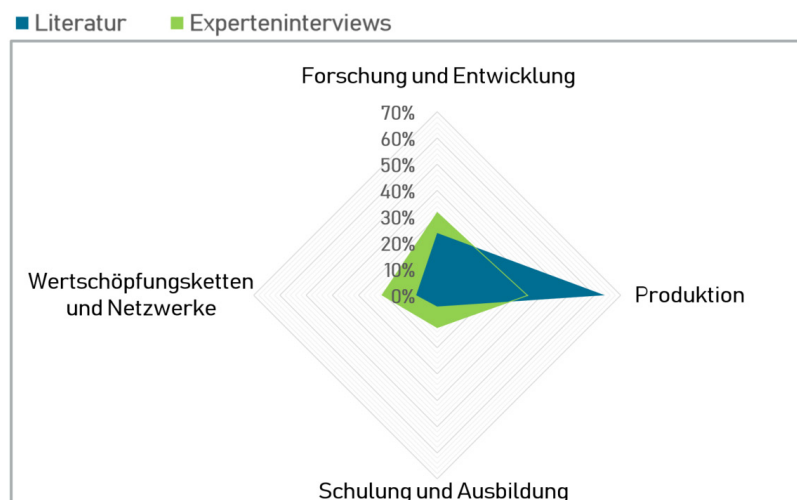


Abbildung 22: Relative Häufigkeit der Nennungen: **Geschäftsfelder**. Vergleich zwischen Experteninterviews und Literaturbeispiele

G. Relative Häufigkeit der Nennungen: Ressourcen

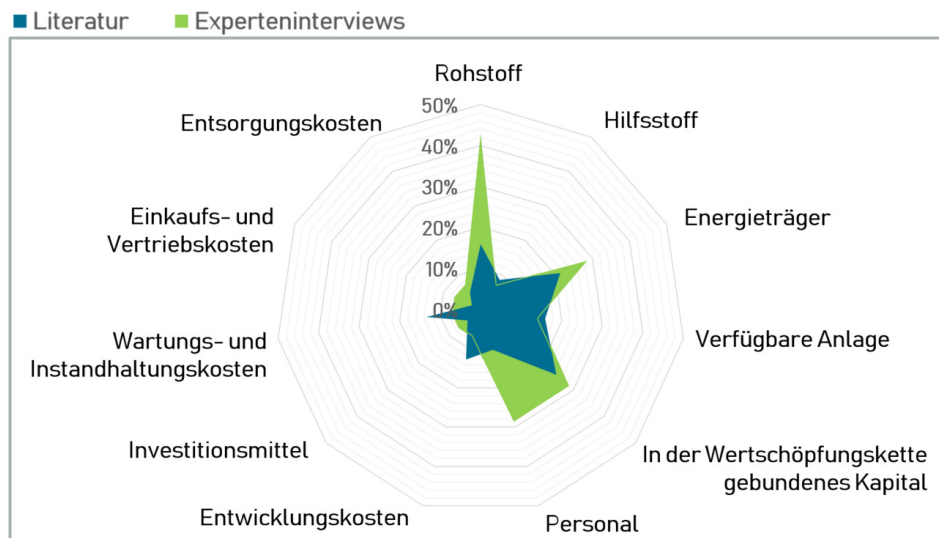
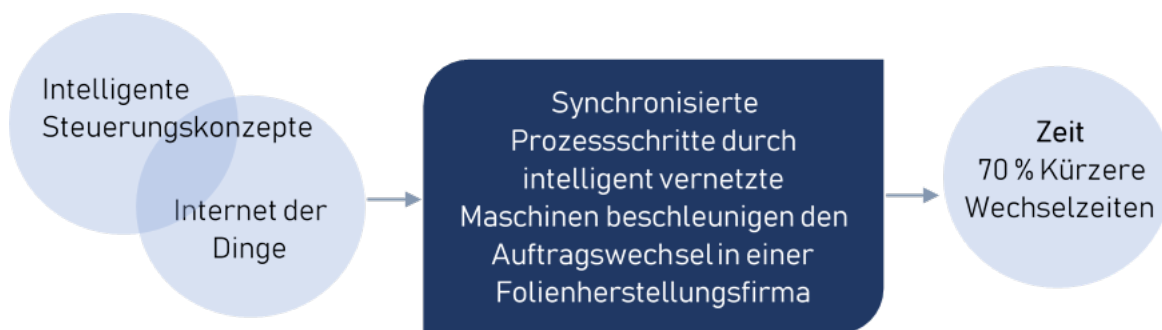


Abbildung 23: Relative Häufigkeit der Nennungen: **Ressourcen**. Vergleich zwischen Experteninterviews und Literaturbeispiele

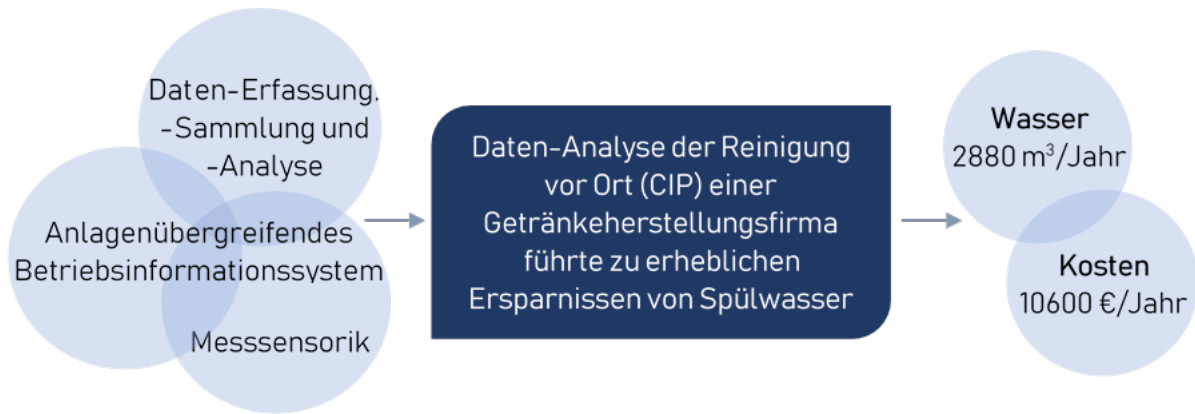
H. Zusätzliche Literaturbeispiele

Literaturbeispiel 4: Synchronisierte Prozessschritte durch intelligent vernetzte Maschinen [28]:
Das von Windmüller & Hölscher entwickelte Automationsmodul synchronisiert die einzelne Prozessschritte der Folienherstellung und ermöglicht einen automatisierten und somit schnelleren Auftragswechsel. Während der manuelle Wechsel in der Regel ca. 40 Minuten dauert, werden mit dem Automationsmodul nur 12 Minuten benötigt.



Literaturbeispiel 5: Betriebsinformationssysteme in Kombination mit Messensorik für die Optimierung der Reinigung vor Ort (Cleaning in Place - CIP) [28]:

Ein anlagenübergreifendes Betriebsinformationssystem wurde in einer Getränkeherstellungsfirma in Kombination mit Messensorik zur Datensammlung und Auswertung der Reinigung vor Ort eingesetzt. Die Datenanalyse zeigte, dass die gleichen Reinigungsergebnisse mit der Hälfte der Nachspülzeit erreicht werden konnten. Jährlich wurden dadurch 2880 m³ Wasser und 10600 € eingespart.



