

**Programm zur Förderung der angewandten Forschung und Entwicklung an  
Hochschulen für angewandte Wissenschaften – Fachhochschulen,  
Förderperiode 2018 – 2021;  
Programmsäule Strukturimpuls Forschungseinstieg**

**Zwischenbericht zum Forschungsprojekt ReFer  
Ressourceneffizienz durch digitale Wert- und Stoffstrommodellierung in  
Fertigungsprozessen**

Prof. Dr.-Ing Sandra Krommes  
Florian Tomaschko

gefördert durch

Bayerisches Staatsministerium für  
Wissenschaft und Kunst

Bayerisches Staatsministerium für  
Wissenschaft und Kunst



Rosenheim, den 29. Juni 2020

## Allgemeine Angaben

- **Forschungsprojekt:**

Ressourceneffizienz durch digitale Wert- und Stoffstrommodellierung in Fertigungsprozessen (ReFer)

- **Antragsteller und Koordinator:**

Technische Hochschule Rosenheim (ehemals Hochschule Rosenheim)

Prof. Dr.-Ing. Sandra Krommes

FG Sustainable Engineering & Management (SEM)

Hochschulstraße 1, 83024 Rosenheim

Tel.: 08031 – 805 – 2416 | <http://sem.fh-rosenheim.de>

- **Projektpartner:**

Otto Dunkel GmbH, 84453 Mühldorf am Inn

Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG, 83413 Fridolfing

- **Beteiligte der TH Rosenheim:**

FG Informatik und Data Science, Prof. Dr.-Ing Jochen Schmidt

FG Produktionswirtschaft, Prof. Dr.-Ing Oliver Kramer

FG Sustainable Engineering & Management (siehe Antragsteller)

Projekt proto\_lab, Technische Hochschule Rosenheim

- **Berichtszeitraum:**

01.01.2019 – 31.05.2020

- **Förderzeitraum:**

01.01.2019 – 31.12.2021

## Inhaltsverzeichnis

<b>Allgemeine Angaben</b> .....	<b>2</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>7</b>
1.1 Problemstellung .....	7
1.2 Zielsetzung .....	8
<b>2. Aktueller Projektstand</b> .....	<b>9</b>
2.1 Vorgehensweise .....	9
2.2 Stand der Methodenentwicklung zur Analyse der Prozessketten und Bewertung der Ressourceneffizienz .....	11
2.3 Stand der Entwicklung des Vernetzungs- und Datenerfassung- und -verarbeitungskonzepts .....	13
2.4 Stand des Grobkonzepts zur Modellierung des dynamischen Wert- und Stoffstroms einer Prozesskette .....	16
<b>3. Stand der Wissenschaft und Technik</b> .....	<b>18</b>
<b>4. Fazit</b> .....	<b>19</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>20</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verknüpfung der Prozesskette mit einem dynamischen Wert- und Stoffstrommodell ..8	
Abbildung 2: Vorgehen, Arbeitspakete und Meilensteine des Forschungsvorhabens.....10	
Abbildung 3: Darstellung des statischen Wert- und Stoffstrommodells sowie bestehender Datenquellen.....12	
Abbildung 4: Vernetzungsplan der Sensorik am Beispiel Plattensäge .....14	
Abbildung 5: Aufbau der Vernetzung .....15	
Abbildung 6: Aktueller Stand des Grobkonzeptes zur Abbildung des dynamischen Wert- und Stoffstrommodells .....16	
Abbildung 7 Soll-Ist-Vergleich des Meilensteinplans des Projekts ReFer	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stand der abgeschlossenen, wissenschaftlichen Arbeiten im Rahmen des Projekts ReFer	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
--	---

## Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
CPS	Cyber-physisches System
ERP	Enterprise Resource Planning System
MES	Manufacturing Execution System
ReFer	Ressourceneffizienz durch digitale Wert- und Stoffstrommodellierung in Fertigungsprozessen
SPS	speicher-programmierbare Steuerung
THRO	Technische Hochschule Rosenheim

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes Ressourceneffizienz durch digitale Wert- und Stoffstrommodellierung in Fertigungsprozessen (ReFer) soll ein dynamisches Wert- und Stoffstrommodell einer Prozesskette (digitaler Zwilling) erstellt werden, um die Ressourceneffizienz der Prozesskette um 5-10 % zu steigern. Hierzu werden Daten aus betrieblichen Informationssystemen (Enterprise Resource Planning System (ERP), Manufacturing Execution System (MES)) und der Feldebene (Maschinendaten, Sensordaten) genutzt sowie konsistent zu einem digitalen Wert- und Stoffstrommodell verknüpft (cyber-physisches-System).

Der erste Meilenstein „Abschluss der Analysephase“ wurde wie geplant erreicht und die gesetzten Ziele wurden mit den Projektpartnern umgesetzt. Als erste wissenschaftliche Ergebnisse wurden eine Methodik und eine Vorgehensweise zur Prozesskettenanalyse und Ressourceneffizienzbewertung erarbeitet und validiert. Diese nutzt die Methodik der Wertstromanalyse und kombiniert sie in einer reduzierten Form mit der Energie- und Stoffflussanalyse. Ausgehend von dieser kombinierten Methodik, die die Prozesskette analysiert und in ein statisches Wert- und Stoffstrommodell überführt, kann auf Basis eines Daten- und Vernetzungsmodells sowie empirischer Daten ein dynamisches Wert- und Stoffstrommodell erstellt werden, welches sich zur echtzeitbasierten Analyse und Identifikation von Ressourceneffizienz-Potentialen nutzen lässt. Technische Herausforderung der Erstellung eines dynamischen Wert- und Stoffstrommodells ist die Digitalisierung der Fertigung. Das Projekt will eine sog. Brownfield-Fertigung abdecken, d.h. der Anlagen- und Maschinenpark weist eine heterogene Digitalisierungsreife auf (u.a. unterschiedliche Anlagen- und Maschinenhersteller, Maschinenalter, Schnittstellen, Kommunikationsprotokolle). Basierend auf dieser gegebenen Brownfield-Situation wurde ein Vernetzungskonzept inklusive einer technischen Lösung zur digitalen Erfassung der Wert- und Stoffströme entwickelt. Dabei verfolgt das Projekt keine proprietäre Lösung, sondern zielt auf Open Source Lösungen, um der Heterogenität der Brownfield-Umgebung Rechnung zu tragen.

An der Technischen Hochschule Rosenheim (THRO) wurde mit dem Aufbau des Demonstrators (Brownfield-Ansatz) begonnen. Parallel zu den Aktivitäten am Demonstrator konnte in den beiden Unternehmen die Prozessanalyse abgeschlossen werden. Darauf aufbauend befindet sich die Prozessvernetzung in einem fortgeschrittenen Stadium und es wird nachfolgend mit der Datenanalyse und -verarbeitung begonnen. Zur Projektkoordinierung fanden neben den geplanten Kick-off-Workshops regelmäßige Abstimmungstermine mit den Projektpartnern statt. Das Gesamtmethodekonzept sowie die nächsten Projektschritte zur Meilensteinerreichung sind detailliert und unternehmensspezifisch geplant.

Im Rahmen der bisher erzielten Fortschritte wird von einer Gesamtzielerreichung zum Ende des Projektes ausgegangen.

