
Professur für Technische Logistik (TLA), Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schmidt

Professur für Energieverfahrenstechnik (EVT), Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann

Professur für Wirtschaftsinformatik, insbesondere Systementwicklung (WISE), Prof. Dr. Werner Esswein

Abschlussbericht

ESProNet „Energetische Simulation Dynamischer Produktionsnetze“

Zuwendungsempfänger: TU Dresden

- Professur für Technische Logistik (TLA)
- Professur für Energieverfahrenstechnik (EVT)
- Professur für Wirtschaftsinformatik, insb. Systementwicklung (WISE)

Förderkennzeichen: 03ET4034

Projektlaufzeit: 01.06.2016 – 30.09.2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Professor Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt

Projektleiter ESProNet

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
1.1. Aufgabenstellung	3
1.2. Voraussetzungen für das Vorhaben	3
2. Planung und Ablauf des Vorhabens	4
3. Wissenschaftlicher und technischer Stand	5
4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
5. Projektergebnisse	7
5.1. Ressourcenflussdiagramm für Industrial Symbiosis (RFD-IS)	8
5.2. Bewertungsmethode zur Potentialabschätzung von Synergien	18
5.3. ESProNet-Modellbibliothek und Simulation	23
6. Bewertende Zusammenfassung und Ausblick	30
6.1. Zusammenfassung	30
6.2. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	31
6.3. Nutzen und Verwertung der Ergebnisse.....	32
7. Veröffentlichungen	33
8. Literaturverzeichnis	34

1. Einleitung

1.1. Aufgabenstellung

Die Neuausrichtung der Industrie auf Nachhaltigkeit kann einen entscheidenden Beitrag zur Bewältigung der vor uns liegenden ökonomischen, ökologischen und sozialen Herausforderungen leisten. Da Unternehmen zunehmend Teil von Netzwerken werden, müssen ganze Lieferketten und Netzwerke zusammenarbeiten, um Veränderungen und nachhaltige Innovationen voranzutreiben. Ein Ansatz für eine solche Zusammenarbeit ist die Industrielle Symbiose (IS), die eine regionale Form der Kreislaufwirtschaft beschreibt: neuartige Austausch von bisher ungenutzten Ressourcen zwischen Industrien sollen zu ökologischen und ökonomischen Vorteilen für die Beteiligten führen. Problematisch bei der Umsetzung industrieller Synergien ist jedoch die Abschätzung der insbesondere technisch-operativen Kompatibilität und des zu erwartenden ökonomischen und ökologischen Mehrwerts einer Kooperation. Unternehmen fehlt es an Informationen über Stoff- und Energieströme (z. B. Menge oder Eigenschaften) und Technologien (z. B. Lastprofil) sowie an Prozesskenntnis von potentiellen Partnern, um mögliche Synergien zu identifizieren oder deren Passfähigkeit zu bewerten.

Im Rahmen von ESProNet sollten verschiedene Methoden entwickelt werden, um Material- und Energieströme, Technologien und daraus resultierende potentielle Synergien innerhalb lokal begrenzter Produktionssysteme abbilden und bewerten zu können. Hauptziel des Projekts war die Bereitstellung eines Werkzeugs, welches die simulationsbasierte Bewertung von Wirkmechanismen und Potentialen zur Energieeffizienzsteigerung verschiedenster energetisch-stofflicher Kooperationsszenarios ermöglicht.

Dementsprechend war die Entwicklung eines universellen Modellierungs- und Simulationswerkzeugs zur adäquaten Abbildung aller für die Problemlösung relevanten Informationen innerhalb verschiedener Produktionscluster die zentrale Aufgabe. Um verschiedenste Szenarien abzubilden und im Zeitverlauf zu analysieren, sollten generische, wiederverwendbare und konfigurierbare Modellbausteine entwickelt werden (z. B. Ressourcenquellen oder -senken). Hierdurch soll die Bewertung von energetisch-stofflichen Kooperationen modellgestützt vereinfacht und visuell veranschaulicht werden. Weiterhin wird dem Fehlen von Informationen entgegen gewirkt, da die zu entwickelnde Modellbibliothek Standardkonfigurationen für die Bausteine bereitstellen sollte. Mithilfe der Modellbibliothek waren verschiedene praxisrelevante Kooperationsszenarios zu simulieren und zu analysieren, um Wirkmechanismen und Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die Handlungsempfehlungen sollten sowohl genereller Natur (z. B. Anforderungen der Heterogenität eines Industrieparks) sein als auch speziell für die teilnehmenden assoziierten Partner abgeleitet werden. Begleitend sollten Methoden entwickelt werden, die bei der Nutzung des Werkzeugs vor- oder nachbereitend unterstützen.

1.2. Voraussetzungen für das Vorhaben

Bisherige Ansätze zur modellbasierten Untersuchung der IS waren primär agentenbasierte Modelle von Produktionsclustern auf abstrakter Ebene. Aus diesen Modellen lassen sich jedoch kaum Handlungsempfehlungen für einzelne Akteure und potentielle Partner ableiten und bewerten, sondern vielmehr Entstehungsmuster von IS untersuchen. Weiterhin verbleiben die meisten Modelle auf ihrer Abstraktionsebene und lassen keine Skalierung (bottom-up oder top-down) zu. Da der Fokus oft auf der Netzwerkebene liegt, wurden insbesondere technische Elemente und Anforderungen sowie die Dynamik der Produktionspartner unzureichend modelliert und betrachtet, welche die Identifikation von Stellhebeln für Synergien und Potentialbewertung möglicher Synergien ermöglichen würden. Die Forschungslücke lag daher in der

Skalierung zur Bewertung unterschiedlichster Symbiose-Szenarien auf verschiedenen Ebenen.

Deshalb wurde zur Modellierung dem Paradigma der Objektorientierung gefolgt, da dieses die hierarchische Strukturierung, Skalierbarkeit und Wiederverwendbarkeit von Modellelementen erlaubt. Darüber hinaus wurde eine Modellbibliothek angestrebt, die die Modellbausteine für Anwender leicht zugänglich macht und die Modellierung verschiedener Szenarien über eine grafische Benutzeroberfläche in einem Modellierungswerkzeug ermöglicht. Dementsprechend wurde auf Werkzeuge zurückgegriffen, die eine objektorientierte Programmierung zulassen.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

ESProNet war ein Verbundprojekt von drei Instituten der TU Dresden und assoziierten Partnern aus der Industrie. Zur Erreichung des Forschungsziels wurde das Projekt in sieben Arbeitspakete (AP) gegliedert:

- AP1 – Grundlagenanalyse: Anhand von Literaturrecherchen und Gesprächen mit den Praxispartnern waren die Domäne bzw. der Untersuchungsbereich ausreichend zu beschreiben und Anforderungen an das Modellierungs- und festzulegen. Ergebnis von AP1 waren die Erstellung einer domänenspezifischen Ontologie und des Lastenhefts.
- AP2 – Datenerfassung und Datenanalyse: Zur Erhebung notwendiger Informationen für die Abbildung relevanter Ressourcen, Technologien und Prozesse waren Energie- und Produktionsdaten zu erfassen. Weiterhin war der Ist-Zustand bei den Partnern aufzunehmen, um mögliche Synergiepotentiale aufzudecken. Ergebnis von AP2 waren die Kartierung der Produktionssysteme der Partner und daraus abgeleitet Fallbeispiele als Basis für die Verifikation entwickelter Methoden.
- AP3 – Modellierung: Es war ein Konzept für die Modellierung und Simulation zu entwickeln, welches die Funktionsfähigkeit, Wiederverwendbarkeit und einfache Handhabung der Modellbausteine gewährleistet. Mit der Recherche nach geeigneten Simulationswerkzeug wurde ein neuer Partner, die ESI-ITI GmbH, in das Konsortium aufgenommen, da diese die gewählte Entwicklungsumgebung SimulationX entwickelt und die Arbeiten unterstützen konnte. Ergebnis von AP3 waren ein Konzept für die Modellbausteine (z. B. Quelle, Senke) und die Interaktion zwischen den Bausteinen sowie die Definition und Entwicklung der konkret zu entwickelnden Bausteine für die ESProNet-Bibliothek.
- AP4 – Verifikation und Validierung: Für die in AP3 entwickelten Bausteine war ein Testdesign zu entwickeln, um die Funktion der Bausteine einzeln und ihr Zusammenwirken zu verifizieren und zu validieren. Dies sollte anhand der gesammelten Daten aus AP2 und anhand der Literatur geschehen. Ergebnis von AP4 war die vollständig validierte ESProNet-Bibliothek.
- AP5 – Simulationsexperimente: Unter Nutzung der entwickelten Bibliothek waren unternehmensspezifische und komplexe Szenarien zu simulieren. Die Szenarien identifizierter potentieller Synergien wurden in Absprache mit den assoziierten Partnern ausgewählt und analysiert. Ergebnis von AP5 waren eine Vielzahl an Simulationsstudien für die beteiligten Partner und die Untersuchung genereller Wirkzusammenhänge.
- AP6 – Auswertung und Evaluation: Anhand der durchgeführten Simulationsexperimente waren Bewertungen vorzunehmen und Handlungsempfehlungen abzuleiten. Für alle beteiligten Partner wurden mehrere potentielle Synergien untersucht, simuliert

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In der Anbahnungsphase des Forschungsprojektes wurden assoziierte Partner für das Vorhaben gewonnen, die mit der Unterzeichnung von LOIs ihr Interesse und ihre Mitwirkung am Vorhaben bekundet haben. Die TU Dresden hat mit keiner anderen Stelle abseits der assoziierten Projektpartner zusammengearbeitet. Nachstehend werden diese assoziierten Projektpartner in alphabetischer Reihenfolge mit einer Kurzbeschreibung ihrer Rolle im Projekt aufgelistet:

ASG Spremberg GmbH

- **Kurzbeschreibung:** Die ASG Spremberg GmbH (ASG) ist mit Gründung des Zweckverbandes „Industrieparks Schwarze Pumpe“ (ISP) als Industrieparkmanagement für die weitere Entwicklung des Industrieparks beauftragt, unter die auch das Thema Energie- und Ressourceneffizienz fällt. Dem ISP gehören mehr als 80 Unternehmen aus den verschiedensten Branchen an, die von den Standortangeboten, der Vernetzung und der Infrastruktur profitieren.
- **Rolle:** Die ASG konnte im Rahmen des Projektes zwei Rollen einnehmen. Zum einen ist die ASG in der Rolle des Standortmanagers und konnte somit für verschiedene Synergien als Vermittler wirken oder auch gemeinsame Infrastruktur (z. B. Wasserver- und Entsorgung) bereitstellen. Die ASG verfügt darüber hinaus über eine Biogasanlage und ein Blockheizkraftwerk, was sie zu einem potentiellen Symbiose-Partner für andere Unternehmen macht. Im Forschungsprojekt wirkte der ISP als ein Fallbeispiel eines lokal begrenzten Produktionsclustern in dem die Potenziale energetisch-stofflicher Kooperationen im Sinne der IS untersucht werden konnten. Der Industriepark bzw. die Fallstudien des ISP lieferten einen Mehrwert für verschiedene Arbeitspakete und Projektziele. Im Industriepark sind verschiedene Industrien mit unterschiedlichen Material- und Energieflüssen vertreten. Durch die Datenerfassung und -analyse dieser Material- und Energieflüsse (AP2) konnten zunächst potentielle Symbiose-Partner entdeckt werden, die es anschließend abzubilden und auszuwerten galt. Zudem wurden im Rahmen des Projektes neben der Modellierung von bilateralen Synergien auch Systeme mit mehreren Partnern auf höherer Aggregationsebene abgebildet. Entsprechend wurden die Technologien, aber auch Unternehmen der potentiellen Symbiose-Partner und ihre Interaktion modelliert (AP3). Ziel war letztlich die Simulation (AP5) der modellierten Szenarien, um die Funktion der Bausteine zu verifizieren und mögliche Synergien zu bewerten. Eine Auswertung (AP6) verschiedener simulierter Szenarien gab Aufschluss über die Vorteilhaftigkeit von Symbiosen.