Literaturbeispiel 6: Digitale Plattform zum Einsatz von digitalen Dienstleistungen [29, 30]:

Die Münzing Chemie setzte die *Bilfinger Connected Asset Performance Plattform* als ganzheitliches Konzept und zentrale Stelle für digitale Dienstleistungen ein. Im Rahmen eines Pilotprojektes wurden u.a. digitale Zwillinge aufgebaut, Anlagen in 3D gescannt, Long Range- und kabellose Sensoren installiert, ein Kunden-Dashboard entwickelt und bislang isolierte Daten aus dem Engineering, der Leittechnik und der Sensoren verknüpft. In einem Jahr wurde ein Verbesserungspotential der Gesamtanlageneffektivität (GAE) von 10 % entdeckt, die Routineuntersuchungen um 10 % und die unplanmäßige Ausfallzeit um 5 % reduziert, und die Datenqualität um 30 % gesteigert.



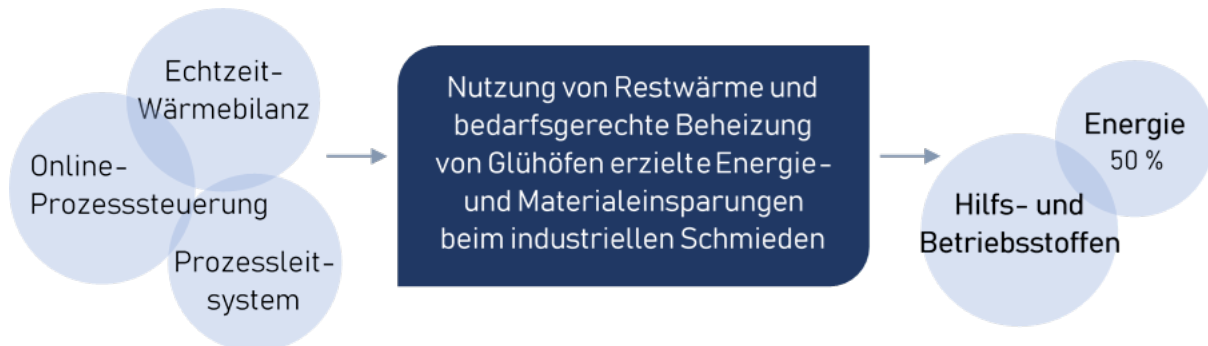
Literaturbeispiel 7: Software-Einsatz für die Prozessentwicklung und -optimierung [31]:

Eine Softwarelösung wurde für die Prozessentwicklung und -optimierung eingesetzt. Durch ein integriertes hybrides Datenmodell wurden simulationsgestützt Verbesserungspotenziale der Produktion eines Wirkstoffes für die Kosmetische Industrie aufgezeigt. Nach Durchführung der notwendigen Maßnahmen wurden folgende Ergebnisse erzielt: 27 % Ausbeutesteigerung, 38 % Reduktion der Abwassermenge, 16 % Drosselung des Energieverbrauchs und 26 % Reduzierung der Produktionskosten.



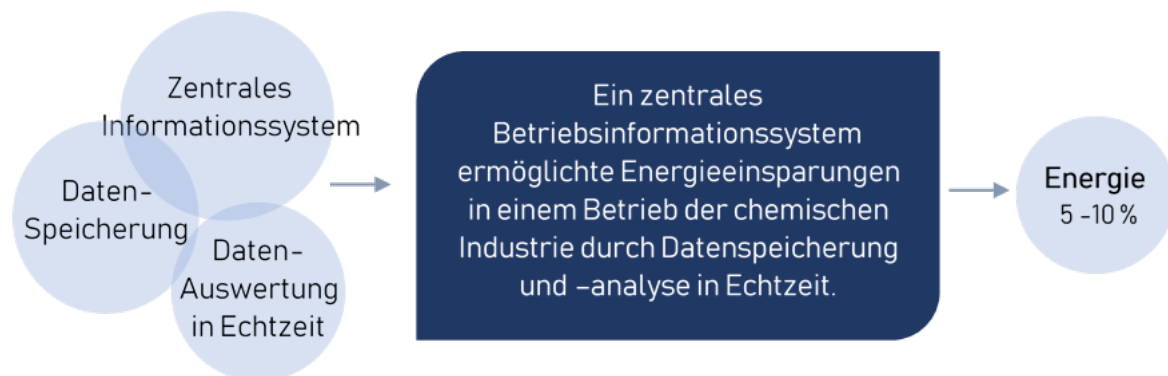
Literaturbeispiel 8: Bedarfsgerechte Beheizung von Glühöfen [10] (S. 45):

Ein Prozessleitsystem zusammen mit einer Echtzeit-Wärmebilanz und den gewonnenen Daten aus einer Temperaturmessung ermöglichten beim industriellen Schmieden die Online-Prozesssteuerung für die bedarfsgerechte Beheizung von Glühöfen. Dadurch wurde die Restwärme anderer Prozessschritte genutzt und neben einer Reduktion von Hilfs- und Betriebsstoffen, eine Energieeinsparung von mehr als 50 % erzielt.



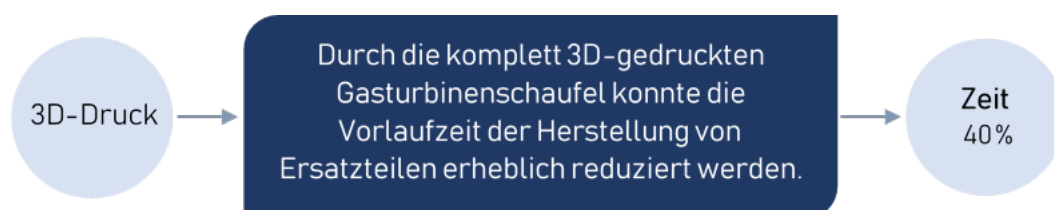
Literaturbeispiel 9: Produktionsbetrieb der chemischen Industrie verwendet ein zentrales Informationssystem zur Datenspeicherung und -analyse [10] (S. 50):

Ein zentrales Betriebsinformationssystem der Firma Steinhaus speichert alle verfügbaren Daten über den Material- und Energieverbrauch des Betriebes in einer zentralen Datenbank. Die Daten werden in Echtzeit analysiert und intern zugänglich gemacht. Ein Beispiel der chemischen Industrie zeigte wie der Einsatz des Systems Energieeinsparungen zwischen 5 und 10 % ohne erhebliche Investitionen ermöglichte.



Literaturbeispiel 10: Einsatz der ersten 3D-gedruckten Teile für industrielle Dampfturbinen [32]:

Siemens nutzt Technologien der additiven Fertigung für die Herstellung erster gedruckter Bauteile aus Metall für eine industrielle Dampfturbine. Durch die komplett 3D-gedruckte Gasturbinenschaufel wurde die Vorlaufzeit zur Herstellung von Ersatzteile um bis zu 40 % reduziert.