## 1. Einleitung

### 1.1 Problemstellung

Im Jahr 2017 betrug der inländische Materialverbrauch an biotischen und abiotischen Ressourcen über die Sektoren in Summe 1.296 Mio. t. Betrachtet man das verarbeitende Gewerbe, so lag der Anteil der Materialaufwendungen am Umsatz in 2017 durchschnittlich bei 56 % (Statisches Bundesamt 2019). Deutschland strebt bis 2020 auf Basis von 1994 eine Verdopplung der Rohstoffproduktivität an. Experten gehen davon aus, dass das Ziel verfehlt wird. Potentiale zur Steigerung der Rohstoffproduktivität werden in der Digitalisierung der Produktion gesehen. So liefert die vertikale und horizontale digitale Integration der Produktion vielfältige Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz (Gunther und Steinhilper 2017). Schebeck et al. (2017) quantifizieren die Ressourcenpotentiale durch die digitale Transformation der Produktion auf bis zu 50 %. Dieses Potential ergibt sich aus der Vielzahl von Industrie 4.0 Anwendungen.

Ein diskutierter Ansatz ist die Erfassung und die Nutzung fertigungsrelevanter Informationen und Daten zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Ziel dieser Ansätze ist es, in der Fertigung durch die Vernetzung von Prozessschritten sowie die echtzeit-basierte Datenerfassung und -analyse der Wert- und Stoffströme Material- und Energieverbräuche sowie Leistungsbedarfe (elektrische, Druckluft, Wärme, Kälte) zu reduzieren. In dem Zusammenhang spricht man von einem digitalen Zwilling, bei dem durch die Verknüpfung von Daten aus betrieblichen Informationssystemen, Maschinen und Anlagen sowie Sensorik die Wert- und Stoffströme einer Prozesskette echtzeit-basiert und kontinuierlich abgebildet werden. Mittels deskriptiver Analysemethoden lassen sich diese Daten und Prozessinformationen analysieren, um Ressourceneffizienzpotentiale zu erkennen.

Problem ist, dass die Prozessdaten zwar teils in Unternehmen erfasst und gespeichert, aber kaum für Fragestellungen der Ressourceneffizienz genutzt werden. Selten liegt ein durchgängiger und konsistenter Datensatz vor oder wird eine konsistente Datenkette von Prozessschritten in den benötigten Zeitintervallen erfasst. Zu unterschiedlich sind beispielsweise die Datenformate, fehlen prozessschrittübergreifende Vernetzungen; oder es werden relevante Daten der Energie- und Materialverbräuche nicht kontinuierlich digital erfasst. Die Erstellung und die Anwendung des digitalen Zwillings und der darauf basierenden Datenanalyse zum Monitoring und zur Identifikation von Ressourceneffizienzpotentialen bei Prozessketten steht am Anfang (Brenner 2018). Bisherige Arbeiten fokussieren auf die digitale Erfassung und Analyse der Energieverbräuche und -leistung, während die verknüpfte Wert- und Stoffstromanalyse bisher keine Anwendung findet (Lewin et al. 2019, VDI 4803).

Die Digitalisierung der Produktion zur Steigerung der Ressourceneffizienz hat neben Gründen der Qualitätsverbesserung und der Erhöhung der Kundenzufriedenheit indes bei den Unternehmen eine hohe Relevanz (Frühauf 2018). Vor allem KMU und mittelstandsgeführte<sup>1</sup> Unternehmen sehen Potentiale in der Digitalisierung der Produktion, haben aber begrenzte Personal-Kapazitäten sowie fehlen Fach- und Methoden-Kompetenzen zur Umsetzung der Digitalisierung in der Produktion. Zudem erschwert die strukturelle Komplexität den Einstieg in die Transformation. Der Anlagen- und Maschinenpark ist meist heterogen hinsichtlich Hersteller, Alter, Vernetzungsreife, Kommunikationsprotokolle und Schnittstellen und darüber hinaus oftmals nicht zur digitalen Vernetzung und Datenerfassung vorbereitet. Dies macht den Einsatz von Standardlösungen der Software-Häuser oder einzelner Maschinenhersteller nicht nur aus Kostenaspekten unattraktiv. Es

---

<sup>1</sup> Mittelstandsgeführte Unternehmen erfüllen nicht die KMU-Kriterien an Umsatz und Mitarbeiter, weisen jedoch die Strukturen und die Organisation von KMU auf. Oftmals handelt es sich um Familienunternehmen, die landläufig auch als Mittelstand bezeichnet werden. Nachfolgend sind bei KMU daher KMU und mittelstandsgeführte Unternehmen gemeint.

fehlen Open Source-Lösungen zur Digitalisierung der Fertigung, die auf einem Brownfield-Ansatz<sup>2</sup> basieren. Hier setzt das Projektvorhaben ReFer an.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel des Projektes ist es, für Fertigungsprozesse ein dynamisches Wert- und Stoffstrommodell zu applizieren, um die Ressourceneffizienz der Prozesskette um 5-10 % zu steigern. Das Modell ist dabei ein sogenanntes cyber-physisches Produktionssystem (CPS) oder auch digitaler Zwilling, der die Wert-, Energie- und Stoffströme der Fertigungsprozesse abbildet. Dafür müssen die realen Prozessdaten zu Wert- und Stoffströmen der Prozesskette aus der Feldebene (aus speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), Messgeräten, Sensorik) mit Daten aus betrieblichen Informationssystemen (z. B. Manufacturing Execution System (MES), Enterprise Resource Planning System (ERP)) konsistent, kontinuierlich und echtzeit-basiert verknüpft werden (Abbildung 1). Ergebnis ist ein Instrument (IT-Tool), das die Ressourceneffizienz über die Prozessschritte auf verschiedenen Ebenen überwacht und visualisiert (Monitoring) sowie mittels applizierter Datenanalysemethoden zur Identifikation von Ressourceneffizienzpotentialen dient (deskriptive Datenanalyse).

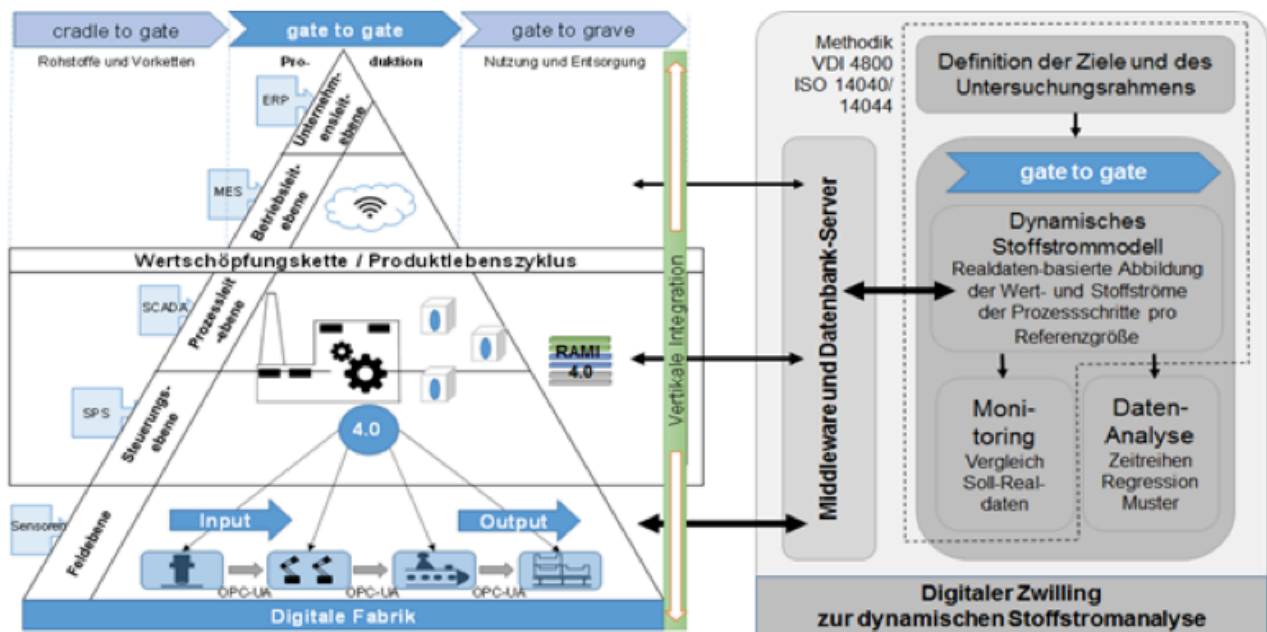


Abbildung 1: Verknüpfung der Prozesskette mit einem dynamischen Wert- und Stoffstrommodell

Für die Erstellung bzw. Modellierung des digitalen Zwillings ist eine methodische Vorgehensweise für die Analyse der Prozesskette und zur Bewertung der Ressourceneffizienz zu entwickeln und umzusetzen. Dieses ist um ein technisches Vernetzungs- sowie Datenerfassungs- und -verarbeitungskonzept für die relevanten Prozessdaten zu ergänzen.