BGH Edelstahl Freital GmbH

- **Kurzbeschreibung:** Die BGH Edelstahl Freital GmbH (BGH) ist Hersteller von hochlegierten Edelstählen und hat als Vertreter der Stahlindustrie einen, durch Anwärmprozesse bedingten, hohen Energieverbrauch. Der Standort verfügt über ein Schmelzwerk mit einem Elektrolichtbogenofen sowie Pfannenöfen. Für die Weiterverarbeitung (Schieden, Walzen, Wärmebehandlung) sind weitere Anwärmprozesse nötig, die Anknüpfungspunkte für interne oder externe industrielle Symbiosen bieten.
- **Rolle:** Die BGH war ein wertvoller Partner für das Projekt, da die energieintensive Anwärmung in den Industrieöfen eine gute Ausgangsbasis für die Explikation entsprechender Bausteine liefert, die Relevanz für andere Betriebe haben. Die vorliegenden Energiedaten wurden mit Produktionsdaten der BDE abgeglichen, sodass sich daraus direkt verteilte Lastprofile für weitere Anlagen ableiten lassen (AP2). Diese Analysen

sind nach den Erfahrungen der TU Dresden ohne zusätzliche Datenerhebung seitens der BGH möglich. Die durchgeführten Analysen wurden mit Realdaten abgeglichen, um die korrekte Abbildung der Anwärm- sowie weiterer Funktion zu gewährleisten (AP4). Die fortlaufende Erhebung von Energiedaten und die Genauigkeit der Materialverfolgung boten hervorragende Voraussetzungen dafür. Die modellierten und validierten Bausteine wurden in Simulationsmodellen, die eine Systemalternative repräsentieren, verwendet. Darüber hinaus wurden Szenarien abgebildet, die z. B. weitere Anlagen zur Energiespeicherung und Rekuperation einschließt (AP5).

BMW-Werk Leipzig

- Kurzbeschreibung: Das BMW-Werk in Leipzig ist aufgrund der Größe mit einem Industriepark vergleichbar und bietet für das vorliegende Forschungsprojekt interessante Untersuchungsbereiche. Das Forschungsprojekt ESProNet kann gleich mehrere Anknüpfungspunkte zu bestehenden Energieeffizienzmaßnahmen des Produktionsstandorts Leipzig sowie konzernweite Projekte zur Erhöhung von Energie- und Ressourceneffizienz aufgreifen. So wird die BMW-Fahrzeugproduktion konsequent am Leitsatz „Clean Production“ ausgerichtet, worin verschiedene Maßnahmen zur Verringerung des Ressourcen- und Energieverbrauchs sowie Emissionssenkung verstanden werden.
- Rolle: Das BMW-Werk bot für ESProNet eine gute Ausgangsbasis, da bereits Energie- und Ressourcendaten im Zeitverlauf z. T. auf Maschinenebene erfasst werden. Damit bietet sich ein konkreter Mehrwert in den Arbeitspaketen *Datenerfassung und -analyse*, *Verifikation und Validierung* sowie *Simulationsexperimente*. Es konnten einerseits umfangreiche historische Energiedaten in Abhängigkeit der jeweiligen Produktionsrandbedingungen erhoben werden, woraus verteilte Lastprofile ableitbar sind (AP 2). Andererseits ließ sich die Modellierung (AP3) durch den Vergleich realer Produktionsdaten auf unterschiedlichen Aggregationsebenen verifizieren und validieren (AP 4). Im Rahmen von Simulationsexperimenten (AP 5) konnten Teile des BMW-Werks abgebildet und das energetische und stoffliche Verhalten in dynamischen Produktionsszenarien simuliert werden, woraus sich Potentiale identifizieren ließen, die insbesondere für die Auswertung und Evaluation (AP 6) von Bedeutung waren.

ESI-ITI GmbH

- Kurzbeschreibung: Die ESI-ITI GmbH ist Entwickler und Vertreiber der Simulationssoftware SimulationX, welche im Rahmen des Forschungsprojektes verwendet wurde.
- Rolle: Als Entwickler der Simulationsumgebung stand ESI-ITI als unterstützender Partner bei der Entwicklung der Modellbibliothek zur Verfügung.

5. Projektergebnisse

Im Laufe des Projektes wurden mehrere Methoden entwickelt, die insbesondere Akteuren aus der Praxis als unterstützende Werkzeuge in den ersten Phasen eines Symbiose-Projekts dienen können. Zur Strukturierung und Abgrenzung der Projektergebnisse wurden Handbücher und Leitfäden, die den Aufbau und die Entwicklung von IS bzw. Öko-Industrieparks strukturiert begleiten, wie z. B. Lowe et al. (1996), Koenig et al. (2009) und Tas et al. (2018), analysiert. Es wurden vier Hauptphasen identifiziert: Identifikation, Anbahnung, Umsetzung und Aufrechterhaltung (Abbildung 1).

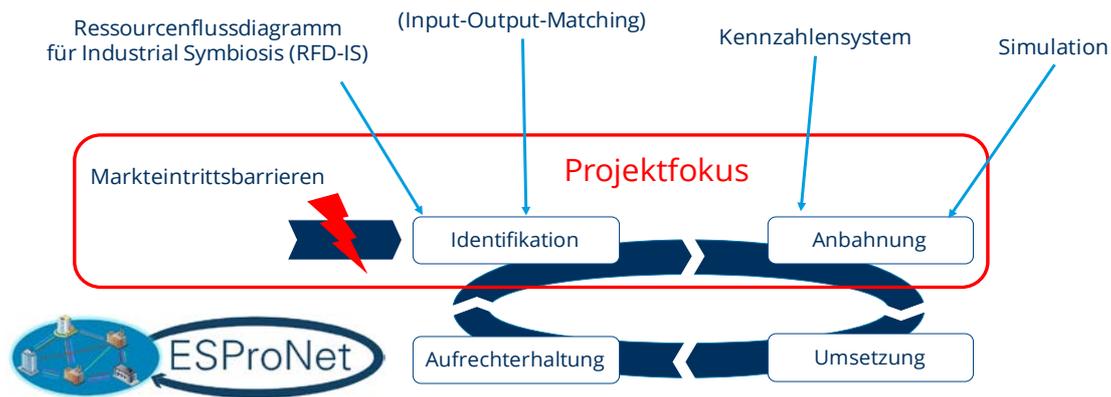


Abbildung 1: Ablauf eines Symbiose-Projekts und Projektfokus

5.1. Ressourcenflussdiagramm für Industrial Symbiosis (RFD-IS)

Ausgangspunkte eines Symbiose-Projektes sind die Identifizierung und Analyse der verfügbaren ungenutzten Outputs und erforderlichen Inputs eines Systems, ihrer Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten sowie der notwendigen oder möglichen Anpassungen. Daher bietet eine umfassende Visualisierung der vorhandenen Stoff- und Energieströme in einem Produktionssystem als ersten Schritt einen besonderen Nutzen für die Identifizierung von Symbiose-Möglichkeiten (Guedes et al. 2018). Die grafische Erfassung des Ist-Stands bietet verschiedenen Akteuren die Möglichkeit, Informationen über Ressourcenflüsse in Produktionssystemen in einer integrierten Darstellung zu dokumentieren, um Symbiose-Chancen aufzudecken. Zu den Herausforderungen bei der Visualisierung gehören die unterschiedlichen Nutzergruppen (Industrieparkmanager, Energiemanager, Produktionsmanager, Facility Manager usw.), die Heterogenität der Unternehmen und damit verbunden der möglichen Symbiose-Ressourcen, unterschiedliche Abstraktionslevel (Industriepark → Maschinen) sowie das anfängliche Informationsdefizit. Daher erfordert die Visualisierung von Ressourcenströmen einen methodischen, standardisierten Ansatz zur Dokumentation und Kommunikation relevanter Informationen zur späteren Analyse. Darüber hinaus ermöglicht eine einheitliche Taxonomie und Nomenklatur den Vergleich zwischen Produktionssystemen.

In Literatur und Praxis sind solche Modelle jedoch nicht oder nur mit anderem Fokus verfügbar. Bestehende Methoden auf dem Gebiet der Abbildung und Analyse von Ressourcenströmen weisen insbesondere bei der Verwendung für industrielle Symbiose-Projekte einen Mangel an Sprachspezifikation, Klarheit und Informationsgehalt auf. Darüber hinaus haben Guedes et al. (2018) mehrere Forschungslücken in Bezug auf die bestehenden Methoden zur Kartierung von Stoffströmen in industriellen Ökosystemen identifiziert, wie z. B. deren Komplexität, fehlende methodische Anleitung, fehlende Unterstützungsinstrumente, unzureichende Definition der zu erhebenden Daten usw. Darüber hinaus erschwert das Fehlen einer gemeinsamen Notation zur Modellierung von Ressourcenflüssen den Vergleich verschiedener (Teil-)Systeme und Fallstudien (Brunner und Rechberger 2016).

Daher wurde im Rahmen von ESProNet die Modellierungsmethode RFD-IS entwickelt, mit der Praktiker und Forscher Material- und Energieströme verschiedener industrieller Systeme erfassen, abbilden und analysieren können. Dadurch wird die Identifikation unausgelasteter Ressourcen und Potenziale für die Weiter- und Wiederverwendung von Ressourcen innerhalb und zwischen Unternehmen erleichtert. RFD-IS (Resource Flow Diagram for Industrial Symbiosis) basiert auf dem RFD und übernimmt daher die grundlegenden Elemente und Regeln.