I. Schematische Darstellung der Durchführung einer Stoffflussanalyse

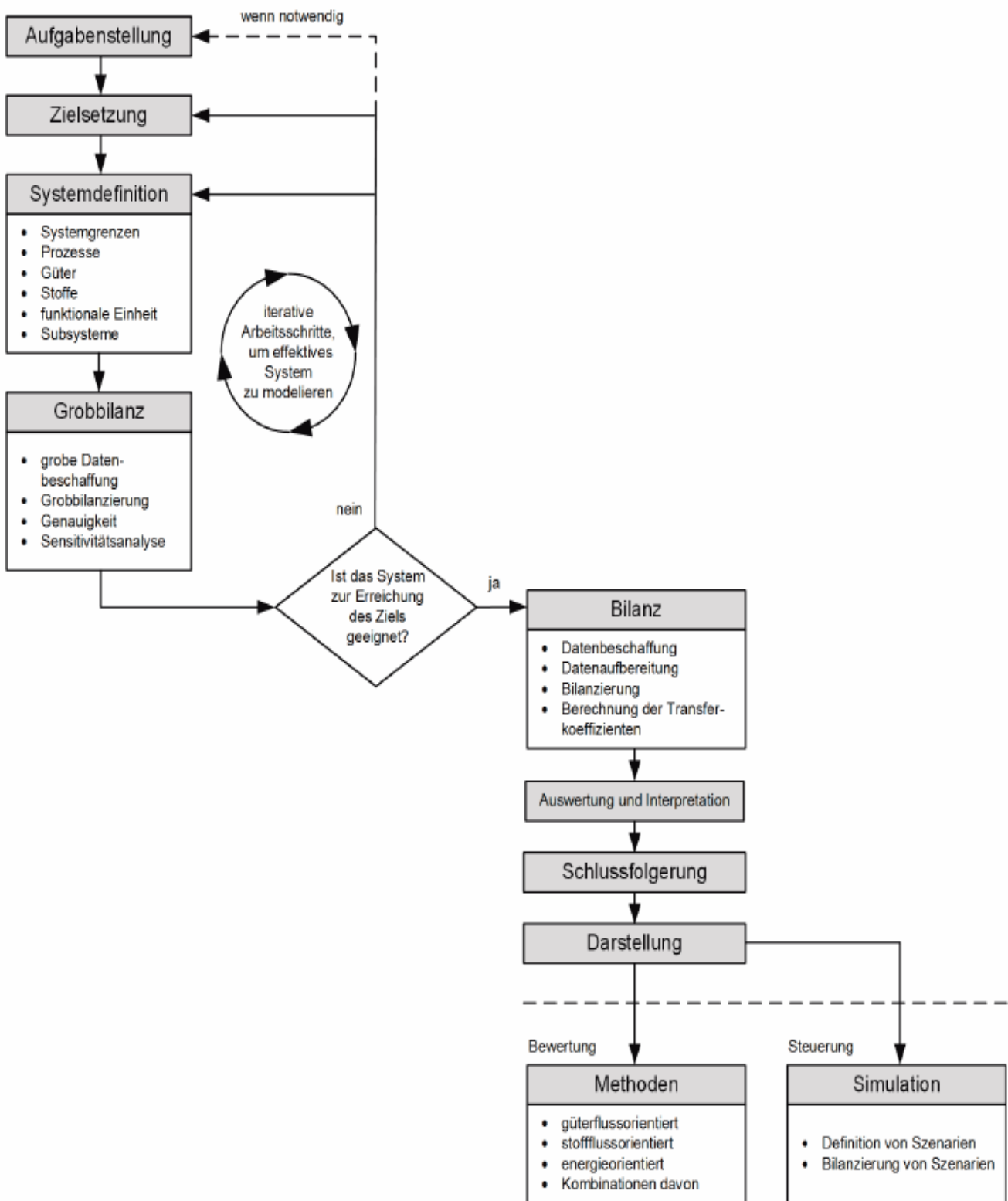
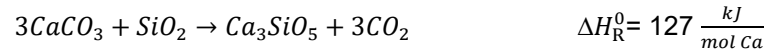


Abbildung 24: Iterative Durchführung einer Stoffflussanalyse [13]

J. Beschreibung der modellierten Prozesse (Zementindustrie)

1. Herstellungsverfahren von Alit (Tricalciumsilikat) [18]

Alit (C_3S), auch bekannt als Tricalciumsilikat, ist die Hauptkomponente des Portlandzementklinkers. Alit entsteht aus Kalkstein (Calciumcarbonat) und Sand (Siliziumdioxid) in einem energieintensiven Prozess über folgende endotherme chemische Reaktion:



Mit: ΔH_R^0 – Reaktionsenthalpie in kJ

Hauptmerkmale des Prozesses:

- Zielprodukt: Alit (Ca_3SiO_5)
- Nebenprodukt: Kohlendioxid (CO_2) → Hoher CO_2 - Emissionswert
- Hohe Prozesstemperatur (Reaktor, $1450^\circ C$) → Bildung von Alit beim Vorhandensein von Flussmitteln
- Ca:Si Verhältnis für Alitbildung ist 3:1

In dem ersten Schritt werden die Rohstoffe Kalkstein und Sand gemischt und gemahlen. Das Rohmehl wird dann weiter im Hochtemperaturbereich behandelt. Der Hochtemperaturprozess besteht aus vier Teilprozesszonen: dem Vorwärmer, dem Kalzinierofen, dem Drehrohrföfen und dem Klinkerköhler. Durch die heißen Rauchgase des Drehrohrföfens wird das Rohmehl im Vorwärmer aufgeheizt. Nach der Vorwärmung gelangt das Rohmehl in den Kalzinierofen, in dem der Kalkstein weitgehend entsäuert wird. Im Drehrohrföfen wird der Kalkstein dann vollständig entsäuert.

Der heiÙe Zementklinker gelangt weiter in den Rostköhler, wo er geköhlt wird und die generierte Abwärme im Prozess wieder genutzt wird. Im letzten Schritt wird der aus dem Rostköhler austretende Portlandzementklinker unter Zugabe von Gipsstein oder einem Gips-Anhydrit-Gemisch gemahlen.

Abbildung 25 (entnommen aus Zement Taschenbuch) zeigt die Brenngutreaktionen und Mineralneubildungen in einer Drehföfenanlage. In den einzelnen Zonen bilden sich verschiedene Zementphasen, abhängig von der Zeit und Temperatur im Prozess.

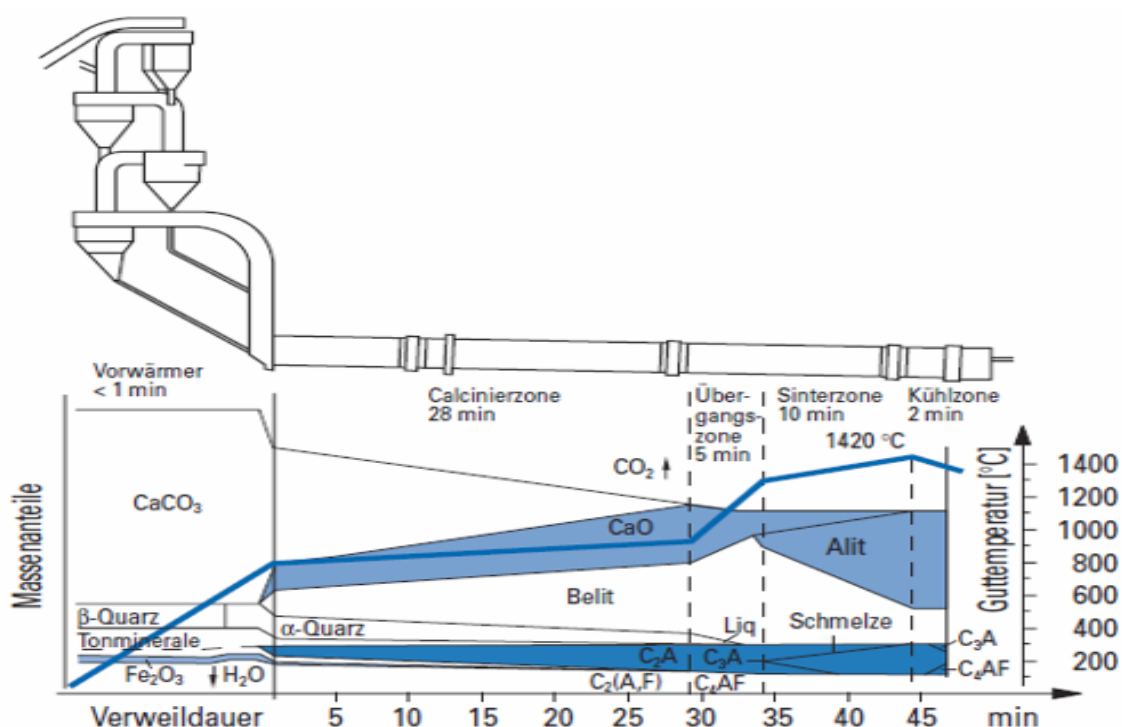
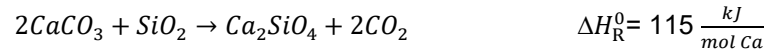