<sup>2</sup> Viele Konzepte, die im Rahmen von Industrie 4.0, Smart Factory oder Internet of Things dargestellt werden, basieren auf einer digitalen Fabrik, die auf einer „grünen Wiese“ neu errichtet und in Betrieb genommen wird (Greenfield-Ansatz). In der Realität überwiegen jedoch Anlagen- und Maschinenparks unterschiedlicher Hersteller und Alters sowie mit verschiedenen Schnittstellen und Kommunikationsprotokollen (Brownfield-Ansatz), so dass Digitalisierungs-Lösungen für die „braune Wiese“ eine höhere Relevanz haben.



## 2. Aktueller Projektstand

### 2.1 Vorgehensweise

Der technische Ansatz des Projektes ist es, durch die Transformation der Produktion zur digitalen Produktion von der Feldebene bis zur Betriebsleitebene der Prozesse Daten bereitzustellen, die zur Steigerung der Ressourceneffizienz genutzt werden können. Mit den beteiligten Projektpartnern sind dafür die Anforderungen an eine durchgängige digitale Daten- und System-Architektur (Hardware-Konzept) zu definieren sowie geeignete Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz von betrieblichen Prozessen zu entwickeln und zu validieren. Basierend auf den Ressourceneffizienzfragestellungen sind empirische Daten zu erheben, deren Konsistenz, Güte und Eignung zu prüfen sind. Darauf aufbauend werden deskriptive Datenanalysemethoden angewandt, um Fertigungsprozesse realdaten-basiert und kontinuierlich hinsichtlich Ressourceneffizienz zu analysieren.

Die Vorgehensweise, die Methodik sowie das Vernetzungs- und Datenmodellkonzept fließen in einen Leitfaden zur dynamischen Wert- und Stoffstrommodellierung (digitaler Zwilling) ein. Darüber hinaus wird an der THRO ein Demonstrator über eine Prozesskette zur Veranschaulichung und zum Transfer der Vorgehensweise und Methodik entwickelt. Das Projektteam besteht aus zwei Industrieunternehmen (ODU GmbH; Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG) und drei Fachgebieten der THRO (FG Sustainable Engineering & Management, FG Produktionswirtschaft, FG Informatik und Data Science).

Das methodische Vorgehen des Vorhabens basiert auf der Design Science Research Methodology nach Peffers et al. 2007. Es unterteilt sich in vier Schritte von der Problemstellung und Zielsetzung bis zur Demonstration und Kommunikation (Abbildung 2):

- **AP 1 Problemstellung und Ziele:** Gemeinsame Klärung der Projektziele und -arbeitsweise sowie der (Unternehmens-) Ziele sowie Auswahl der Prozessschritte/-kette.
- **AP 2 Analyse:** Ist-Analyse der Prozessschritte/-kette (Produkt, Prozess, Wert- und Stoffströme, verfügbare Prozessdaten und Datenformate, zu ergänzende Daten und Sensorik) sowie Analyse des Stands der Wissenschaft zur Ressourceneffizienz-Bewertung und Datenanalyse mit Blick auf die Zielsetzung (Meilenstein 1: Ist-Analyse liegt vor).
- **AP 3 Entwicklung:** Entwicklung des Soll-Prozessmodells (Referenzmodell fürs Monitoring), Definition des Prozessdaten- und Hardware-Konzepts sowie Entwicklung des IT-Konzepts für die dynamische Wert- und Stoffstrommodellierung einschließlich Monitoring und Analyse-Methoden (IT-Monitoring-Konzept) (Meilenstein 2: Leitfaden mit Prozessdaten-, Hardware- und Monitoring-Konzepten sowie Analyse-Methoden liegt vor).
- **AP 4 Demonstration und Kommunikation:** IT-technische Umsetzung des dynamischen Wert- und Stoffstrommodells und dessen Validierung im Unternehmen (Meilenstein 3: Rechnergestütztes Analyse-Tool (Demonstrator) ist umgesetzt), Implementierung und Analyse von Ressourceneffizienzpotentialen auf Basis eines realdaten-basierten Monitoring und von Datenanalyse-Methoden, Vorbereitung der Ergebnisverwertung.