Das RFD-IS besteht aus einer Modellierungssprache mit einigen modifizierten Elementen und Regeln der RFD und aus einer I/O-Matrix zur Quantifizierung der Ressourcenflussbeziehungen. Die Methode ermöglicht eine übersichtliche Darstellung der Stoff- und Energieströme eines Systems, bei der insbesondere die Ressourcenquellen und -senken charakterisiert sowie Schwachstellen hinsichtlich Messpunkten, Informationsqualität und Ressourceneffizienz während des Modellierungsprozesses identifiziert werden können. Das resultierende Modell erfasst den aktuellen Zustand eines Systems, das als Arbeitsdokument vor Ort oder in Workshops verwendet werden kann. Die Methode gründet sich aus verschiedenen, häufig verwendeten Kartierungs- oder Modellierungsmethoden, um die Anwendbarkeit und den Transfer in die Praxis zu erleichtern.

Theoretische Grundlagen und Stand der Wissenschaft

Ziel war die Entwicklung einer Methode zur visuellen Modellierung von Stoff- und Energieflüssen vor dem Hintergrund IS-spezifischer Charakteristiken. Die Entwicklung der Methode folgte dem Vorgehensmodell domänenspezifischer Modellierungssprachen, die aus einem definierten Satz von Modellierungskonzepten, Restriktionen und einer leicht verständlichen grafischen Notation bestehen (Frank 2013; Michael und Mayr 2015) und einem entsprechenden Prozessmodell, in dem erklärt wird, wie die Sprache anzuwenden ist.

Zunächst wurden Umfang und Zweck der Methode festgelegt. Anschließend wurden die notwendigen Informationen, basierend auf der Literatur zu IS und zu Modellierungs-/Mapping-Methoden sowie auf Aussagen und Analysen der Industriepartner definiert und in einem Anforderungskatalog (Tabelle 1) strukturiert. Diese Anforderungen setzen sich zusammen aus allgemeinen Kriterien für die Klarheit der Darstellung, Merkmalen der industriellen Symbiose (z. B. Elemente und Eigenschaften für die Kompatibilitätsanalyse) und Aussagen der Industriepartner. Positiv bewertete Methoden wurden hinsichtlich ihrer Kombinierbarkeit und Eignung als Basismodellierungssprache untersucht. Anschließend wurden die Sprachkonstrukte spezifiziert und ihre grafische Notation entworfen, indem Ansätze und Spezifika aus den untersuchten Methoden übernommen wurden. Zur Standardisierung wurde ein Prozess, der die Anwendung des Verfahrens beschreibt, entwickelt. Dieser dient gleichzeitig der Dokumentation. Die entwickelte Methode kann sowohl manuell, z. B. in Workshops und/oder vor Ort, als auch mit Softwareunterstützung angewendet werden. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde ein Tool entwickelt, welches auf Excel und Visio basiert. Die Methode und Sprache wurde mit Industriepartnern durch Anwendung in verschiedenen Produktionssystemen evaluiert und dadurch iterativ weiterentwickelt.

Tabelle 1: Anforderungen

Anforderung	Allgemeines	IS-Spezifika	Forderungen Industriepartner
1. Ressourcenflüsse	-	X	X
2. Quellen/Senken	-	X	X
3. Hierarchie	X	X	X
4. Systemgrenze	X	X	-
5. Layout-Bezug	X	X	-
6. Datenqualität	-	X	X
7. Einfachheit/Klarheit	X	-	X
8. Sprache	X	-	X

9. Prozessklärung	X	-	X
-------------------	---	---	---

(1) Ressourcenflüsse müssen mit ihrer Richtung, d. h. Herkunft und Verwendung, modelliert werden, wobei die Abfolge der Prozesse und die Vorgänger- oder Nachfolgerbeziehungen dargestellt werden müssen.

(2) Um das Angebot und den Bezug von Ressourcen darstellen zu können, müssen Verbraucher und Anbieter, d. h. Quellen und Senken, abgebildet werden können. Da viele Ressourceneigenschaften typischerweise durch die verwendete Technologie bestimmt werden, werden Quellen und Senken technologiebasiert dargestellt, was den Fokus auf Systemelemente stärkt. Die Kombination der Modellierung von Ressourcen und Technologien und ihrer Eigenschaften bilden die Grundlage für die Identifizierung ungenutzter Ressourcen, bestehender Synergien und Potentiale für mögliche Synergien.

(3) Da es zu Projektbeginn üblicherweise ein Informationsdefizit gibt, weil Unternehmen zunächst nur grobe Informationen offenlegen wollen und/oder können, müssen mehrere Hierarchieebenen (z. B. Technologie, Abteilung, Unternehmen) abbildbar sein. So können einerseits verschiedene Subsysteme gleich modelliert und die Informationsbeschaffung auf Park- bzw. Unternehmensebene, insb. im unternehmensübergreifenden Kontext, mit angemessenem Aufwand erfolgen.

(4) Die Ressourcenströme, die das System als Abfall oder Emissionen verlassen, sind von besonderer Bedeutung, da diese Wiederverwendungspotentiale darstellen können. Um technologische oder organisatorische Einheiten von der Umwelt, aber auch von anderen Organisationseinheiten abzugrenzen, muss die Systemgrenze ermittelt und dargestellt werden. So können Energie- und Massenbilanzen berechnet und Umweltauswirkungen ermittelt werden.

(5) Das Modell sollte Distanzen und die Lage von Technologien oder Unternehmen innerhalb eines Layouts berücksichtigen. Vor allem bei der Evaluation von Transport- und Übertragungstechnologien sowie bei der Übertragung von z. B. Wärmeenergie sind Distanzen relevant.

(6) Zur Identifikation fehlender oder ungenauer Informationen und potenzieller Messstellen im anfänglichen Projektstadium, muss die Datenqualität Teil der visuellen Darstellung sein. Guedes et al. (2018) machen Unsicherheiten hinsichtlich Datenverfügbar- und -korrektheit als einen Haupteinflussfaktor für scheiternde Symbiose-Projekte aus.

(7) Da die Methode vor allem zum Projektanfang angewendet werden soll, ist eine einfache und klare Darstellung der feinen Detailierung vorzuziehen. Lediglich die wichtigen Informationen für die Identifikation einer potentiellen Symbiose in die Darstellung einzubringen. Es ist der richtige Grad an Informationsfülle zu wählen, um eine Übersichtliche Darstellung zu ermöglichen, da die intuitive, schnelle Erstellung und Erfassung des Systems von größerem Nutzen für den Anwender ist als die Darstellung von Detailinformationen. Die Betrachtung aller Technologien in einem Unternehmen oder aller Unternehmen in einem EIP kann beispielsweise vom eigentlichen Ziel ablenken.

(8) Zur Standardisierung der Darstellung sind Festlegungen hinsichtlich der Syntax zu treffen. Vordefinierte Elemente und Attribute schaffen ein besseres Verständnis des Modells und vereinfachen den Abbildungsprozess. Außerdem wird der Vergleich verschiedener Systemmodelle erleichtert. Beispielsweise bei Betrachtung mehrerer Unternehmen in einem Industriepark ist eine standardisierte Sprache und Methode hilfreich, um Subsysteme zu erstellen.

(9) Die Synthese eines Modellierungsprozesses unterstützt den Nutzer bei der Erstellung eines RFD-IS. Dazu gehören die Festlegung der abzubildenden Elemente, u. a. hinsichtlich Datenerfassung und die Quantifizierung von Ressourcenflüssen sowie Massenbilanzen.

Es gibt verschiedene Methoden zur Erfassung und Darstellung von Ressourcenflüssen und -prozessen und/oder Produktionssystemen, die den Fokus auf in unterschiedlichen Domänen setzen. Fast alle identifizierten Methoden beschreiben chronologische Abläufe und logische Beziehungen von Prozessen mit Hilfe von Flussdiagrammen. Die in der Literatur am häufigsten diskutierten Methoden (in absteigender Reihenfolge) sind folgende:

- Wertstrommethode (WSM) / Value Stream Mapping (VSM)
- Sankey-Diagramm (SD)
- Stoff- und Energieflussanalyse.

Schneider et al. (2011) haben Expertenbefragungen zum Einsatz von Prozesserfassungs- und Darstellungsmethoden zur Prozessanalyse in Unternehmen durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass fast ausschließlich Wertstromanalyse, Prozessgraphen (BPMN, EPK etc.) und Sankey-Diagramme verwendet werden.

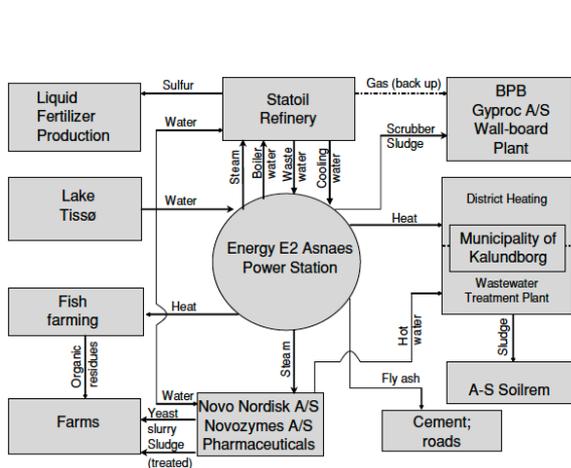
Die identifizierten Methoden wurden im Hinblick auf ihren Erfüllungsgrad bzgl. der zuvor festgelegten Kriterien mittels einer Nutzwertanalyse bewertet. Die Skala der Punkte reicht von 0 bis 4, wobei 0 bedeutet, dass die Anforderung nicht erfüllt ist und 4, dass sie vollständig erfüllt ist. Die Bewertung des Erfüllungsgrades der Kriterien für jede einzelne Methode ist recht subjektiv. Um jedoch eine einseitige Bewertung zu vermeiden, wurde die Diskussion mit den Unternehmen, in Workshops mit Studenten und innerhalb des Forschungsteam geführt. Tabelle 2 zeigt die Methodenbewertung und den -rang nach der Gesamtpunktzahl. Das RFD wurde aufgrund der guten Erfüllung der Kriterien und der Möglichkeit der Weiterentwicklung als Basis für die zu entwickelnde Methode gewählt.