Abbildung 25: Brenngutreaktionen und Mineralneubildungen in einer Drehföfenanlage [18]

2. Herstellungsverfahren von Belit (Dicalciumsilikat) [26]

Belit (Ca_2SiO_4) bzw. Dicalciumsilikat ist der zweite Hauptbestandteil des Portlandzementklinkers nach Alit. Belit ist auch ein möglicher Einsatzstoff des Celitement®-Prozesses.

Belit bildet sich gemäß folgender endothermen chemischen Reaktion:



Mit: ΔH_{R}^0 – Reaktionsenthalpie in kJ

Hauptmerkmale des Prozesses:

- Zielprodukt: Belit (Ca_2SiO_4)
- Nebenprodukt: Kohlendioxid (CO_2)
- Niedrigere Prozesstemperatur (ca. 1050°C) im Gegensatz zu der Alitbildung und niedrigerer CO_2 - Emissionswert
- Ca:Si Verhältnis für Belitbildung liegt bei 2:1

Der Prozess besteht aus den gleichen Hauptschritten wie bereits zuvor für die Alitherstellung beschrieben. In diesem Projekt wurde eine Optimierung des Herstellungsverfahrens von Belit durchgeführt mit Gasrezirkulationskreisläufen. Gegenüber dem Herstellungsverfahren von Belit mit nur einem Kreislauf, ist es so möglich eine Steigerung des thermischen Prozesswirkungsgrades zu erreichen.

3. Herstellungsverfahren von Celitement [33]

Celitement bezeichnet eine neue Klasse von hochleistungsfähigen hydraulischen Bindemitteln (Zementen). Celitement wird über ein patentiertes Verfahren mit hoher Energieeffizienz hergestellt, mit dem die spezifische CO_2 -Emission um mehr als 50 % im Vergleich zur Portlandzementherstellung reduziert wird. Der Celitement®- Prozess besteht aus drei Verfahrensschritten:

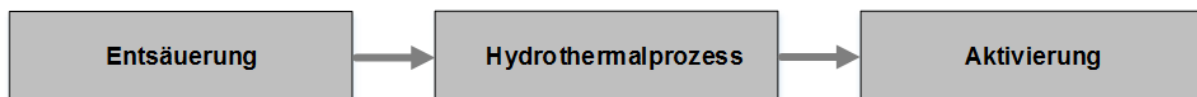


Abbildung 26: Verfahrenstechnische Schritte bei der Herstellung von Celitement [33]

Hauptmerkmale des Prozesses:

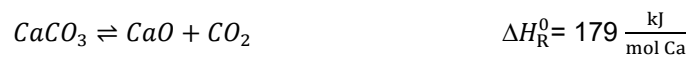
- Zielprodukt: Celitement ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- Nebenprodukt: Kohlendioxid (CO_2)
- Reduzierung der spezifischen CO_2 Emission gegenüber der Herstellung von Portlandzement um mehr als 50%
- Niedrigere Temperaturen (200°C) als bei der Portlandzementherstellung und verringerte Kalkmengen führen zu wesentlicher Energieeinsparung gegenüber Portlandzementherstellung
- Niedrigerer Bedarf an Calciumcarbonat (Ca:Si Verhältnis liegt bei 1:1,5)

In diesem Projekt wurden zwei Varianten für die Herstellung von Celitement untersucht. In der **Variante 1** wurde reines Calciumcarbonat entsäuert wohingegen in **Variante 2** die Mischung aus Calciumcarbonat und Siliziumdioxid entsäuert wurde. Der wichtigste Unterschied zwischen diesen Varianten liegt darin, dass die Entsäuerungsreaktion pro Mol Calcium aufgrund der geringeren Reaktionsenthalpie ca. 35% weniger Energie benötigt als die Kalzinierung von reinem Calciumcarbonat. Im Folgenden sind befindet sich eine detaillierte Erklärung der beiden Varianten.

Variante 1: Gelöschter Kalk als Ausgangsstoff für Celitement

In dieser Variante wird reines Calciumcarbonat entsäuert. Nach der Entsäuerung wird das Calciumoxid mit Wasser versetzt, um gelöschten Kalk zu erhalten. Der gelöschter Kalkt dient dann als Ausgangsstoff für den nachfolgenden Prozess.

- Kalzinierung von Calciumcarbonat (Endotherme chemische Reaktion):

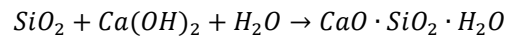


- Versetzung von Branntkalk mit Wasser (Exotherme chemische Reaktion):



Mit: ΔH_R^0 – Reaktionsenthalpie in kJ

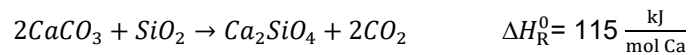
- Autoklaven- und Aktivierungs- Prozess:



Variante 2: Belit als Ausgangsstoff für Celitement

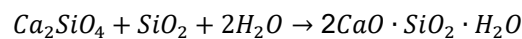
In dieser Variante wird eine Mischung von Calciumcarbonat und Siliziumdioxid entsäuert. Belit wurde weiter im Prozess für die Herstellung von Celitement verwendet.

- Kalzinierung der Mischung aus Calciumcarbonat und Siliziumdioxid:



Mit: ΔH_R^0 – Reaktionsenthalpie in kJ

- Autoklaven- und Aktivierungs- Prozess:



K. Beispielprozess 1: Herstellungsverfahren in der Zementindustrie

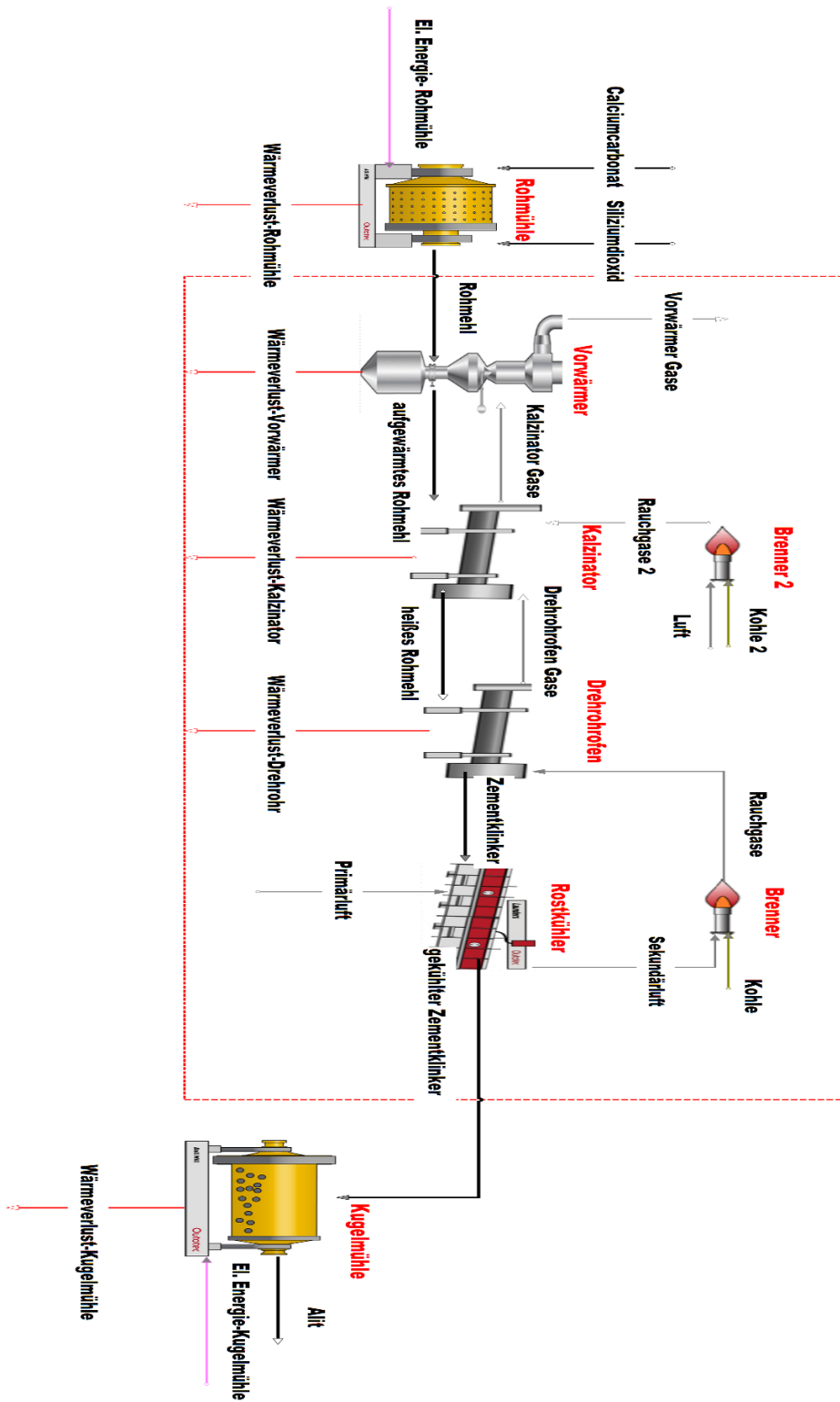


Abbildung 27: Prozessschema Alitherstellung (HSC-SIM)

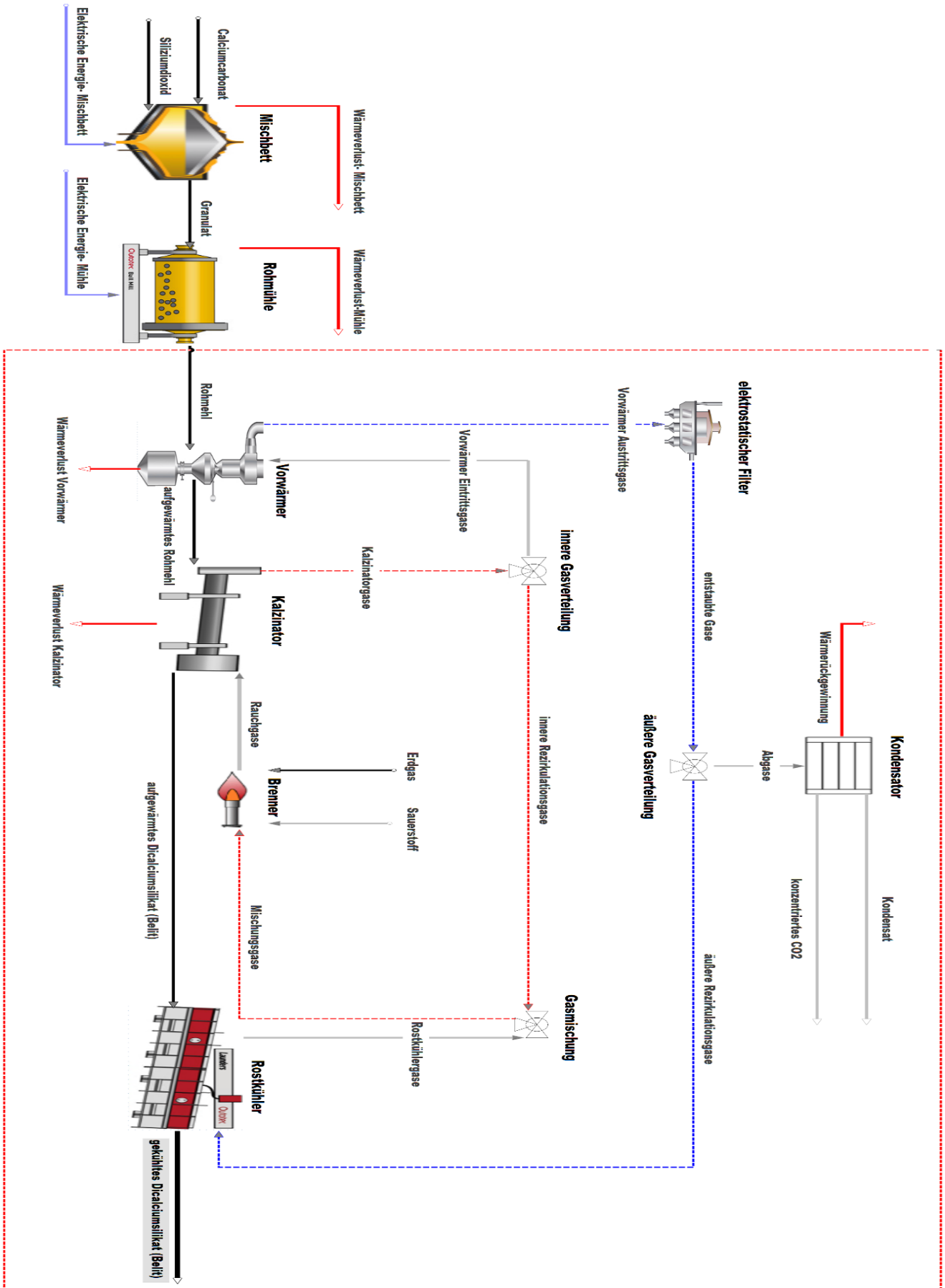


Abbildung 28: Prozessschema Belithersherstellung mit zwei Gasrezirkulationskreisläufen (HSC-SIM)