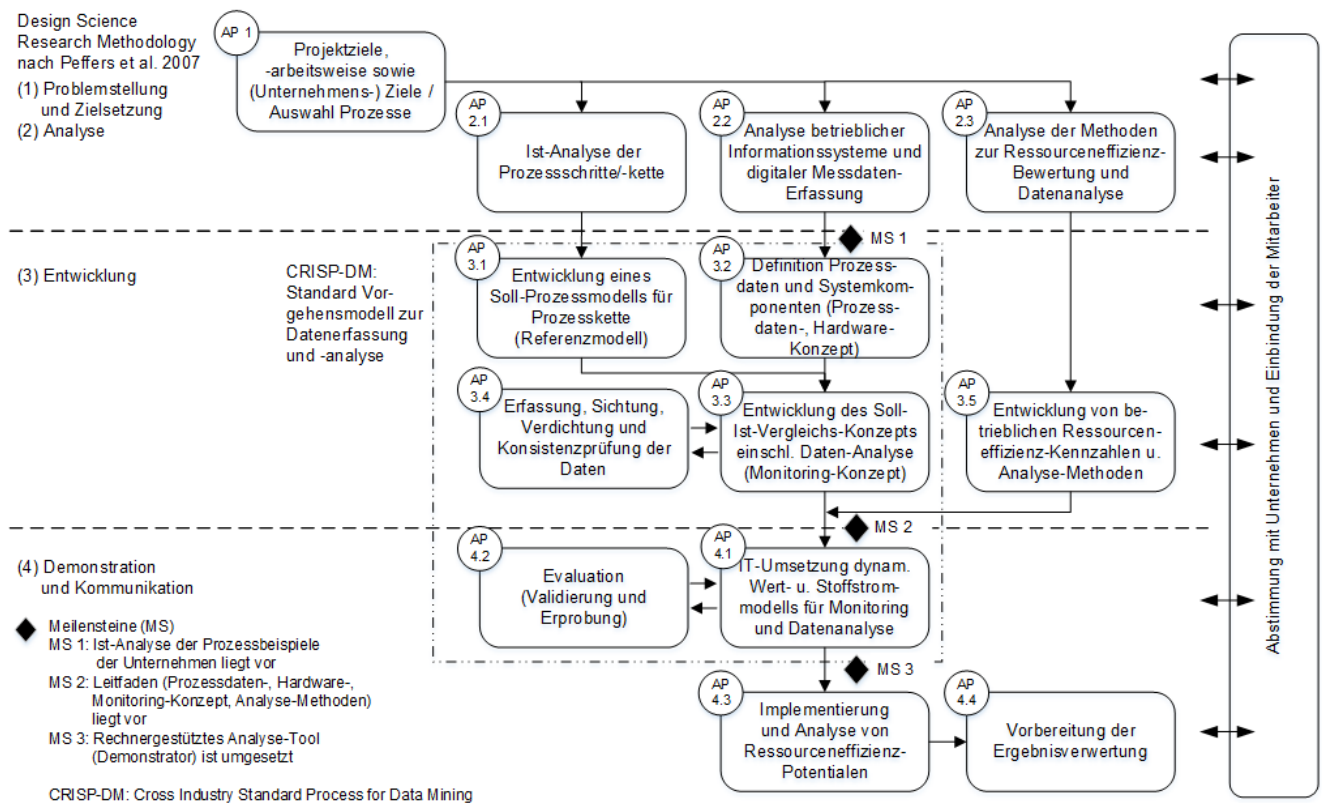


Abbildung 2: Vorgehen, Arbeitspakete und Meilensteine des Forschungsvorhabens

Im Rahmen des Projektfortschrittes wurden die Aufgabenpakete 1 bis 3.3 abgeschlossen bzw. teilweise abgeschlossen. Dabei konnten durch die gemeinsamen Forschungsarbeiten mit den Projektpartnern bereits folgende methodische Zwischenergebnisse erzielt werden:

- Definition der Projektziele, der Prozesskette und des Zusammenarbeitsmodells (Arbeitspaket (AP 1))
- Ist-Analyse der Prozessschritte/-kette bei den Projektpartnern und an der THRO (Demonstrator) (AP 2.1) sowie Analyse der betrieblichen Informationssysteme und erforderlichen Messdaten für die Sensorikauswahl (AP 2.2)
- Entwicklung und Validierung einer Methodik zur Prozesskettenanalyse und Ressourceneffizienzbewertung (AP 2.3, siehe Kapitel 2.2)
- Entwicklung und Validierung eines Soll-Prozessmodells der Prozesskette (statische Wert- und Stoffstromanalyse und -modellierung der Prozesskette (AP 3.1))
- Entwicklung und Umsetzung eines Konzeptes zur Vernetzung sowie Datenerfassung und Verarbeitung (AP 3.2, siehe Kapitel 2.3)
- Grobkonzept zur Abbildung des dynamischen Wert- und Stoffstrommodells (AP 3.3, siehe Kapitel 2.4)

Der Meilenstein 1 des Projektes ist erfüllt. Mit der Bearbeitung des Leitfadens (Meilenstein 2) wurde entsprechend dem inhaltlichen Projektstand begonnen. Die weiteren Arbeitspakete befinden sich in Bearbeitung bzw. sind im Projektplan definiert (siehe Kapitel 4).

## 2.2 Stand der Methodenentwicklung zur Analyse der Prozessketten und Bewertung der Ressourceneffizienz

Für die Analyse der Prozessketten wurde eine Methodik herausgearbeitet, die die relevanten Inhalte der Wertstromanalyse mit der Energie- und Stoffstromanalyse kombiniert. Die Methodik gliedert sich in drei Teilbereiche:

- Im ersten Schritt wird der Prozess im Sinne einer Wertstromanalyse (es wurden die für die Projektzielsetzung relevanten Inhalte ausgewählt) betrachtet. Hierzu wird beginnend vom letzten Fertigungsschritt der Prozess rückwärts (vor Ort in der Fertigung) durchlaufen. Dabei wird jede, am Prozess beteiligte Fertigungsmaschine aufgenommen und es werden Daten zur Zykluszeit, Losgröße, Maschinenlaufzeit und Ausschussrate erfasst. Als Zwischenergebnis entsteht ein Prozessbild mit allen beteiligten Maschinen und Anlagen sowie deren Zusammenhang untereinander.
- Im zweiten Schritt erfolgt ein weiterer Durchlauf zur Erfassung der Stoffströme. Hierbei werden, wiederum vor Ort, alle In- und Outputströme des jeweiligen Prozessschrittes notiert. Dies umfasst sowohl Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffströme wie zum Beispiel Energie, Druckluft oder Fertigungsmaterialien, als auch Rohteile und Halbzeuge sowie Datenströme (Teile- oder Auftragsinformationen). Diese werden entsprechend des betrachteten Fertigungsprozesses mit einer Bezugsgröße verknüpft.
- Parallel zum zweiten Schritt wird die Herkunft und das Monitoring (falls vorhanden) der In- und Outputströme gekennzeichnet. Datenquellen stellen beispielsweise Maschinensteuerungen, betriebliche Informationssysteme oder in ihrer einfachsten Form „Excel“-Tabellen oder Datenblätter dar.

Die ermittelten Informationen werden in einem für das Projekt konzipierten Wert- und Stoffstromdiagramm (Abbildung 3) für einen statischen Zustand der Prozesskette abgebildet. Zugleich können mittels des Diagramms schon erste Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz der Prozesskette identifiziert werden. Bei der Auswahl der Ressourceneffizienz-Kennzahlen ist die Beteiligung der Feld-, Prozess- und Leitebene entscheidend. Die Mitarbeiter der betroffenen Prozesskette sind frühzeitig zu informieren und zu beteiligen. Dies gilt insbesondere um das Prozesswissen der Mitarbeiter zu aktivieren und einzubeziehen. Ggfs. ist die Arbeitnehmervertretung hinzuziehen, um das Ziel der Steigerung der Ressourceneffizienz durch die Digitalisierung der Produktion gemeinsam zu definieren.