Tabelle 2: Anforderungen an eine Visualisierungsmethode

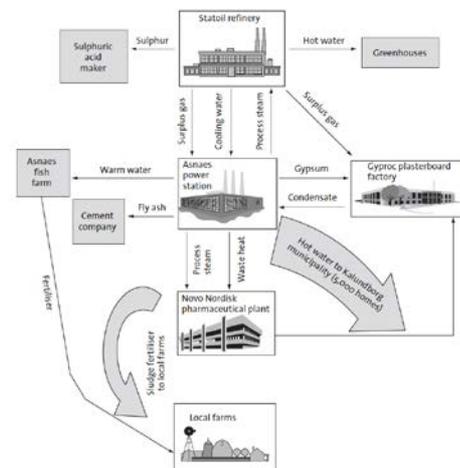
	Ressourcenfluss	Quellen/Senken	Datenqualität	Layout-Bezug	Reihenfolgebeziehung	Systemgrenzen	Hierarchie	Einfachheit/Klarheit	Definierte Modellierungssprache	Vorgehen in der Modellierung	Rang
RFD	4	4	0	2	4	4	2	2	4	4	1
MEFA	2	2	0	4	4	4	2	2	2	4	2
WSM	2	4	0	1	4	2	1	2	4	2	3
SD	4	2	0	2	2	1	2	1	1	1	4

Guedes et al. (2017) untersuchten die Literatur über IS im Hinblick auf Methoden der Stoffstromkartierung zur Problemlösung, mit dem Ergebnis, dass die am häufigsten verwendeten Methoden MFA/MEFA und WSM sind. Obwohl die Anwendung etablierter Methoden in industrieller Symbiose nicht bestätigt werden konnte, enthalten Fallstudien oft grafische Darstellungen der untersuchten Industrieparks. Bei diesen Darstellungen handelt es sich in der Regel um schematische Flussdiagramme, die Prozesse oder Anlagen im Produktionssystem darstellen und Ressourcenflüsse darstellen. Typischerweise liegt der Schwerpunkt auf der Darstellung von Verbindungen zwischen den Prozessen oder Anlagen, die auf aktuelle oder geplante

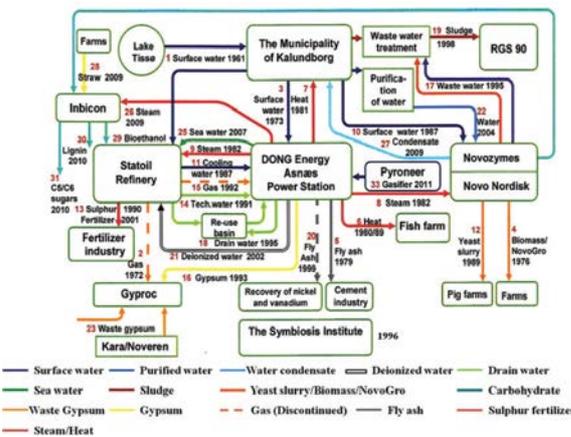
Synergien hinweisen. Weitere Ressourcenflüsse von außerhalb des betrachteten Systems oder in die Umwelt werden weniger häufig dargestellt. Daher werden oft keine oder nur implizite Systemgrenzen dargestellt. Die Art der Ressource wird in allen Modellen dargestellt, primär als Text auf dem Pfeil und manchmal zusätzlich durch die Farbmarkierungen. Eine weitere häufig angezeigte Information ist die Quantität des Ressourcenflusses. Dabei handelt es sich vorrangig um Jahresmengen. Weitere Informationen (z. B. Entfernungen) werden weniger häufig visualisiert, weder durch Layout-Bezug noch die textuelle Angabe in der Abbildung. Aus der Tatsache, dass die meisten Kartierungen im Nachhinein bereits bestehende Industrieparks und Synergien darstellen, und aufgrund des geringen Informationsgehalts kann davon ausgegangen werden, dass sie nur zur Illustration des Fallbeispiels in der Publikation dienen und nicht als Arbeitsdokument (z. B. für die Informationssammlung, Kommunikation, Analyse) verwendet werden. Um die Unterschiede zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 2 verschiedene Illustrationen des Industrieparks in Kalundborg (Dänemark).



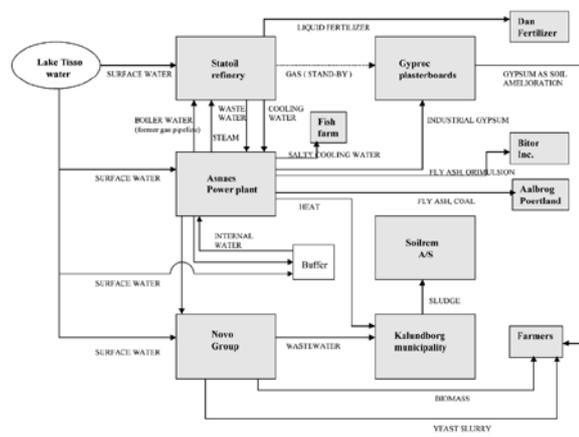
Chertow und Ehrenfeld (2012)



Cohen-Rosenthal und Musnikow (2017)



Chertow (2000)



Jacobsen (2006)

Abbildung 2: Verschiedene Darstellungen des EIP Kalundborg

Verschiedene Elemente der Kalundborg-Symbiose werden in unterschiedlichen Formen dargestellt und auch ihre Anordnung ist unterschiedlich. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass sich die Darstellungen im Hinblick auf den Informationsgehalt unterscheiden, der im Allgemeinen relativ gering ist. Dieser Mangel an Standardisierung verhindert einen schnellen Vergleich verschiedener Studien, auch wenn sie dasselbe System betreffen.

RFD-IS: Modellierungssprache und Vorgehen

Einheiten: Im Gegensatz zu RFD konzentriert sich RFD-IS nicht auf Prozesse, sondern auf Systemelemente, nämlich Technologie- oder Organisationseinheiten, die als Quellen und/oder Senken fungieren und Prozesse ausführen können bzw. abbilden. In Anlehnung an die Definition von Cecelja et al. (2015) bezieht sich der Begriff Technologie auf jede technologische Einheit, die unter bestimmten Umständen und mit einem bestimmten Ergebnis einen Input in einen anderen Output (in Zeit, Raum, Menge usw.) umwandeln kann. Technologien werden nach ihrer primären Funktion in drei Typen kategorisiert. Produktionstechnologien sind Einheiten mit dem Zweck der Verarbeitung von Ressourcen oder der Herstellung von Produkten (z. B. Ofen). Energietechnologien versorgen andere Technologien mit den erforderlichen Energieformen (z. B. Strom aus einem Blockheizkraftwerk). Speichertechnologien speichern Energie oder Material zur späteren Verwendung (z. B. Batterie oder Lager). Einheiten werden über Datenkästen dargestellt, deren Form je nach technologischer Funktion und Aggregationsebene variieren. (Abbildung 3). Dementsprechend werden Einheiten mit der Datenbox angezeigt. Unternehmen werden durch einen abgerundeten Kasten dargestellt, Produktionstechnologien durch rechteckige Kästen, Energietechnologie als Halbkreise und Speichertechnologien als Dreiecke, was eine häufig verwendete Form zur Darstellung von Speicherung oder Bestand ist (siehe VSM).

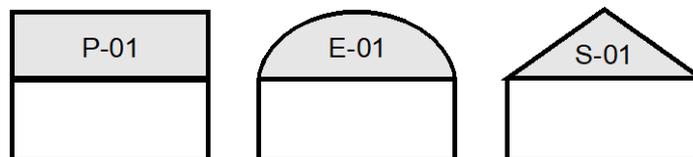


Abbildung 3: Datenkästen des RFD-IS (P... Produktions-, E... Energie-, S... Speichertechnologie)

Die Kopfzeile der Datenbox zeigt die IS, ähnlich wie bei Meyer et al. (2005). Die ID beginnt mit dem Buchstaben des Einheitentyps, den sie repräsentiert (z. B. "P" für Produktionstechnologie). Dies ist notwendig, um die Einheiten in der zugehörigen Input-Output-Matrix zu identifizieren. Zusätzlich zur ID sollte ein Prozess- oder Einheitenname aufgeführt werden, der Aufschluss über die spezifische Art des Prozesses oder der Einheit gibt. Zusätzliche Informationen (z. B. Bezeichnung, Lage) werden in das zweite Feld eingetragen. Es ist notwendig, die Betriebsart einer Einheit darzustellen, um die Dynamik bei Angebot oder Nachfrage von Ressourcen zu berücksichtigen. Die Betriebsart wird durch das Schichtmodell dargestellt, für das schematische Darstellungen verwendet werden (Abbildung 4).

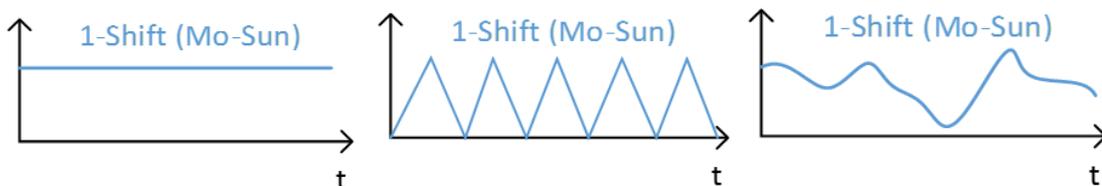


Abbildung 4: Schematische Lastkurven zur Charakterisierung einer RFD-IS-Einheit

Darüber hinaus werden von den Einheiten selbst erzeugte Ressourcen (z. B. Strom aus einer eigenen Windkraftanlage) durch die entsprechenden Ressourcensymbole angezeigt. Dies ist relevant, da es den Zweck bestimmter Eingangsströme anzeigt. Ein Beispiel ist ein Heizprozess mit Erdgas als Input, das einen Brenner zum Erhitzen von Material oder Wasser für die Dampfversorgung befeuert. Bei industriellen Symbioseprojekten kann dieser primäre Heiz- oder Dampfbedarf durch andere Abwärmequellen gedeckt werden. Es ist nicht in erster Linie die Erdgasversorgung, die gedeckt werden muss.

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Erweiterungen soll das RFD-IS um eine Layoutspezifik erweitert werden. Diese muss nicht unbedingt eine maßstabsgetreue Darstellung sein, sondern sollte der grundsätzlichen räumlichen Anordnung entsprechen, sofern das Format eine entsprechende Abbildung nicht zulässt. Bei einer maßstabsgerechten Anordnung muss ein Koordinatensystem verwendet werden und die Koordinaten der Technologie in die Datenbox eingetragen werden. Alternativ ist es auch möglich ein vorhandenes Koordinatensystem zu verwenden, z. B. aus Lageplänen oder Grundrissen. Eine Visualisierung und Beschriftung der Koordinatenachsen sind in jedem Fall erforderlich. Die Koordinaten im Datenfeld müssen so angegeben werden, dass die Anlage oder der Prozess eindeutig identifiziert werden kann, wenn auch bei großen Anlagen eine gewisse Abweichung unvermeidbar ist. Mit den Koordinatenwerten lassen sich die Abstände zwischen den einzelnen Anlagen und Prozessschritten definieren.