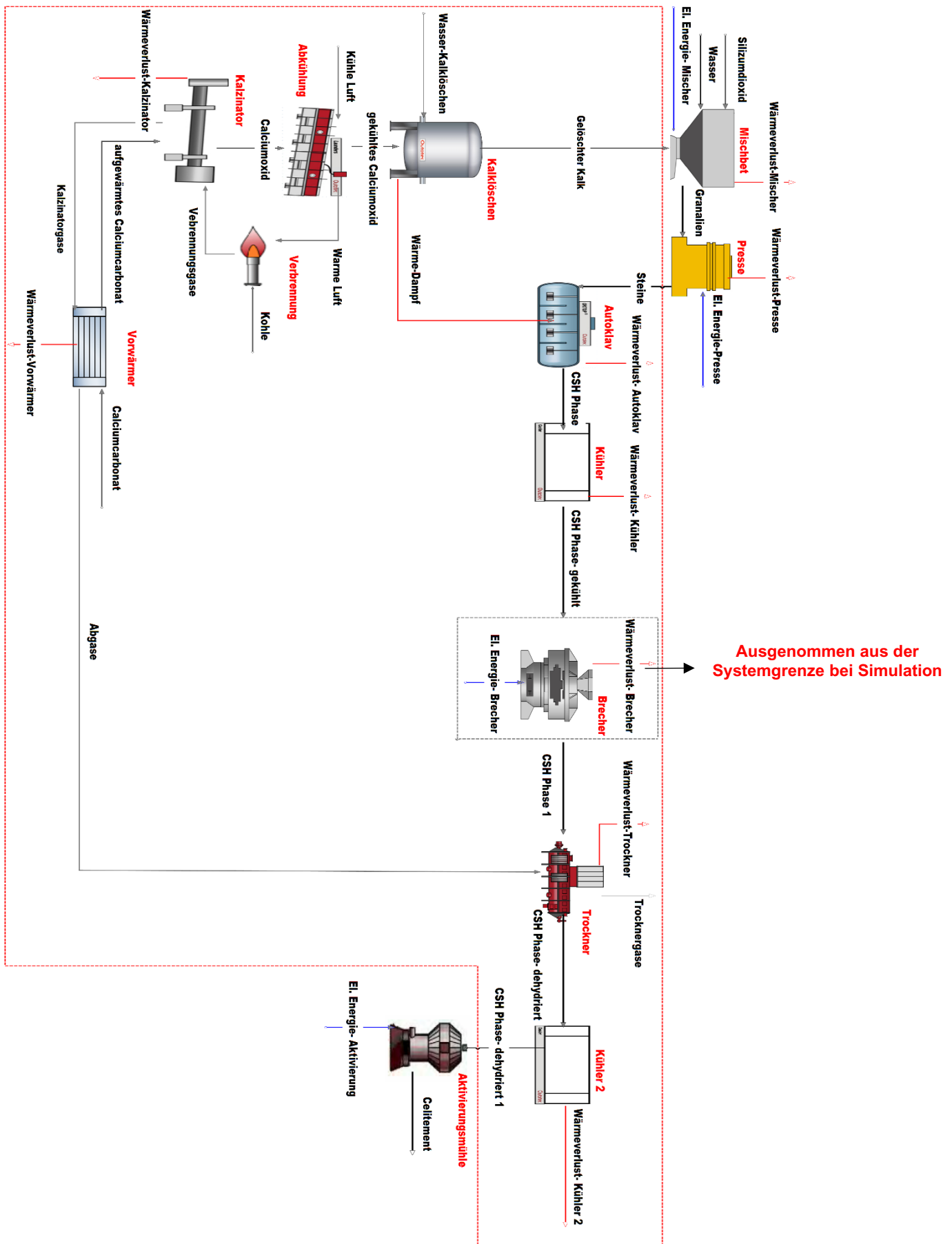


Abbildung 29: Prozessschema Celitementherstellung, Variante 1, Einsatzstoff gelöschter Kalk (HSC-SIM)

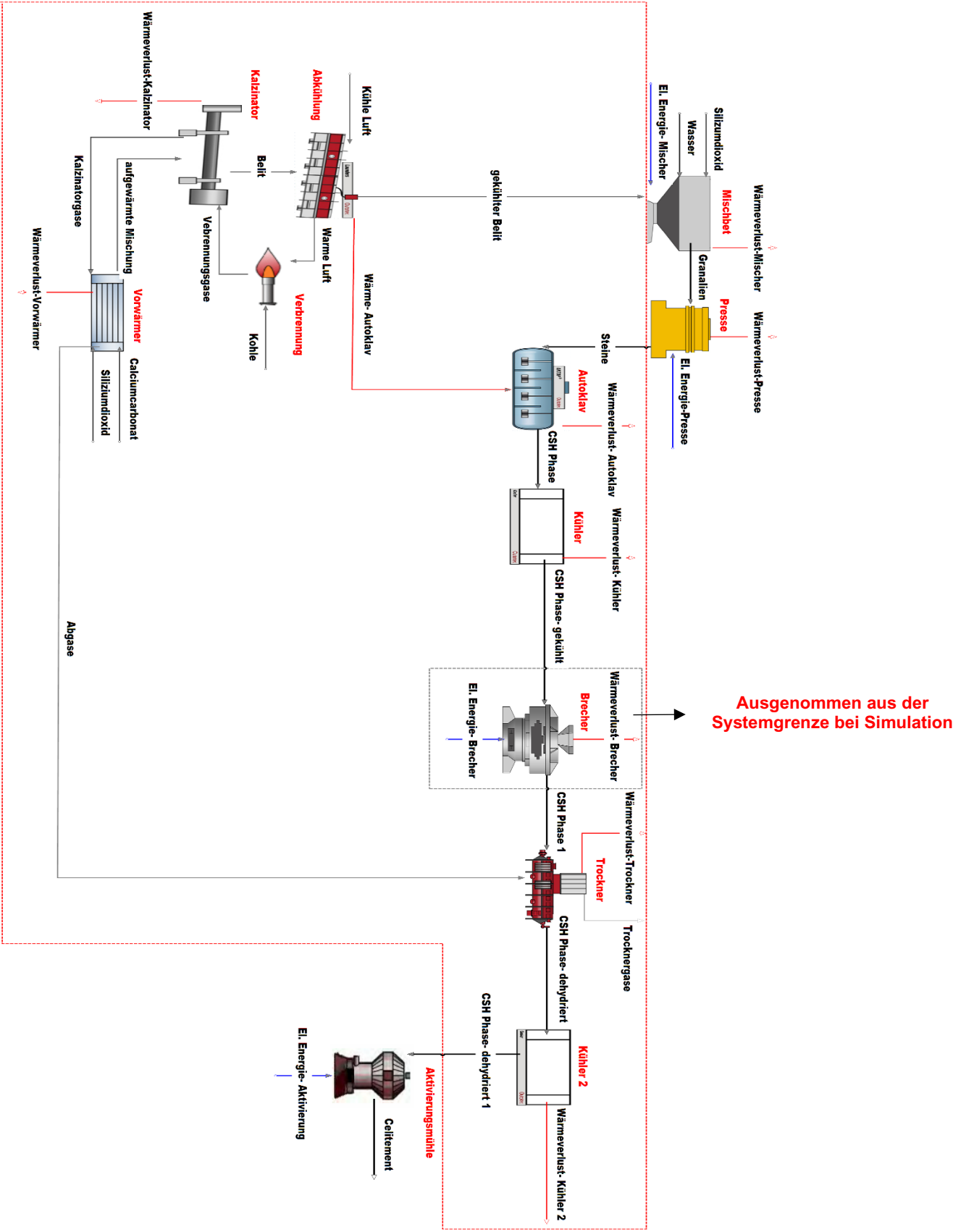


Abbildung 30: Prozessschema Celitementherstellung, Variante 2, Einsatzstoff Belit (HSC-SIM)

L. Leitsystem bioliq - Digitalisierung

Bewertung der Versuchsfahrten erfolgt mithilfe der messtechnischen Ausrüstung. Lieferung von Prozessdaten dient für die Modellierung als auch für die Validierung des Simulationswerkzeugs.