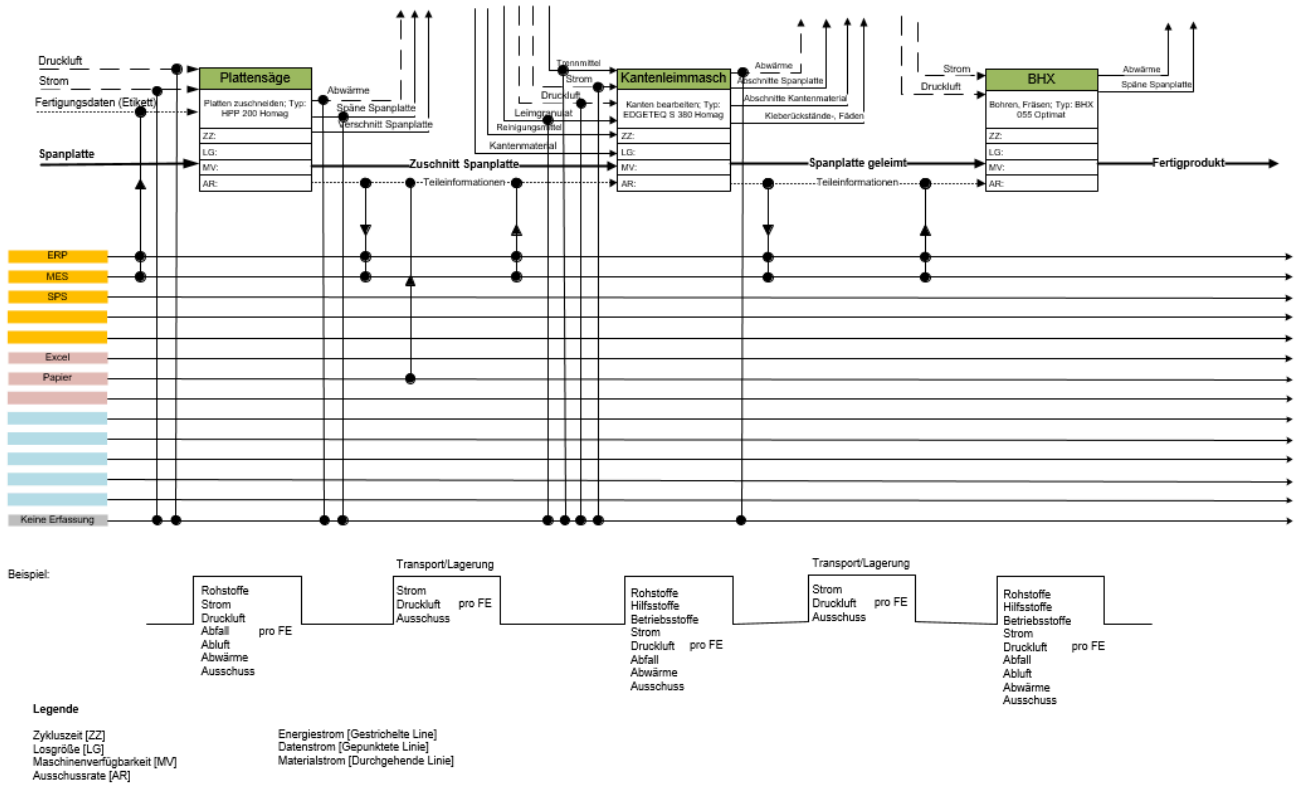


Abbildung 3: Darstellung des statischen Wert- und Stoffstrommodells sowie bestehender Datenquellen

Als Ergebnis erhält der Anwender eine detaillierte Prozessübersicht mit allen relevanten Informationen, die für die weitere Methodenentwicklung benötigt werden. Bereits an dieser Stelle werden Abweichungen im Prozessablauf sowie fehlende Daten und Informationen sichtbar. Durch die detaillierte Darstellung der Daten- und Informationsherkunft können gezielt intransparente Prozessfelder identifiziert werden. Als weiteren Ansatzpunkt fließt an dieser Stelle Prozesswissen der betroffenen Fertigungsmitarbeiter ein, mit welchem gezielt die Ansatzpunkte zur Ressourceneffizienz herausgearbeitet werden können.

## 2.3 Stand der Entwicklung des Vernetzungs- und Datenerfassung- und -verarbeitungs-konzepts

Aufgrund der Heterogenität des Maschinen- und Anlagenparks in der Fertigung wird für die Datenerfassung und -verarbeitung eine Open Source Lösung angestrebt. Diese ermöglicht es, die relevanten Produkt (Wertstrom) sowie Energie- und Stoffstromdaten aus betrieblichen Informationssystemen, Anlagen und Maschinen sowie Sensoren unabhängig von proprietären Lösungen von Software- oder Maschinen-Herstellern zu erfassen, zu verarbeiten und zu analysieren. Damit wird der Brownfield-Situation bei KMU Rechnung getragen.

Im weiteren Verlauf der Methodenanwendung folgt auf Basis des statischen Wert- und Stoffstrommodells der Prozesskette die Vernetzung der ausgewählten Prozessschritte sowie die Konzeptionierung des Datenmodells und die Auswahl der erforderlichen Sensorik, falls Daten und Informationen zu Wert-, Energie- und Stoffströmen nicht anderweitig verfügbar sind. Der Vernetzungsumfang bzw. -aufwand richtet sich dabei nach der Zielsetzung und dem Digitalisierungsgrad des Unternehmens.

Die Daten und Informationen stammen dabei aus vier unterschiedlichen Quellen:

- Daten aus betrieblichen Informationssystemen, z.B. ERP, MES
- Daten aus der Maschinensteuerung (SPS)
- Daten aus Sensoren sowie
- zu berechnende Daten, z.B. aufgrund physikalischer Zusammenhänge.

Eine Herausforderung auf dem Weg zur Ressourceneinsparung durch digitales Wert- und Stoffstrommanagement stellt der Digitalisierungsgrad der Feldebene in den Unternehmen dar. Die benötigten Daten sind oftmals nicht verfügbar oder werden nicht erfasst, da die Prozesse und Maschinen nicht vernetzt sind. Zur Lösung dieser Herausforderung wurde zu Beginn des Projektes eine Vorgehensweise und ein Prototyp zur Vernetzung nicht digitalisierter Maschinen und Anlagen an der THRO entwickelt und getestet. Mittels des Konzeptes und dem dazugehörigen Vernetzungskoffer können benötigte Daten an der Maschine mittels Sensorik erfasst, übertragen und gespeichert werden. Bei der Entwicklung stand im Fokus, dass die Vernetzung ohne spezifisches Know-how durchgeführt werden kann, der Koffer universell und modular einsetzbar ist, sowie, dass die Datenspeicherung dezentral beim jeweiligen Unternehmen erfolgt. In einem Workshop wurde der Forschungsprototyp (Vernetzungskoffer), gemeinsam mit einem Industriepartner industrietauglich umgebaut und bereits in ersten Testläufen im industriellen Umfeld eingesetzt.

Parallel zu den Aktivitäten bei den Industriepartnern vor Ort wird die Methodik und die Technik im Forschungsumfeld der THRO laufend evaluiert und weiterentwickelt. Im Umfeld erfolgt auch die Entwicklung des Demonstrators, um das Vorgehen, die Methodik und das Know-how zu transferieren. Hierfür wurde eine Prozesskette der Holztechnik ausgewählt, welche drei Prozessschritte umfasst:

- Zuschneiden der Holzplatten (Plattensäge),
- Kantenanleimen und Bearbeiten bzw. Aufbereiten der Holzanten (Kantenanleimmaschine) sowie ein
- Bohren und Fräsen von Bohrungen für Griffe, Scharniere und Nuten für Rückwände und Böden (Bohr- und Fräszentrum).

Hierbei wird mit den entwickelten Methoden und Vernetzungslösungen die Grundlage für den späteren Demonstrator zum Wissenstransfer geschaffen und gleichzeitig das Zusammenspiel der einzelnen Module verfeinert. Weiterhin dient das Forschungsumfeld dazu neue Ansätze und Ideen im nicht industriellen Umfeld zu testen und für den Einsatz bei den Industriepartnern vor Ort abzustimmen.

Konkret erfolgt auf Basis des vorliegenden Wert- und Stoffstrommodells eine Auswahl der passenden Sensorik. Am Beispiel der Plattensäge<sup>3</sup> (Demonstrator an der THRO), welche einen geringen bis keinen Digitalisierungsgrad aufweist, wurde folgende Sensorik implementiert (Abbildung 4):

- Strom- und Spannungsmesssensoren zur Erfassung der Maschinenleistung
- Durchflusssensor zur Erfassung des Druckluftverbrauchs
- Durchflusssensor zur Erfassung des Abluftstroms
- Strom- und Spannungsmesssensoren zur Erfassung der Leistung der Abluftgeneratoren
- Wägezellen zur Erfassung des Holzabfalls und zur Berechnung des Produktteilgewichts
- Thermoelement zur Erfassung der Maschinentemperatur