Ressourcenfluss: Ressourcenflüsse in RFD-IS enthalten Materialien, Abfall, Wasser, Energie usw., jedoch keine Informationsflüsse. Wie im RFD werden Ressourcenflüsse durch Pfeile dargestellt. Abhängig von den Eigenschaften oder Informationen über den Ressourcenfluss werden unterschiedliche visuelle Hinweise verwendet. Die Richtung des Ressourcenflusses (Input, Output) wird durch die Position der Pfeilspitze und die Position des Pfeils an der Quell- oder Senkeneinheit unterschieden. Um eine schnelle Erkennung der Ein- und Ausgänge einer Einheit zu ermöglichen, sind Pfeile, die eingehende Ströme repräsentieren, links und oben am Symbol der Einheit zu platzieren, während Ausgänge unten und rechts zu positionieren sind. Die Spitze des Pfeils ist an der Senke des Ressourcenflusses zu platzieren. Abbildung 5 zeigt die Darstellung von gekreuzten, geteilten und zusammengeführten Ressourcenflüssen.

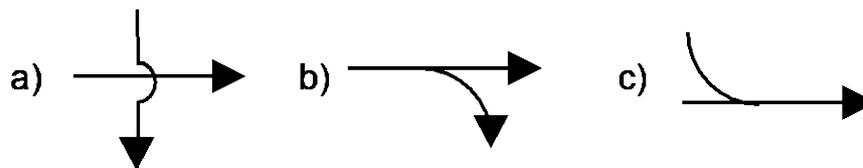


Abbildung 5: Kreuzung (a), Trennung (b) und Zusammenführung (c) von Materialflüssen im RFD-IS

Der Ressourcentyp wird durch die Pfeilfarbe dargestellt, wobei im Rahmen von ESProNet folgendes Farbschema verwendet wurde:

- schwarz für Material,
- rot für thermische Energie,
- gelb für Elektrizität,
- blau für Wasser und
- grün für chemische Energie (z. B. technische Gase).

Dies schließt die Verwendung anderer Farben nicht aus. In Produktionsanlagen mit einer großen Anzahl unterschiedlicher Ressourcen eines Ressourcentyps und der Notwendigkeit, diese zu unterscheiden (z. B. unterschiedliche Qualitätsstufen von Wasser oder unterschiedliche Temperaturstufen von Wärmeströmen), sind weitere Farbabstufungen oder separate Karten pro Ressourcentyp möglich. Die verschiedenen Ressourcen eines Ressourcentyps können ggf. auch neben den Pfeilen geschrieben werden. Werden über den Standard hinaus weitere Ressourcen modelliert, so ist diesen jeweils eine Farbe zuzuordnen und in einer Legende zu ergänzen, die dem RFD beigelegt werden muss. Damit wird sichergestellt, dass der erfasste Prozess und seine Produktionsflüsse nachvollziehbar sind und die Bilanzierung korrekt erfolgt. Werden mehrere Teilsysteme in einer Datenbox zusammengefasst, muss dies dokumentiert werden. Signifikante Verluste werden in den jeweiligen Farben aus der Farblegende, aber als gestrichelter Pfeil gezeichnet. Dies vereinfacht die Ansicht ausgewählter Ströme.

Weiterhin muss die Qualität der Mengenangaben dargestellt werden. Da die genaue Menge nicht immer bekannt ist, intern und vor allem von anderen Unternehmen, sollte die Genauigkeit dieser Information in der Karte über die Pfeilspitze dargestellt werden. Mengen können durch Messungen, Berechnungen oder Schätzungen ermittelt werden, wobei die Genauigkeit abnimmt. Die Pfeilspitze hat unterschiedliche Formen, um die verschiedenen Stufen der Datenqualität darzustellen (Abbildung 6).

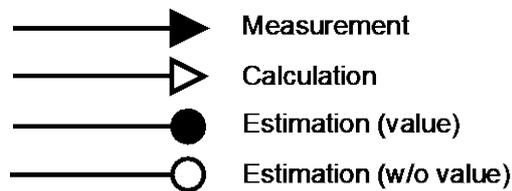


Abbildung 6: Visualisierung des Datenniveaus

Auf diese Weise können notwendige Messpunkte oder die Notwendigkeit, während der Analysephase Informationen von Unternehmen einzuholen, vorzeitig erkannt werden. Die Ressourcenmenge kann, wie im SD, durch die Pfeilbreite visualisiert werden, was jedoch bei großen Produktionssystemen mit vielen Ressourcenflüssen zu einem unübersichtlichen Modell führen wird. Daher wird aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Darstellung von Flussmengen verzichtet. Die notwendigen Informationen werden in einer I/O-Matrix erfasst, die das RFD-IS-Modell ergänzt.

Systemgrenze: Nach Meyer et al. (2005) stellt die externe Entität die Außenwelt dar, mit der das untersuchte System im Austausch steht. Diese Definition wird übernommen, unterscheiden aber zwischen zwei Arten von externen Entitäten: Produktion und Umwelt. Zur Unterscheidung produktionsbedingter Ressourcenflüsse und Emissionen in die Umwelt, werden Produktionsgüter und Abfallströme sowie sonstige Umweltbelastungen (z. B. Emissionen, Deponien) unterschiedlich dargestellt.

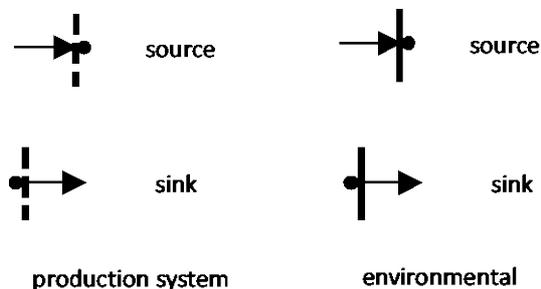


Abbildung 7: Darstellung von Systemgrenzen

Die physikalische Umwelt wird als durchgehend gezeichneter Balken am Anfang oder Ende eines Pfeils visualisiert. Diese Art der Darstellung ermöglicht Pfeillängen zu verkürzen und fördert die Übersichtlichkeit im Vergleich zu Darstellungen mit umlaufender Systemgrenze durch weniger Überschneidungen der Pfeile. Die externe produktive Umgebung repräsentiert Lieferanten, Kunden, Partner, andere Abteilungen usw. Diese Systemgrenze wird als gestrichelter Balken dargestellt.

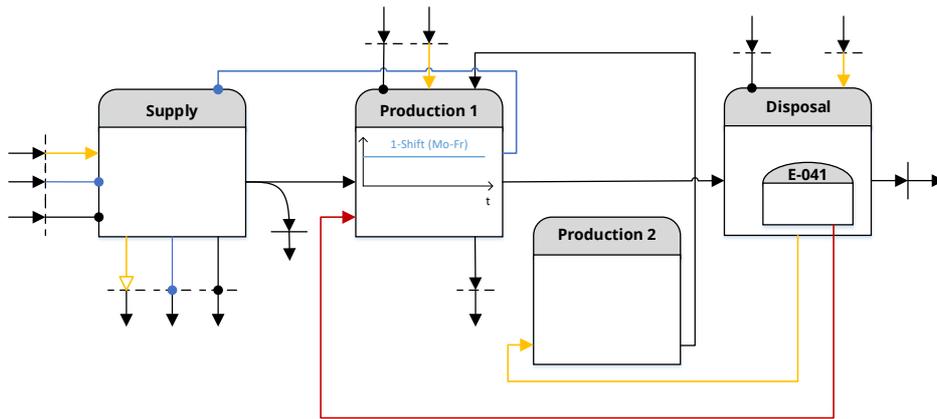


Abbildung 8: RFD-IS-Elemente im Verbund

Erstellungsprozess: RFD-IS besteht aus vier Schritten zur Modellierung und Analyse eines Produktionssystems.

1. Festlegung von Systemgrenzen: Um den Umfang der Analyse zu bestimmen und eine Grundlage für die Material- und Energiebilanzierung zu bilden, müssen die Systemgrenzen (betrachtete Prozesse und Ressourcen) und ein Zeitraum festgelegt werden.
2. Analyse des Ist-Zustandes / Datenerhebung: Zunächst sind relevante Ressourcenströme und Technologien bzw. Unternehmen zu ermitteln. Die Relevanz hängt von den Gegebenheiten der betrachteten Systeme oder Unternehmen ab. So werden z. B. große Verbrauchs- oder Liefermengen oft als relevant angesehen. Auch Technologien mit geringem Nutzungsgrad oder solche, die bisher kaum untersucht und optimiert wurden, können ein Untersuchungsgegenstand sein. Zur Vorbereitung der Datenerfassung müssen Messstellen und Zählerstrukturen innerhalb der Systemgrenzen identifiziert werden. Gegebenenfalls müssen die in Schritt 1 definierten Systemgrenzen angepasst werden. Alternativ zu den Technologien können auch die Prozesse des Produktionssystems erfasst werden.
3. Mapping: Das Mapping ist ein iterativer zweistufiger Prozess. Zum einen müssen die Ressourcenflüsse qualitativ im RFD-IS abgebildet und zum anderen quantitativ in einer I/O-Matrix erfasst werden. Ein (bereinigtes) Beispiel ist in Abbildung 9 dargestellt. Eine I/O-Matrix ist wie eine Transportmatrix aufgebaut und ermöglicht die Bilanzierung und Zuordnung von Ein- und Ausgängen zu Prozesseinheiten. Für eine eindeutige Zuordnung werden im Tabellenkopf die Art der Ressource, ihre Einheit und die Legendenfarbe aus dem entsprechenden Diagramm eingetragen. Jedes Feld innerhalb der Matrix repräsentiert einen Ressourcenfluss. Die Zeilen stehen für die Quelleinheit, die Spalten für die Senke oder Zieleinheit. Die Zeilen- und Spaltenköpfe enthalten die in Abbildung 3 dargestellten Einheit-IDs sowie Input, Output und Verluste. Input und Output stellen die Ressourcenflüsse dar, die in das System hinein oder aus dem System herausfließen. Die Produktionsströme, die nicht mehr direkt im Prozess verwendet werden können, werden als Verluste eingetragen. Je nach Anzahl der Energie- und Stoffströme ist eine separate Darstellung notwendig. Eine einzige Matrix ist möglich, indem die zugeordneten Farben für jeden Ressourcenfluss verwendet werden. Die Methode wurde in einer Vielzahl von Industrieprojekten eingesetzt.

Energy/Material		Compressed Air						Unit:		x 1.000 m ³	
		color									
to	from	Input	P000	P001	P [...]	P022	P023	P024	Output	Losses	Sum
Input		X									0
P000			X								0
P001				X							0
P [...]					X						0
P022						X					0
P023							X				0
P024								X			0
Output									X		0
Losses										X	0
Sum		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 9: Beispiel einer Input-Output-Matrix

Ein Beispiel für das Layout ist mit dem anonymisierten Beispiel in Abbildung 10 gegeben.