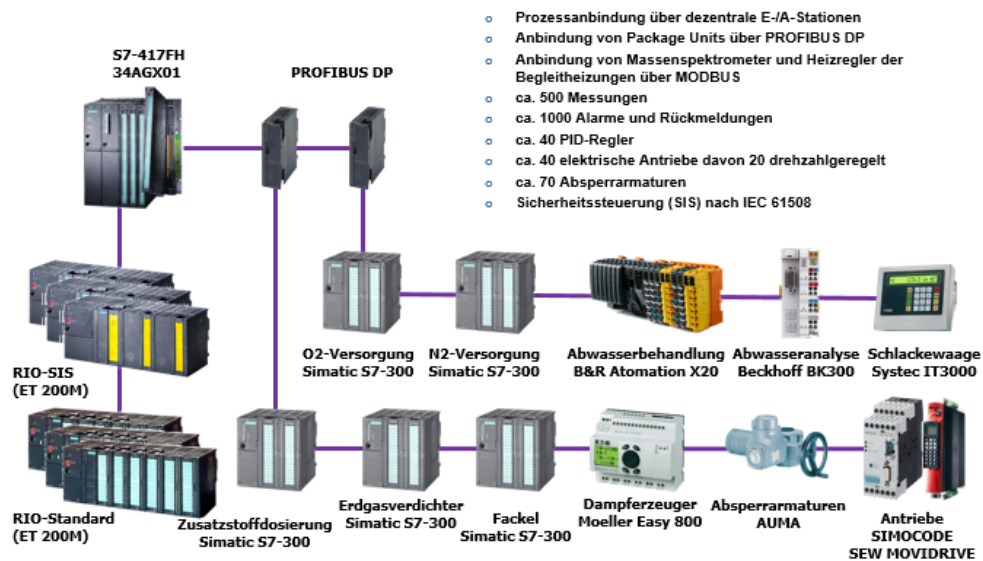


Abbildung 31: Darstellung des Leitsystems bioliq- Hochdruckvergaser [34]

Das Leitsystem des bioliq-Verfahrens bietet eine gute Übersicht über den Prozess. Ausgestattet mit Sensoren, Messapparaten und Regeln ermöglicht es eine gute Kontrolle des Prozesses. Das Leitsystem ermöglicht Echtzeiterfassung der Prozessdaten. Aus dem Leitsystem werden Prozessdaten zu einer Datenbank geliefert und dort gespeichert. Anhand dieser Prozessdaten ist es möglich jeden Prozessschritt detailliert zu beschreiben und zu analysieren. Das gibt die Möglichkeit Prozessschritte zu optimieren.

M. Indikatorenauswertung (Zementindustrie)

Tabelle 7: Indikatorenauswertung- Alitherstellung

Größe	Definition der Effizienzgrößen nach Annahmen der Prozessmodellierung	Modellierung (Flowsheet)	Gesamtmodell (el. Energie in Betrachtung)
Ressourceneffizienz, η_{Ress}	$\frac{\text{Alitmenge}}{\text{Rohstoffmenge (Kalkstein + Sand)}}$ <p>- Bezogen auf die Rohstoffe (Kalkstein und Sand) aus welchen das Produkt entsteht</p>	63 %	
Energieeffizienz, η_{En}	$\frac{(\text{Therm. En.} + \text{El. En.}) - (\text{Wärmeverluste} + \text{Abgaswärme} + \text{Produktwärme})}{\text{Therm. En.} + \text{El. En.}}$ <p>- Modellierung: Bedarf an thermischer Energie: ca. 4700 MJ/t_{Zementklinker} ⇒ Verbrennungsgase (Kohleverbrennung) - Bedarf an elektrischer Energie (Literaturwerte für Portlandzement)</p>	65 %	61 %
Exergieeffizienz, ζ	$\frac{(\text{Therm. En.} + \text{El. En.}) - (\text{Wärmeverluste})}{\text{Therm. En.} + \text{El. e En.}}$ <p>- Theoretische Möglichkeit der Nutzung von Wärmeenergie im Abgas und Produkt - Vernachlässigung von Exergiemengen in den Wärmeverlusten</p>	70 %	
Klimaeffizienz, spezifische CO ₂ -Emission	<p>Rohstoff- bezogene spezifische CO₂ - Emission</p> <p>Brennstoff (Kohle)- bezogene spezifische CO₂ - Emission</p> <p>Elektrische En.- bezogene spezifische CO₂ - Emission</p> <p>Gesamte spezifische CO₂ - Emission</p>	<p>580 kg/t_{Alit}</p> <p>342 kg/t_{Alit}</p> <p>-</p> <p>922 kg/t_{Alit}</p>	<p>580 kg/t_{Alit}</p> <p>342 kg/t_{Alit}</p> <p>52 kg/t_{Alit}</p> <p>974 kg/t_{Alit}</p>

Tabelle 8: Indikatorenauswertung – Belitherstellung

Größe	Definition der Effizienzgrößen nach Annahmen der Prozessmodellierung	Modellierung (Flowsheet)	Gesamtmodell (el. Energie in Betrachtung)
Ressourceneffizienz, η_{Ress}	$\frac{\text{Belitmenge}}{\text{Rohstoffmenge (Kalkstein + Sand)}}$ <p>- Bezogen auf die Rohstoffe (Kalkstein und Sand) aus welchen das Produkt entsteht</p>	66 %	
Energieeffizienz, η_{En}	$\frac{(\text{Therm. En.} + \text{El. En.}) - (\text{Wärmeverluste} + \text{Abgaswärme} + \text{Produktwärme})}{\text{Therm. En.} + \text{El. En.}}$ <p>- Modellierung: Bedarf an thermischer Energie: ca. 4000 MJ/t_{Belit} ⇒ Verbrennungsgase (Erdgas-Verbrennung) - Bedarf an elektrischer Energie: Annahme => 80 % des Bedarfs für den Mahlprozess bei der Portlandzementherstellung</p>	72 %	68 %
Exergieeffizienz, ζ	$\frac{(\text{Therm. En.} + \text{Elektrische En.}) - (\text{Wärmeverluste})}{\text{Therm. En.} + \text{El. En.}}$ <p>- Theoretische Möglichkeit der Nutzung von Wärmeenergie im Abgas und Produkt - Vernachlässigung von Exergiemengen in den Wärmeverlusten</p>	74 %	
Klimaeffizienz, spezifische CO ₂ -Emission	<p>Rohstoff- bezogene spezifische CO₂ - Emission</p> <p>Brennstoff (Erdgas)- bezogene spezifische CO₂ - Emission</p> <p>Elektrische En.- bezogene spezifische CO₂ - Emission</p> <p>Gesamte spezifische CO₂ - Emission</p>	<p>500 kg/t_{Belit}</p> <p>300 kg/t_{Belit}</p> <p>-</p> <p>800 kg/t_{Belit}</p>	<p>500 kg/t_{Belit}</p> <p>300 kg/t_{Belit}</p> <p>42 kg/t_{Belit}</p> <p>842 kg/t_{Belit}</p>

Tabelle 9: Indikatorenauswertung – Celitementherstellung (Variante 1)