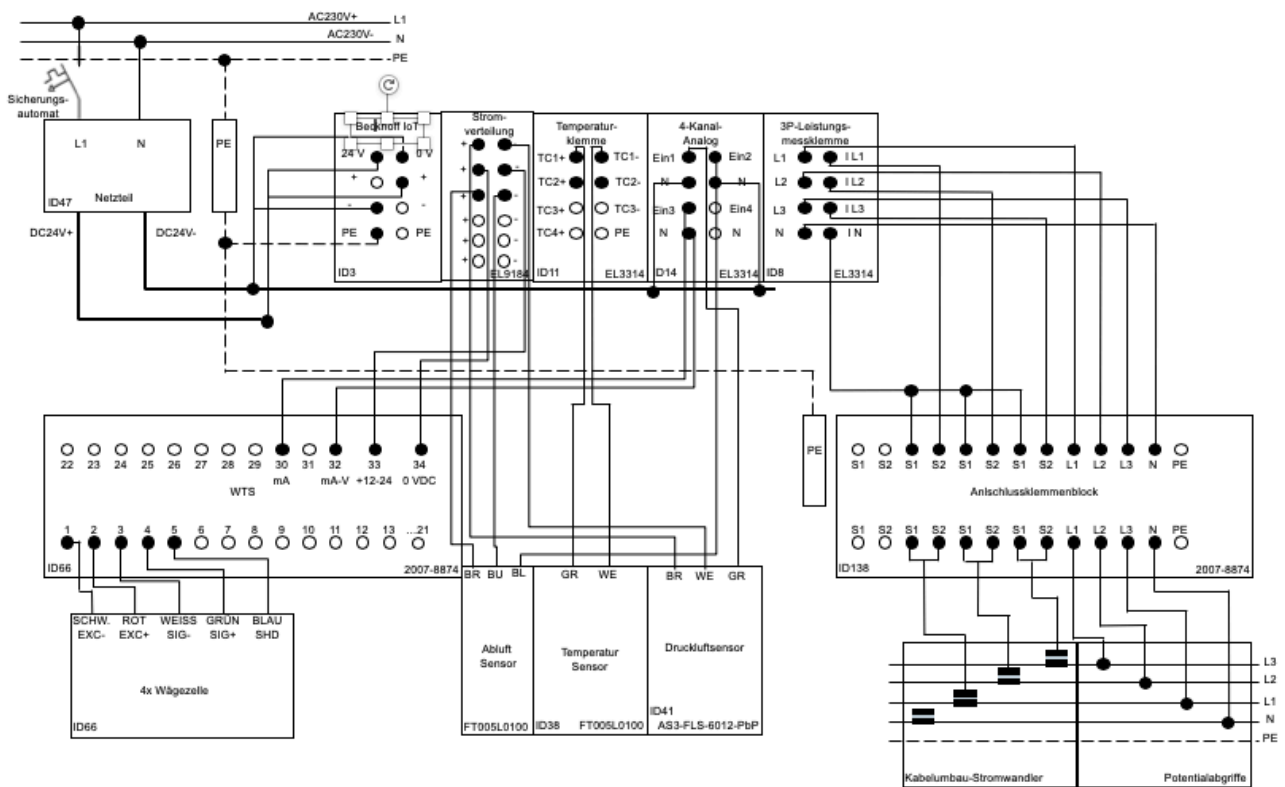


Abbildung 4: Vernetzungsplan der Sensorik am Beispiel Plattensäge

Die Sensoren kommunizieren dabei über sogenannte Input-/Output-Module mit einem IOT-Koppler (Prototyp) des Unternehmens Beckhoff. Dieser IOT-Koppler ermöglicht die einfache Übertragung von Daten aus den Sensoren, da dieser nicht programmiert (wie herkömmliche Datenlogger)

<sup>3</sup> Die beiden weiteren Maschinen des Demonstrators an der THRO (Kantenanleimmaschine, Bohr- und Fräszentrum) wurden ebenfalls entsprechend vernetzt. Die Vernetzung bei den Industriepartnern wurde geplant. Aufgrund der Corona-Situation und Wechsel der Verantwortlichkeiten haben sich Zeitverzögerungen ergeben. Die Vernetzung ist Anfang Q3 2020 geplant.

sondern nur parametrisiert werden muss (Abbildung 5). Die Kommunikation findet dabei über das sogenannte MQTT-Protokoll (publish und subscribe) statt. Diese Elemente sind gleichfalls Bestandteil des entwickelten Vernetzungskoffers. Dieser kann je nach Anwendungsfall dezentral oder als Teil eines Vernetzungskonzeptes (empfohlen) betrieben werden.

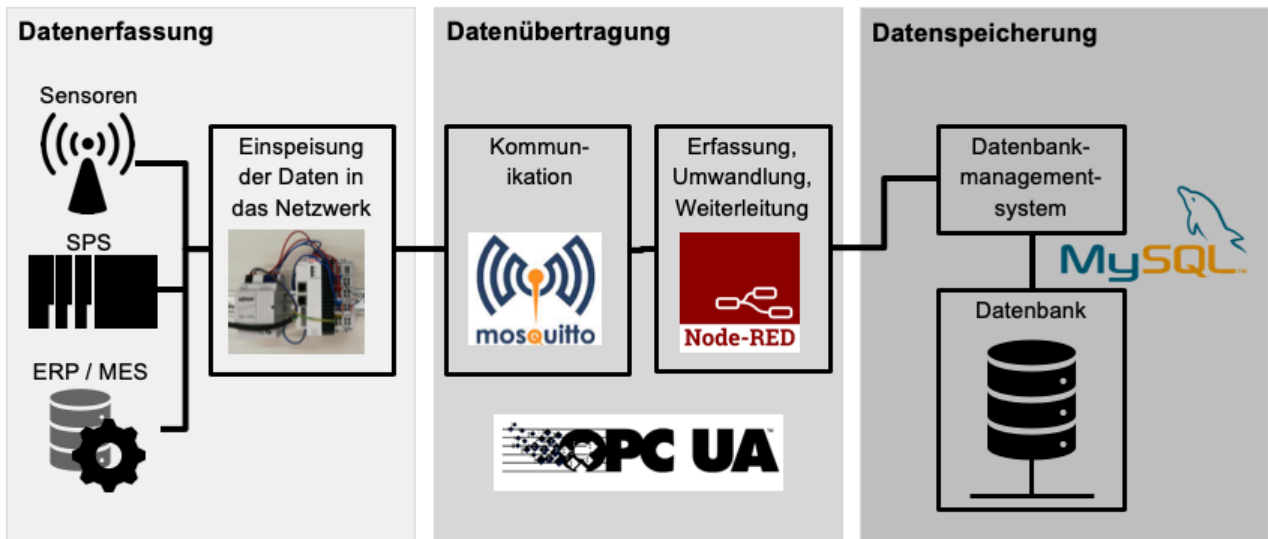


Abbildung 5: Aufbau der Vernetzung

Zum dezentralen Betrieb wird der Koffer um einen Industrie-PC zur Datenspeicherung und um ein internes Kommunikationsnetzwerk ergänzt. Für den Vernetzungsbetrieb steht auf einem Server die Softwareumgebung Node-Red zur Verfügung, mittels der die Daten des IOT-Kopplers empfangen, vorverarbeitet und in eine SQL-Datenbank (mySQL) geschrieben werden. Bei Node-Red handelt es sich um eine objektorientierte Programmierung, die im Internetbrowser eines PCs ausgeführt wird und es dem Anwender ohne weitreichende Programmierkenntnisse ermöglicht das Vernetzungssystem zu implementieren. Die Daten stehen in einer Datenbank zur Weiterverarbeitung zur Verfügung. Zusätzlich zu den Daten aus der Sensorik werden weitere Daten aus der SPS sowie aus MES- und ERP-Systemen ausgelesen. Die Kommunikation findet an dieser Stelle mittels des OPC-UA-Protokolls statt. Dazu wurden mit dem Projektpartner proto\_lab an der THRO Serverlösungen entwickelt, mittels derer auf vorhandene nicht IOT-fähige Systeme zugegriffen werden kann.