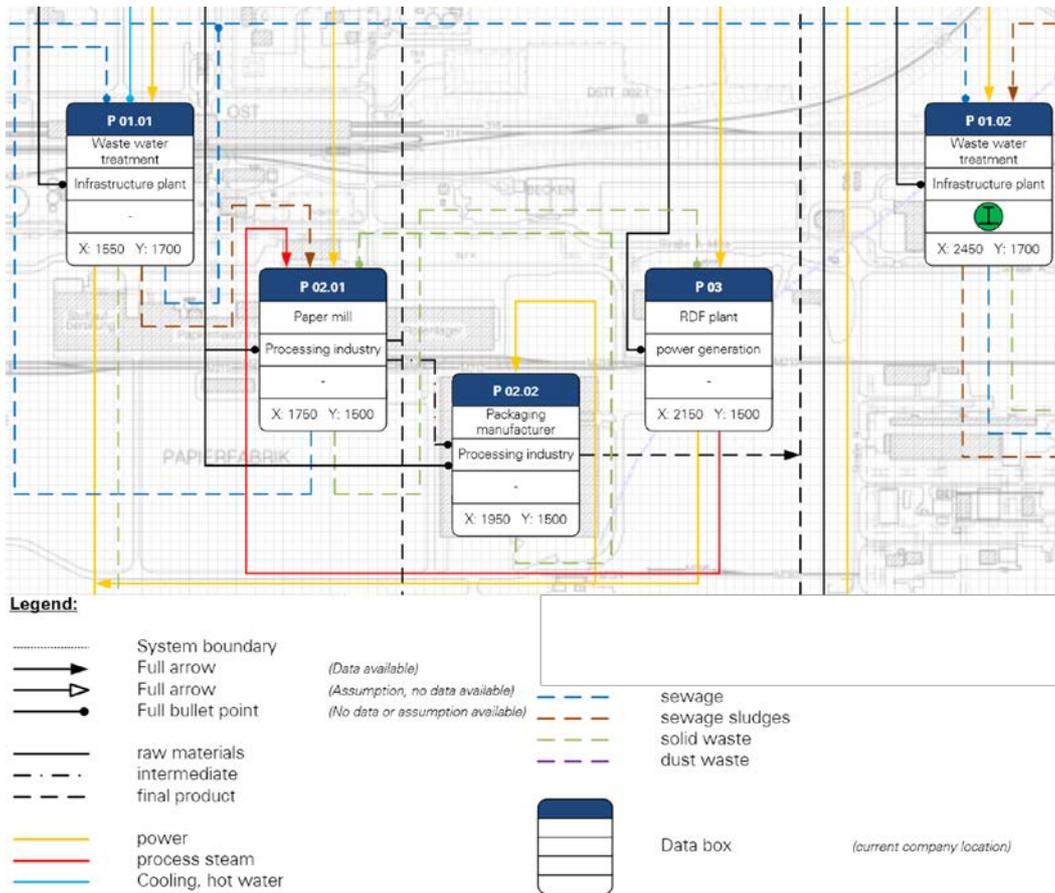


Abbildung 10: Beispiel für RFD-IS

Zusammenfassung und Fazit

RFD-IS ist ein Verfahren zur Kartierung von Ressourcenflüssen im Zusammenhang mit industriellen Symbiosen vor Ort. Unsere Forschung stützt sich auf frühere Mapping-Methoden und der Zusammenarbeit mit Industriepartnern. Die Modellierungskonzepte beinhalten explizit die technologische Charakterisierung von Ressourcenquellen und -senken, da diese die benötigte Ressourcenfunktion und Substitutionsmöglichkeiten oder auch Anpassungsmöglichkeiten aufzeigen.

Durch die Anwendung der Mapping-Methode wird ein Überblick gegeben und Abhängigkeiten und ungenutzte Ressourcen werden sichtbar. Darüber hinaus können unterschiedliche Datenniveaus visualisiert werden. Die konsistente und systematische Abbildung von Produktionssystemen führt zu einer verbesserten Transparenz und Vergleichbarkeit verschiedener (Teil-) Systeme. Das Feedback der Industriepartner als Anwender war positiv. Allerdings ist die Erstellung eines RFD-IS zeitaufwändig, da die Erstellung manuell in Papierform oder Microsoft Excel und Visio erfolgt ist. In einer weiterführenden Arbeit wurde ein Demonstrator zur Erstellung eines RFD-IS entwickelt. Die entwickelte Notation bildet die Grundlage für eine entsprechende Unterstützung durch ein Modellierungswerkzeug, das den Erfassungs- und Darstellungsprozess beschleunigt.

Dieser Ansatz ist für industrielle Symbiose-Projekte einzigartig. Es handelt sich, wie gezeigt, um eine Methodenkombination, welche die in Tabelle 2 aufgeführten spezifischen Anforderungen erfüllt. Darüber hinaus ermöglicht sie eine Fortschrittskontrolle und Dokumentation eines Symbiose-Projektes. Vielversprechende industrielle Symbiose-Projekte werden auf der Basis eines Kennzahlensystems bewertet und modelliert und die Ergebnisse können in einer neuen Karte mit dem Ist-Zustand verglichen werden.

Allerdings kann die entwickelte Methode je nach Problemstellung an ihre Grenzen stoßen. Es ist zu bedenken, dass dieses Modell ein statisches Bild des Systems (z. B. auf Basis von Jahresdaten) zeigt. Zeitbezogene Informationen, wie z. B. Bearbeitungs- oder Rüstzeiten, werden nicht dargestellt. Sollten diese Daten für die Auswertung von Energie- und Materialflüssen wichtig sein, könnte die Datenbox um entsprechende Felder erweitert werden. Weiterhin ist die Karte nicht in der Lage, Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Ressourcenströmen darzustellen. Transportwege werden nur implizit über Koordinaten dargestellt. Prinzipiell ist es möglich, die Energie- und Stoffströme entlang der tatsächlichen Routen und Netze zu zeichnen. Der Mehrwert einer solchen Zuordnung muss jedoch im Einzelfall hinterfragt werden. Wenn der Fokus auf dem Verbrauch und der Bereitstellung von Ressourcen liegt, sollten die Transportwege aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt werden. Alle Methoden werden bei der Anwendung auf große und komplexe industrielle Ökosysteme sehr unübersichtlich. Dies liegt vor allem an der großen Anzahl von Ressourcenflüssen. Schließlich hängt der Mehrwert der Methode entscheidend von der Erhebung und Bereitstellung der benötigten Daten ab.

5.2. Bewertungsmethode zur Potentialabschätzung von Synergien

Im Forschungsprojekt wurde eine Bewertungsmethode entwickelt, mittels welcher zuvor identifizierte, mögliche Synergien hinsichtlich der technischen, ökonomischen und ökologischen Machbarkeit bewertet werden können. Auf Basis eines Kennzahlensystems und einem dreistufigen Entscheidungsprozess können potentielle Synergien nach und nach tiefergehender bewertet und ggf. weiterverfolgt oder verworfen werden. Fokus liegt insbesondere auf der technischen und operativen Kompatibilität zwischen ressourcen anbietenden (Anlagen oder

Unternehmen) und den ressourcenverbrauchenden Einheiten mittels des Konzepts der Deckungsgrade.

Theoretische Grundlagen und Stand der Wissenschaft

Um sich für oder gegen die Realisierung einer potenziellen Synergie zu entscheiden, müssen Kompatibilität der Prozesse und potenzieller Nutzen im Voraus bewertet werden. Zu diesem Zweck werden üblicherweise die technische, wirtschaftliche und ökologische Dimension einer Synergie untersucht (Valenzuela-Venegas et al. 2016; Neves et al. 2019). Die technische Machbarkeit bestimmt, ob eine Möglichkeit für eine Synergie besteht, während die (langfristige) wirtschaftliche Tragfähigkeit und die Umweltauswirkungen bestimmen, ob diese Möglichkeit für die Beteiligten von Vorteil sein wird.

Bisher wurde in der wissenschaftlichen Literatur vor allem eine retrospektive Bewertung vorgestellt, d. h. eine Bewertung bereits umgesetzter Synergien oder IS-Netzwerke (z. B. Chertow und Lombardi 2005; Jacobsen 2006; Martin et al. 2015), während die prospektive Bewertung potenzieller Synergien erst in jüngster Zeit mehr Aufmerksamkeit erhält (Martin und Harris 2018). Bezüglich der prospektiven Bewertung von Synergien konnten wir jedoch folgende Forschungslücken identifizieren:

- Ansätze zur prospektiven Bewertung konzentrieren sich derzeit auf das Netzwerk und vernachlässigen bilaterale Synergien und die Technologieebene.
- Es gibt eine Vielzahl von Indikatoren, deren Anwendbarkeit bzw. Aussagekraft sehr fallspezifisch und an bestimmte Dimensionen oder Einheiten gebunden ist, was die Vergleichbarkeit verschiedener Synergien erschwert.
- Vorhandene Indikatoren repräsentieren nicht die technisch-operative Kompatibilität von Prozessen als Entscheidungshilfe.
- Die meisten Bewertungsansätze scheinen von einer vollständigen Offenlegung von Informationen auszugehen, was in einem frühen Projektstadium möglicherweise nicht realistisch ist.

Darüber hinaus wird selten ein klares Verfahren für den Umgang mit den Indikatoren bereitgestellt, was den Aufwand für Auswahl und Definition geeigneter Indikatoren und folglich für die Bewertung erhöht. Beispielsweise identifizierten Valenzuela-Venegas et al. (2016) 249 mögliche Messungen für die sozialen, ökologischen und technischen Auswirkungen von IS-Netzwerken.

Vorgehen bei der Methodenentwicklung

Wir haben unsere Methode auf der Grundlage des Verständnisses entwickelt, dass die Umsetzung von Synergien ein Entscheidungsproblem darstellt. Der Entscheidungsprozess nach Mintzberg (1979) ähnelt den Phasen der Synergie-Implementierung:

- Identifikationsphase - Chancen und Probleme (d. h. nicht ausreichend genutzte Ressourcen) werden erkannt und relevante Informationen werden gesammelt
- Entwicklungsphase - alternative Lösungen für Probleme (d. h. potenzielle Synergien) werden identifiziert und
- Auswahlphase - Alternativen werden analysiert und eine Alternative wird ausgewählt (d. h. Synergien werden bewertet und ausgewählt).

In unserem Ansatz sind die Entscheidungsträger entweder externe Stakeholder, die eine Bewertung im Auftrag von potenziellen Industriepartnern durchführen, oder die Unternehmen selbst.

Um eine adaptive, zielgerichtete und zeitsparende Bewertung sowie Entscheidungsfindung zu unterstützen, beinhaltet unser Ansatz der Bewertungsmethode folgende Komponenten:

- Festlegung eines aus allgemeinen IS-Zielen abgeleiteten Zielsystems, das an die spezifischen Unternehmensziele angepasst werden kann,
- Entwicklung eines geeigneten Kennzahlensystems zur Überprüfung der Zielerreichung und
- Mehrstufiger Ansatz zur Unterstützung der Bewertung und Auswahl/Ausschluss von Synergien durch den Entscheidungsträger auf Basis der Ziel- und Kennzahlenwerte, der eine frühzeitige Beendigung im Falle der Nicht-Realisierbarkeit ermöglicht.