Größe	Definition der Effizienzgrößen nach Annahmen der Prozessmodellierung	Modellierung (Flowsheet)	Gesamtmodell (el. Energie in Betrachtung)
Ressourceneffizienz, η_{Ress}	$\frac{\text{Celitementmenge}}{\text{Rohstoffmenge (Kalkstein + Sand + Wasser)}}$ <p>- Bezogen auf die Rohstoffe (Kalkstein, Sand und Wasser) aus welchen das Produkt entsteht</p>	75 %	
Energieeffizienz, η_{En}	$\frac{(\text{Therm. En. + El. En.}) - (\text{Wärmeverluste} + \text{Abgaswärme} + \text{Produktwärme})}{\text{Therm. e En. + El. En.}}$ <p>- Modellierung: Bedarf an thermischer Energie: ca. 3200 MJ/t_{Celitement} \Rightarrow Verbrennungsgase (Kohle-Verbrennung) - Bedarf an elektrischer Energie: Annahme \Rightarrow Doppelte Menge am Bedarf für den Mahlprozess im Vergleich zu den Portlandzement</p>	56 %	51 %
Exergieeffizienz, ζ	$\frac{(\text{Therm. En. + El. En.}) - (\text{Wärmeverluste})}{\text{Therm. En. + El. En.}}$ <p>- Theoretische Möglichkeit der Nutzung von Wärmeenergie im Abgas und Produkt - Vernachlässigung von Exergiemengen in den Wärmeverlusten</p>	62 %	
Klimaeffizienz, spezifische CO ₂ -Emission	Rohstoff-bezogene spezifische CO ₂ - Emission Brennstoff (Kohle)- bezogene spezifische CO ₂ - Emission Elektrische En.- bezogene spezifische CO ₂ - Emission Gesamte spezifische CO ₂ - Emission	270 kg/t _{Celitement} 220 kg/t _{Celitement} - 490 kg/t _{Celitement}	270 kg/t _{Celitement} 210 kg/t _{Celitement} 102 kg/t _{Celitement} 592 kg/t _{Celitement}

Tabelle 10: Indikatorenauswertung – Celitementherstellung (Variante 2)

Größe	Definition der Effizienzgrößen nach Annahmen der Prozessmodellierung	Modellierung (Flowsheet)	Gesamtmodell (el. Energie in Betrachtung)
Ressourceneffizienz, η_{Ress}	$\frac{\text{Celitementmenge}}{\text{Rohstoffmenge (Kalkstein + Sand + Wasser)}}$ <p>- Bezogen auf die Rohstoffe (Kalkstein, Sand und Wasser) aus welchen das Produkt entsteht</p>	78 %	
Energieeffizienz, η_{En}	$\frac{(\text{Therm. En. + El. En.}) - (\text{Wärmeverluste} + \text{Abgaswärme} + \text{Produktwärme})}{\text{Therm. En. + El. En.}}$ <p>- Modellierung: Bedarf an thermischer Energie: ca. 3200 MJ/t_{Celitement} \Rightarrow Verbrennungsgase (Kohle-Verbrennung) - Bedarf an elektrischer Energie: Annahme \Rightarrow Doppelte Menge am Bedarf für den Mahlprozess im Vergleich zu den Portlandzement</p>	52 %	50 %
Exergieeffizienz, ζ	$\frac{(\text{Therm. En. + El. En.}) - (\text{Wärmeverluste})}{\text{Therm. En. + El. En.}}$ <p>- Theoretische Möglichkeit der Nutzung von Wärmeenergie im Abgas und Produkt - Vernachlässigung von Exergiemengen in den Wärmeverlusten</p>	60 %	
Klimaeffizienz, spezifische CO ₂ -Emission	Rohstoff-bezogene spezifische CO ₂ - Emission Brennstoff (Kohle)- bezogene spezifische CO ₂ - Emission Elektrische En.- bezogene spezifische CO ₂ - Emission Gesamte spezifische CO ₂ - Emission	250 kg/t _{Celitement} 205 kg/t _{Celitement} - 455 kg/t _{Celitement}	250 kg/t _{Celitement} 205 kg/t _{Celitement} 102 kg/t _{Celitement} 557 kg/t _{Celitement}

N. Beispielprozess 2: Der bioliq®- Prozess

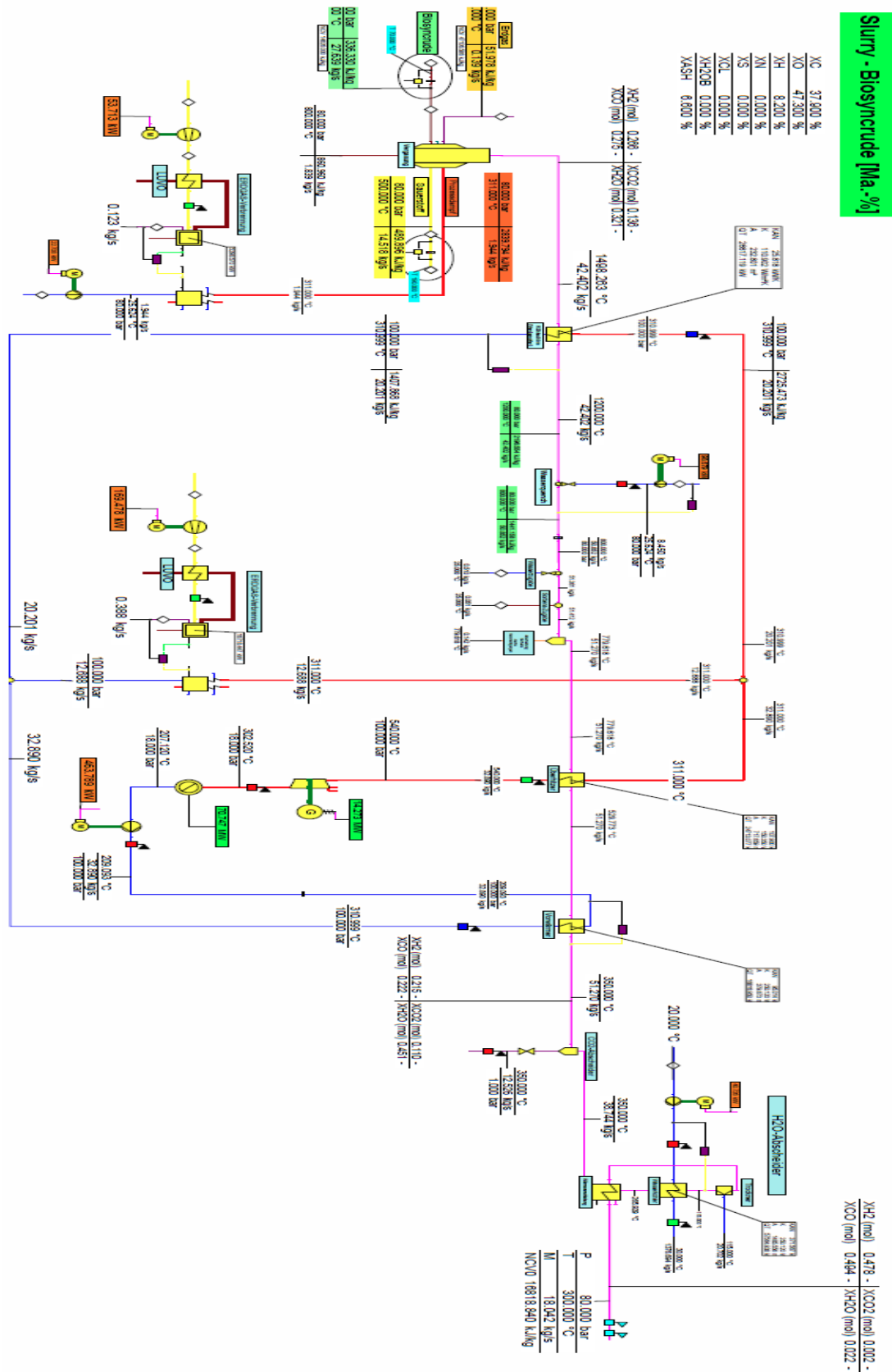


Abbildung 32: Prozessschema bioliq®- Verfahren mit Epsilon®- Professional; gleiches Prozessschema für beide Fälle, jedoch unterschiedliche Stoff- und Energieströme und damit Vergasungstemperaturen, Fall 1 (1500 °C) und Fall 2 (1250 °C)