## 2.4 Stand des Grobkonzepts zur Modellierung des dynamischen Wert- und Stoffstroms einer Prozesskette

Die weiteren Bearbeitungsschritte folgen dem nachfolgenden, bereits entwickeltem methodischen Grobkonzept (Abbildung 6). Die durchgeführte Wert- und Stoffstromanalyse einschließlich der Vernetzung aller relevanter Daten- und Informationspunkte bilden hierzu die Basis und werden als Backbone bezeichnet. Dieser enthält die digitale Modellierung des Prozesses innerhalb der Datenbank in der in Echtzeit alle angeschlossenen Datenpunkte aufgezeichnet bzw. berechnet werden. Ausgehend aus diesem digitalen Wert- und Stoffstrommodell können je nach Anwendungsfall unterschiedliche Module bedient werden.

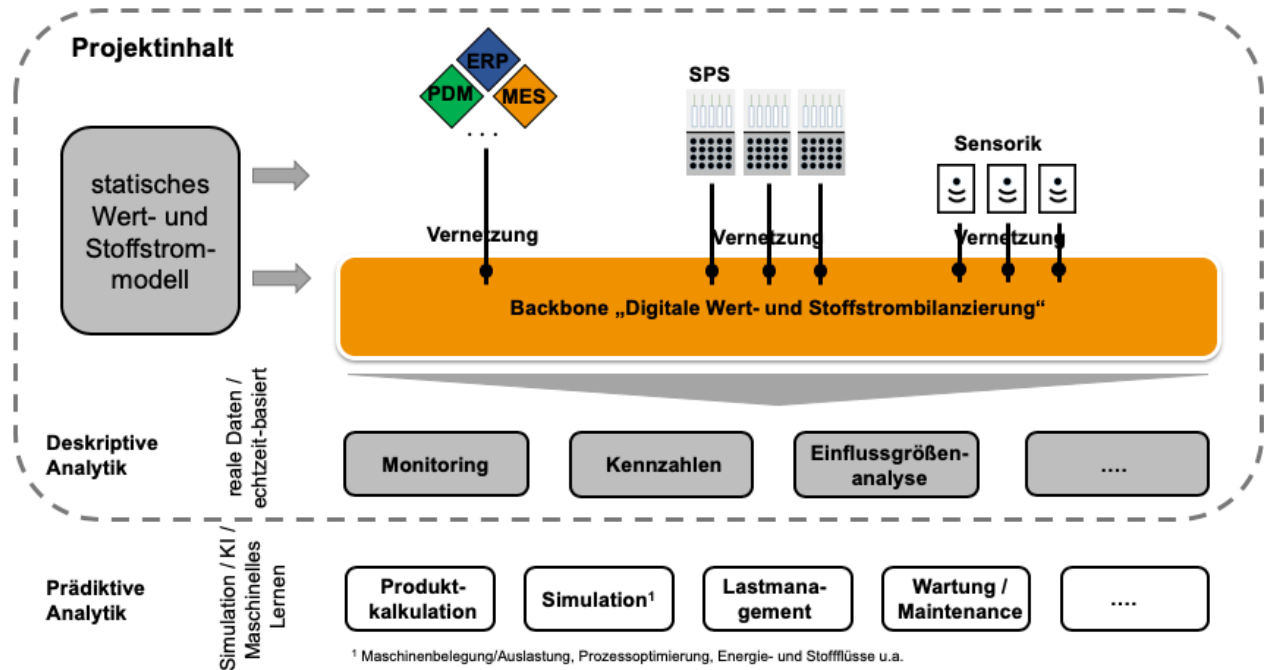


Abbildung 6: Aktueller Stand des Grobkonzeptes zur Abbildung des dynamischen Wert- und Stoffstrommodells

Das Projekt fokussiert dabei auf die Module der deskriptiven Analytik und setzt ganz konkret die Prozesssteuerung mittels Kennzahlen und das Monitoring sowie eine Einflussgrößenanalyse um. Alle drei Module leisten hierbei einen Beitrag zur Verbesserung der Ressourceneffizienz. So wurde bereits am Beispiel der Plattensäge durch Abbildung des digitalen Wert- und Stoffstrommodells (Backbone) in ersten Versuchsreihen eine Einflussgrößenanalyse durchgeführt. Hierzu wurden die vernetzten Größen innerhalb von definierten Eingriffsgrenzen untersucht. Die Versuchsdaten wurden mittels einer multivariaten Regressionsanalyse (MatLab) ausgewertet. Erste Ergebnisse zeigen, dass konkret an der Plattensäge der Sägeblattvorschub einen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf der Maschine hat und durch einfache Maßnahmen hier ein Beitrag zur Ressourceneffizienz geleistet werden kann.

Weitere Potentiale bestehen beim Druckluftverbrauch und Abluftsystem (Absaugung). Aktuell sind die beiden weiteren Module zur Kennzahlensteuerung und zum Maschinen-Monitoring in Vorbereitung. Hier sollen beispielsweise die Ergebnisse zur Steuerung des Sägeblattvorschubs einfließen und weitere Verbraucher über wertstrombasierte Kennzahlen abgebildet werden. Das Modell bildet dabei je nach Prozessstufe unterschiedliche Informationen ab. Der automatische Datenfluss findet dabei nur von der Maschine in Richtung dynamisches Wert- und Stoffstrommodell



statt. Eine automatisierte Rückkopplung zur Steuerung des Prozesses erfolgt nicht. Dies ist teils anlagenbedingt, so dass dies durch den Maschinenführer bzw. Mitarbeiter in der Fertigung erfolgt. Die Module der prädiktiven Analytik sind mit den Daten und dem Konzept des Backbones realisierbar und zeigen somit das Potential zur Steigerung der Ressourceneffizienz bzw. Inhalte für weiterführende Forschungen auf.

### 3. Stand der Wissenschaft und Technik

Die digitale Transformation der Produktion liefert Planungs-, Steuerungs- und Kontrolldaten aus betrieblichen Informationssystemen sowie Maschinen-, Mess- und Sensorik-Echtzeit-Daten aus Prozessen und deren peripherer Versorgung. Technisch und wirtschaftlich besteht ein Interesse, diese Produktionsdaten zur Reduktion des Ressourcenaufwands zu nutzen (Schebek et al. 2017). Bisherige Arbeiten fokussieren auf die Optimierung einzelner Prozessschritte, ausgewählte Produkte oder Wertströme (Gunther und Steinhilper 2017, Schebek et al. 2016, Schmidt et al. 2017). Letzteres untersucht vor allem die Primär- und Sekundärenergieströme in betrieblichen Prozessen (Schebek et al. 2017, Thiede et al. 2017, VDI 4803). Die Nutzung von digitalen Daten zu Wert- und Stoffströmen (Energie, Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Abfälle, Wasser und Abwässer) werden als Handlungsfelder aufgezeigt (Hopf 2016, Krückhaus 2016, Wecus et al. 2017). Arbeiten zu einer dynamischen Wert- und Stoffstrommodellierung betrieblicher Prozessketten und die Verknüpfung von Wertströmen und Stoffströmen zur Identifikation von Potentialen zur Ressourceneffizienz sind weiterhin nicht bekannt.

Methoden zur Analyse und Modellierung von Wert- und Stoffströmen sind etablierte und wissenschaftlich anerkannte Methoden (Rother et al. 2004, DIN ISO 14040, DIN ISO 14044, VDI 4800). Das Projekt nutzt diese Methoden im Hinblick auf die Definition der Zielsetzung und des Untersuchungsrahmens sowie für die Prozessketten- und Stoffstromanalyse der betrieblichen Fertigungsprozesse. Dabei verknüpft das Projekt die Methoden der Wert- und Stoffstromanalyse und passt diese hinsichtlich einer wertbasierter Ressourceneffizienz-Fragestellungen an.