Die Kennzahlen wurden entweder aus der Literatur abgeleitet (z. B. Ressourcenfunktion, Kooperation, Umweltbelastung) oder von uns in Zusammenarbeit mit Unternehmen entwickelt (z. B. Deckungsgrade). Priorisiert wurde die technische Machbarkeit, gefolgt von der wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung.

Schwerpunkt der Methode sind die dimensionslosen Kennzahlen, um die Anwendbarkeit in verschiedenen Branchen zu verbessern und allgemeine Indikatoren für Stakeholder bereitzustellen und ein branchenübergreifendes Benchmarking zu ermöglichen, im Gegensatz zu sehr kontextspezifischen Maßen.

Bewertungsmethode

Abbildung 11 veranschaulicht den dreistufigen Bewertungsablauf: Zielfestlegung, Vorabbewertung und Detailbewertung. Abhängig von der Einbindung von Intermediären, der Vertrauensbasis zwischen den industriellen Akteuren und der Verfügbarkeit von Personal, können die ersten beiden Stufen entweder separat oder gemeinsam, ggf. mit einem Intermediär, durchgeführt werden.

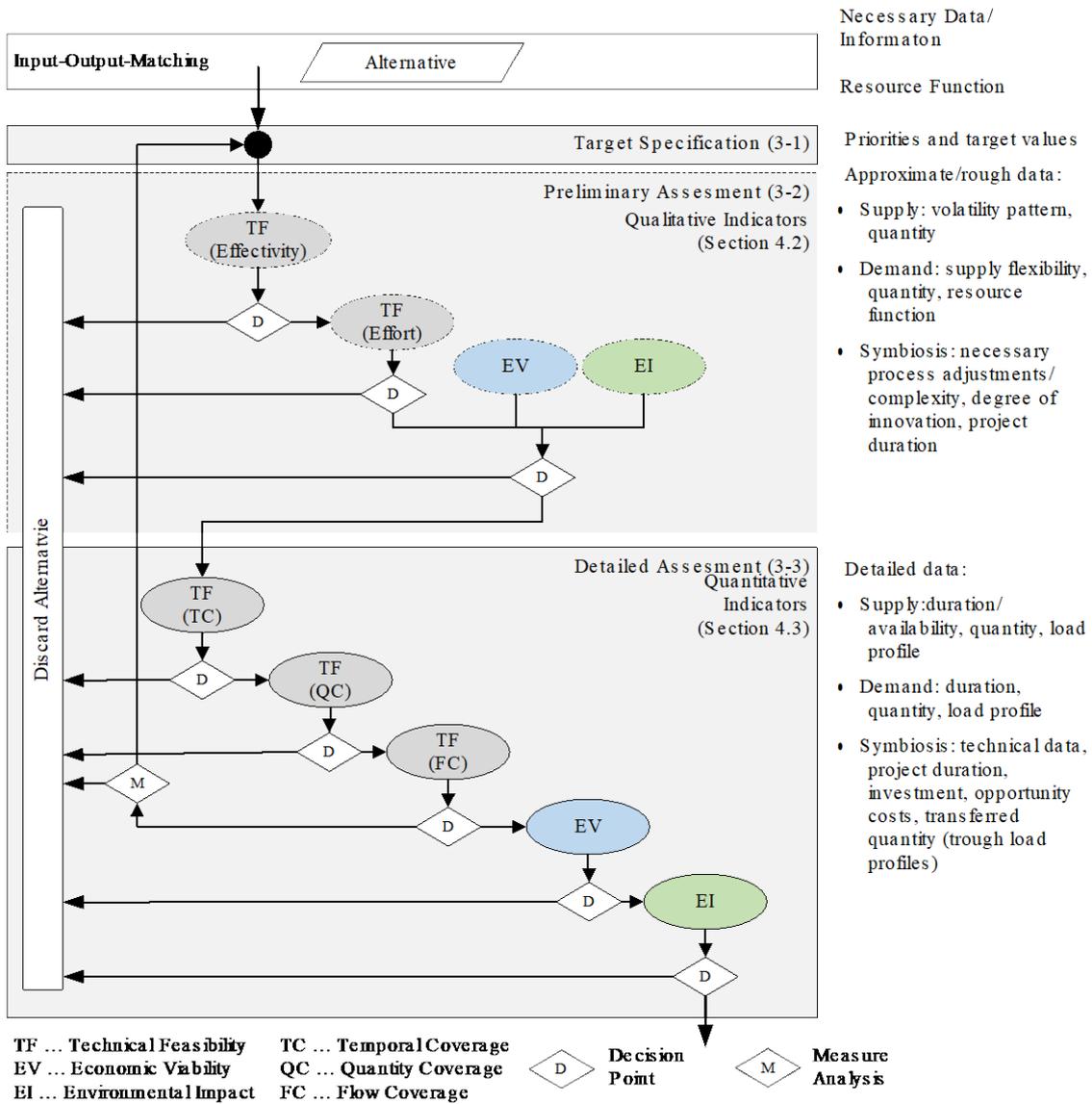


Abbildung 11: Bewertungsprozess mit Beispieldaten

Zielspezifikation: Die Machbarkeit und der Nutzen einer Synergie hängen vom Kontext ab und können für jeden beteiligten Akteur unterschiedlich sein, da sie bei der Entscheidungsfindung unterschiedliche Unternehmensstrategien und Ziele verfolgen können. Daher können die definierten Ziele in Bezug auf Priorität und Zielwert variieren. Für den Ausschluss von Synergiealternativen ist die Reihenfolge der Priorität bzw. die Gewichtung bestimmter Indikatoren entscheidend.

Vorabbewertung: Die vorläufige Bewertung zielt darauf ab, eine Vorauswahl der identifizierten Alternativen für die nachfolgende detaillierte Bewertung zu treffen, indem unzumutbare oder ungünstige Alternativen anhand qualitativer Indikatoren, die bei unvollständigen Informationen anwendbar sind, ausgeschlossen werden (Tabelle 3). Die Kennzahlenwerte werden durch Annahmen und Schätzungen unter Verwendung künstlicher Skalen ermittelt, die den Grad der Zielerreichung widerspiegeln.

Zunächst wird die technische Effektivität einer Alternative ermittelt, gefolgt von einer Bewertung des Implementierungsaufwands. Während die Effektivität einen Hinweis auf die Realisierbarkeit einer möglichen Synergie gibt, kann der Aufwand die Bereitschaft zur Umsetzung und die Wirtschaftlichkeit beeinflussen. Nach jeder Einzelbewertung folgt eine Entscheidung, bei der die Kennzahlenwerte mit den definierten Zielwerten verglichen werden. Die Entscheidungsträger können die Bewertung vorzeitig abbrechen, d. h. die Alternative wird verworfen, wenn die Zielwerte nicht erreicht werden. Wurde eine Alternative als technisch machbar eingestuft, werden die Indikatoren für Wirtschaftlichkeit und Umweltnutzen ermittelt. Diese sind sehr subjektiv und primär informativ, aber wichtig für eine erfolgreiche abteilungs- und unternehmensübergreifende Zusammenarbeit. Fällt die vorläufige Bewertung positiv aus, müssen diese verbleibenden Alternativen in einem weiteren Schritt genauer analysiert werden.

Tabelle 3: Quantitative Kennzahlen für die Vorabbewertung

Ziel	Technische Machbarkeit	Wirtschaftlichkeit	Umweltwirkung
Kennzahl	<ul style="list-style-type: none"> • Ressourcenfunktion* • Prozessanforderung* • Umfang** • Komplexität** 	<ul style="list-style-type: none"> • Planungssicherheit • Kommunikation • Kooperation • Managementunterstützung 	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltbeitrag

* Kennzahlen der technischen Effektivität, ** Kennzahlen des Implementierungsaufwands

Detailbewertung und Maßnahmenanalyse: Die detaillierte Bewertung zielt auf eine faktenbasierte Entscheidungsfindung ab. Quantitative Indikatoren (Tabelle 4) stellen die mathematische Berechnung der Zielerreichung in den verschiedenen Dimensionen dar und ermöglichen ein Ranking der vorausgewählten Alternativen. Zur Bewertung der technischen Machbarkeit wird zunächst die zeitliche, dann die mengenmäßige Deckung und schließlich die der Lastprofile von Ressourcenangebot und -nachfrage berechnet, geordnet nach dem Aufwand der Datenerhebung und -berechnung.

Tabelle 4: Qualitative Kennzahlen für die Detailbewertung

Ziel	Technische Machbarkeit	Wirtschaftlichkeit	Umweltwirkung
Kennzahl	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitdeckungsgrad • Mengendeckungsgrad • Flussdeckungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • ROI 	<ul style="list-style-type: none"> • Ressourceneinsparung • Umweltbelastung

Zusammenfassung und Fazit

Die entwickelte Methode, ermöglicht in einem adaptiven dreistufigen Bewertungsprozess die Kompatibilität verschiedener Prozesse oder Unternehmen zunächst grob abzuschätzen und später zu berechnen. Unser Ansatz kombiniert qualitative und quantitative Indikatoren, um die technische Kompatibilität verschiedener Prozesse und den erwarteten wirtschaftlichen und ökologischen Nutzen für die beteiligten Parteien zu bewerten. Dieses Verfahren kann den Zeit- und Arbeitsaufwand für die Informationssammlung und Synergiebewertung durch industrielle Akteure und intermediäre Stakeholder reduzieren.

Hauptmerkmale der Methode sind ihre Führung durch den Bewertungs-, Ausschluss- und Entscheidungsprozess und die Einführung dimensionsloser Deckungsgrade zur Bewertung der technischen oder betrieblichen Übereinstimmung der beteiligten Einheiten. In der Anwendung zeigt die Methode die wichtigsten Stellhebel für die Umsetzung, d. h. Treiber und Barrieren der Wirtschaftlichkeit.

Da die industrielle Symbiose ein weites Feld mit unterschiedlichen Akteuren umfasst, zielen wir auf eine breite Anwendbarkeit und ein mögliches Benchmarking unter Verwendung neuer

dimensionsloser Kennzahlen für die technische Bewertung ab. Die entwickelte Methode soll Industrieakteure und intermediäre Stakeholder dabei unterstützen, fundierte Entscheidungen über die Umsetzung einer Synergie zu treffen.