Für die Vernetzung und die digitale Datenerfassung sowie das Datenmodell greift das Projekt auf bestehende Lösungen des Stands der Technik und Wissenschaft zurück. Vor dem Hintergrund der Brownfield-Situation nutzt das Projekt Open Source Lösungen, offene Vernetzungskonzepte sowie in den Ingenieurwissenschaften angewandte Methoden sowie Modellierungs- und Simulationsumgebungen, um eine breite Anwendung des Konzepts zu ermöglichen und nicht an Software- oder Maschinen-Hersteller-Lösungen gebunden zu sein.

Der Stand der Wissenschaft und Forschung wird vom Projektteam national und international verfolgt, um neueste Erkenntnisse zu berücksichtigen. Darüber hinaus wurden Messen mit dem Schwerpunkt Digitalisierung der Produktion besucht (u. a. SPS Nürnberg) sowie fand ein Austausch mit anderen Lernfabriken und Organisationen (Mittelstandskompetenzzentrum 4.0, Ressourceneffizienz-Zentrum Bayern und VDI Ressourceneffizienz-Zentrum) statt, um den Transfer und das Netzwerk aufzubauen. Aktuell sind keine Erkenntnisse bekannt, die dem Fortgang des Projekts entgegenstehen.

#### 4. Fazit

Das Forschungsvorhaben greift eine dringende Fragestellung von Unternehmen und insbesondere KMU auf. So sind Unternehmen gefordert die Digitalisierung der Produktion und die Ressourceneffizienz aufgrund von Wettbewerbs- und Nachhaltigkeitsgründen voranzutreiben. Die Zusammenarbeit mit den Prozesspartnern zeigt, dass diese ein großes Interesse an der Fragestellung haben und sich intensiv mit der Digitalisierung der Produktion – auch weit über die Projektfragestellung hinaus – beschäftigen. Hierzu findet ein intensiver Aufbau von Fach- und Methoden-Kompetenz statt. Jedoch sehen die Unternehmen, dass neben dem Aufbau der Fach- und Methoden-Kompetenz die Anwendung im Unternehmen erforderlich ist, um den Schritt in die Digitalisierung physisch zu tun. Hier unterstützt das Forschungsvorhaben durch seine fachliche, methodische und soziale Kompetenz die Transformation der Produktion zu einem ersten Schritt der Digitalisierung der Produktion.

Die technischen Vernetzungs- und Datenmodell-Konzepte zeigen, dass es vielversprechende Lösungen für die Herausforderungen eines Brownfield-Ansatzes gibt, die KMU-affine Lösungen außerhalb proprietärer Lösungen von Software- und Maschinenherstellern ermöglichen. Dies lässt ein Zuschneiden auf individuelle Betriebs- und Produktionssituationen zu und ermöglicht spezifische Fragestellungen zu lösen. Parallel wird mit der Entwicklung einer Vorgehensweise und Methodik zu einem digitalen Wert- und Stoffstrommodell sowie dessen Anwendungen zur deskriptiven Analyse eine auf andere Unternehmen übertragbare methodische Vorgehensweise erarbeitet und validiert. Dazu dient zum einen ein praxisorientierter Leitfaden, der die methodische Vorgehensweise beschreibt. Zum anderen wird an der THRO ein Demonstrator zum Wissenstransfer aufgebaut und laufend an die Methodik angepasst und erweitert. Fakultätsübergreifend ist geplant die Methodik sowie den Demonstrator in die Lehre zu integrieren und v.a. in Praktika einzusetzen. Beides – Leitfaden und Demonstrator – dient zudem dem Wissenstransfer zwischen THRO und Unternehmen. Damit wird ein Beitrag zur Digitalisierung der Produktion (Industrie 4.0) und der Anwendung von Daten-Mining und -Analysemethoden in Bayern geleistet.

Die durch die digitale Wert- und Stoffstrommodellierung avisierte Zielsetzung einer 5-10 % Ressourceneffizienzsteigerung in den ausgewählten Prozessketten scheint zum jetzigen Zeitpunkt und auf Basis der bereits durchgeführten Analyse realistisch. Eine wesentliche Fragestellung ist, ob die für Digitalisierung der Produktion eingesetzten Ressourcen durch die Einsparungen bzw. Wertschöpfungssteigerungen amortisiert werden. Dieser Zusammenhang wird projektbegleitend in dem Promotionsvorhaben untersucht und fließt in begrenztem Umfang in die Ergebnisse ein. Übergreifend leistet das Forschungsvorhaben somit einen Beitrag zur Steigerung der Rohstoffproduktivität (Verhältnis von Bruttoinlandprodukt zu inländischem Materialverbrauch), welches ein übergreifendes Ziel auf EU, deutscher und bayerischer Ebene ist.

## Literaturverzeichnis

- Brenner, F. (2018), Industrie 4.0 als Chance für Energie- und Ressourceneffizienz für die Galvanik, 11. Fachkongress Energieeffiziente Fabrik (iwb), München.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (DIN EN ISO 14040); Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2009.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitung (DIN EN ISO 14044); Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2006.
- Frühauf, M. (2018), Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0: Potentialanalyse von Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes, Bachelorarbeit, Rosenheim.
- Gunther, R.; Steinhilper, R. (Hrsg.) (2017), Strategien und Methoden der ressourceneffizienten Produktion: Green Factory Bavaria, Stuttgart.
- Hopf, H. (2016), Methodik zur Fabriksystemmodellierung im Kontext von Energie- und Ressourceneffizienz, Wiesbaden.
- Krückhaus, B. (2016), Methodik zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS), Dissertation, Bochum.
- Lewin, M.; Busert, T.; El Sakka, F.; Voigtländer, S.; Fay, A.; Mit Wertstromdesign Industrie 4.0 gestalten, Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrum Hamburg, Hamburg, 2019.
- Peffers, K. et al. (2007), A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. In: Journal of Management Information Systems, 24 (3), 45–77.
- Rother, M; Shook, J (2004), Sehen lernen – mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen, Stuttgart.
- Schebek, L.; Abele, E.; Campitelli, A.; Becker, B.; Joshi, M. (2016), Prozessleitfaden: Ressourceneffizienz in der Produktion, Wiesbaden.
- Schebek, L.; Kannengießer, J.; Campitelli, A.; Fischer, J.; Abele, E.; Bauerdick, C.; Anderl, R.; Haag, S.; Sauer, A.; Mandel, J.; Lücke, D.; Bogdanov, I.; Nuffer, A.-K.; Steinhilper, R.; Böhner, J.; Lothes, G.; Schock, C.; Zühlke, D.; Plociennik, C.; Bergweiler, S. (2017), Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0, VDI ZRE (Hrsg.), Berlin.
- Statistisches Bundesamt (2019), Umweltökonomische Gesamtrechnungen, Berichtszeitraum 1994 – 2017.
- Thiede, S.; Posselt, G.; Hermann, C. (2017), Industrie 4.0 und die Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion, in: Gunther, R. (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0, München, S. 279-292.
- VDI 4800, Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien, Blatt 1.
- VDI 4803, Methoden zum effizienten Umgang mit Ressourcen in Unternehmen (Entwurf), 2020.
- Wecus, A. von; Weber, M.; Willeke, K. (2017), Managementsysteme und das Management natürlicher Ressourcen, VDI ZRE, Berlin, 2017.