5.3. ESProNet-Modellbibliothek und Simulation

Im Rahmen des Projektes wurde ein Modellierungs- und Simulationsansatz für die Wiederverwendung und den Austausch von Ressourcen im Kontext der industriellen Symbiose entwickelt. Ziel des Projekts war es, eine eigene Modellbibliothek mit wiederverwendbaren und vorkonfigurierten Modellelementen für die Simulation verschiedener Ressourcenaustausche bereitzustellen. Dadurch lassen sich Wirkmechanismen bei der Interaktion von Technologien oder Organisationen, die als Ressourcenanbieter oder -verbraucher oder beides agieren, untersuchen. ESProNet verfolgt einen modularen (objektorientierten), bottom-up (technologieorientierten), bedarfsorientierten (pull-orientierten) Ansatz auf Basis der Modellierungssprache Modelica. Da ökologische und ökonomische Aspekte von Synergien von der Organisation (z. B. Preisgestaltung) und der technischen Umsetzung (z. B. Technologie) abhängen, können diese anhand von simulierten Szenarien bewertet werden.

Theoretische Grundlagen und Stand der Wissenschaft

Für die Modellierung und Simulation von industriellen Symbiosen werden verschiedene Modellierungsmethoden verwendet. Die gängigsten Ansätze sind Netzwerktheorie, agentenbasierte Modellierung, ontologiebasierte Modellierung und Systemdynamik.

Alle diese Modelle stellen die Entwicklung von Synergien in Industrieparks dar, unterscheiden sich aber in Bezug auf Niveau, Skalierbarkeit, Zielsetzung und Fokus. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die verschiedenen Merkmale. Der schwarze Kombinationsgraph visualisiert beispielhaft die Merkmale der Netzwerktheorie. Der vorgestellte Simulationsansatz ist grau hinterlegt.

Tabelle 5: Charakteristika von dynamischen Analysetools (Maiwald et al. 2020)

Category	Characteristics				
Approach	● Network Theory	Agent-Based	System Dynamics	Ontology-Based	Object-oriented
Level	● Network / EIP	Industrial Plant	Process	Technology	
Scalability	● None	Top down		Bottom up	
Objective	● Research		Decision-Support		
Focus	Economic	Environmental	Technical	● Social	Causation
Time	Discrete		●	Continuous	

Die Ebene beschreibt das untersuchte System und impliziert, wie stark Elemente abstrahiert werden, z. B. werden auf Netzwerkebene Anlagen oft nur mit Inputs und Outputs definiert, während auf Anlagenebene vorhandene Prozesse oder Technologien innerhalb der Anlage beschrieben werden. Skalierbarkeit bezieht sich darauf, ob nur eine Ebene modelliert und simuliert werden kann oder ob es eine Hierarchie von Modellelementen gibt und Modellelemente aggregiert (bottom-up) oder heruntergebrochen (top-down) werden können. Da die meisten Simulationen forschungsorientiert sind, besteht ihr Ziel darin, Erkenntnisse und Erklärungen darüber zu liefern, wie Synergien entstehen oder zum Stillstand kommen sowie welche Faktoren relevant sind und sich gegenseitig beeinflussen. Einige Simulationen wurden entwickelt, um Praktiker bei der Entscheidungsfindung über die Umsetzung einer potenziellen Synergie zu unterstützen, indem sie potenzielle reale Synergieszenarien in Bezug auf Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit analysieren und bewerten. Die meisten Modelle konzentrieren sich auf wirtschaftliche (Kosten, Einsparungen etc.) und ökologische (Emissionen, Deponieentwicklung

etc.) Aspekte, während technische (Mengen, Betriebsweise etc.) und soziale Aspekte (Vertrauen, Kontakte etc.) nachrangig ausgewertet werden.

Die Recherche ergab, dass es nur wenige praxisorientierte Ansätze für IS-Simulationswerkzeuge gibt. Abgesehen vom J-Park Simulator scheinen die Simulationsmodelle nur für den Gebrauch durch ihre Entwickler bestimmt zu sein. Es ist anzumerken, dass in der Literatur weitere Simulationswerkzeuge erwähnt werden, zu denen wenige oder keine Informationen verfügbar sind und deren Status daher unklar ist. Es konnte kein Simulationstool zur Evaluation konkreter Symbiosealternativen (z. B. zeitliche Überlappung von Angebot und Nachfrage, Ressourcentemperatur) ermittelt werden. Im Rahmen von ESProNet wurde daher eine Simulationsbibliothek entwickelt, die ein bestehendes System und die Auswirkungen von Änderungen daran modelliert (neue Synergie, geändertes Schichtensystem, Integration von Speichern usw.), um die Leistungsfähigkeit des Systems zu bewerten. Darüber hinaus enthalten die meisten Simulationsmodelle Elemente auf einem hohen Abstraktionsniveau, aber die tatsächliche Passung hängt von Einheiten darunter ab (z. B. Abteilung, Einrichtungen). Dem Input-Output-Ansatz folgend ist es sinnvoll Quellen und Senken auf niedrigeren Ebenen zu betrachten, da diese spezifisch betroffen und möglicherweise auch anpassbar sind.

Vorgehen bei der Bibliotheksentwicklung

Zur Beschreibung der benötigten Bausteine und Modelle wurde Modelica in der SimulationX-Entwicklungsumgebung verwendet, welche eine dialoggestützte Explikation der Modelle ermöglicht. Diese Elemente sind in domänenspezifischen oder benutzerdefinierten Modellbibliotheken organisiert (Abbildung 12). Diese Elemente sind zur Systemabbildung parametrierbar und verbindbar. Im Folgenden werden die Leitprinzipien und zugrundeliegenden Modellierungsannahmen vorgestellt und erläutert, um den Umfang der Simulation zu verdeutlichen.

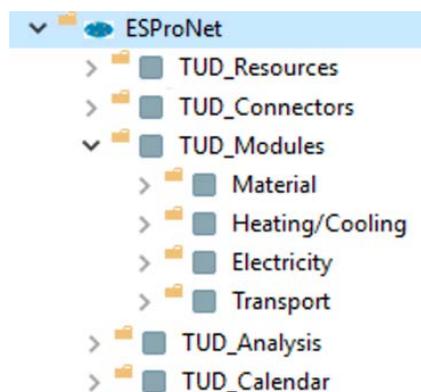


Abbildung 12: ESProNet-Modellbibliothek

Modularität: Modularität bezieht sich sowohl auf funktionale als auch auf hierarchische Modularität. Alle Elemente in Synergien können in Funktionen unterteilt werden. Innerhalb der Modellbibliothek werden grundlegende, wiederverwendbare und konfigurierbare Funktionsmodule bereitgestellt. Diese Module können kombiniert, verändert oder ersetzt werden, um sowohl einfache abstrakte (z. B. generische Quelle-Senke-Beziehungen) als auch komplexe Systeme (z. B. Produktionssystem aus verketteten technischen Anlagen) zu modellieren. Da Modelica eine objektorientierte Modellierungssprache ist, übernimmt sie das objektorientierte Paradigma mit Konzepten wie Vererbung und Polymorphismus.

Die industrielle Symbiose umfasst das Grundkonzept von Quellen (Inputs ins System) und Senken (Outputs aus dem System) und deren Interaktion, sei es ein Unternehmen oder eine

Technologie. Ein Unternehmen ist jedoch bedeutend vielgestaltiger hinsichtlich benötigter Parameter (Energie- und Materialbezug, Transport etc.). Daher wird grundsätzlich eine Bottom-up-Entwicklung der Modellelemente verfolgt. So können spezifische Stellhebel eines Unternehmens und mögliche notwendige Anpassungen für Synergien (z. B. Betrieb einer Anlage, Integration von Speichern) identifiziert werden. Obwohl die Entwicklung von Bottom-up-Modellen vorgeschlagen wird, ist es manchmal nicht notwendig, alle Elemente eines Systems von der Einheitsebene aus aufzubauen, da nicht zwangsläufig alle Teilnehmer an einer Synergie oder einem Produktionssystem im Detail dargestellt werden müssen. Daher sollten Elemente verschiedener Hierarchieebenen in einem Modell untergebracht werden können. Die Modellelemente innerhalb eines Modells sind mit einem Namenszusatz versehen, der angibt, welche Hierarchieebene sie repräsentieren. Die Gliederung ist wie folgt (Level 4 – 5): Maschinen (-teil), Prozess, Unternehmensteil, Unternehmen, Unternehmensverbund.

Multi-Domänen: Verschiedene Domänen (Material, Wärme, Strom) sollten nicht unabhängig voneinander betrachtet werden, da Ressourcen auf unterschiedliche Weise genutzt werden können. Die Funktion (z. B. Materialeinsatz, Heizung, Kühlung), die eine Ressource erfüllen kann, hängt von ihren Eigenschaften (Temperatur, Heizwert usw.) ab. So kann z. B. Holz nicht nur stofflich, sondern auch durch Verbrennung thermisch verwertet werden. Es werden Schnittstellen ("Konnektoren") für die verschiedenen Domänen bereitgestellt, um relevante Eigenschaften zu bestimmen und Kompatibilität zu definieren. Darüber hinaus visualisieren diese Konnektoren die notwendigen Eingangsressourcen eines Elements. Der Zusammenhang zwischen den Domänen wird innerhalb der Bausteine hergestellt. So hat z. B. der Unternehmensbaustein je nach Konfiguration Material-, Wärme- und Strombedarf, deren Verhältnisse Baustein-intern festgelegt werden.

Graphentheorie: Die erstellten Modelle folgen den Regeln und Vorgaben eines Digraphen (gerichteter Graph), bei dem die Elemente die Knoten und der Informations- oder Ressourcenfluss die Kanten sind. Damit soll sichergestellt werden, dass das Modell vollständig, gerichtet und gewichtet ist und keine isolierten Elemente oder Schleifen enthält (Zyklen sind erlaubt).

Pull-Prinzip: Nach dem Kanban-Prinzip gibt es zwei Flüsse, einen Informationsfluss ("Anforderung") und einen physischen Ressourcenfluss. Informationen werden von jeder Komponente an den Anfang des Systems oder Prozesses mit einer virtuellen KANBAN-Karte weitergegeben und ggf. umgewandelt und berechnet. Der physikalische Ressourcenfluss ist vom Vorgänger zum Nachfolger gerichtet. Ein Rücklauf an der gleichen Kante ist nicht erlaubt, da es dem Prinzip eines gerichteten Graphen widersprechen würde. Dieses Prinzip geht davon aus, dass eine Synergie nur dann entsteht, wenn ein bestimmter Bedarf gedeckt werden muss und nicht nur, weil ein Angebot vorliegt. Die Anfrage ist ein Vektor mit Informationen über den Ressourcentyp und die benötigten Eigenschaften, der über die Konnektoren übertragen wird (siehe Abschnitt Modellkombination).

Ressourcenflusslimitierung: Die Liefermenge ist durch die Nachfrage begrenzt. Es ist also nicht möglich, mehr zu liefern, als mit der virtuellen KANBAN-Karte angefordert wurde. Eine Lagerkomponente kann zur Entkopplung von Angebot und Nachfrage genutzt werden. Beim Unternehmensbaustein erfolgt die Anforderung von Material bedarfsbezogen. Eine positive Differenz zwischen Angebot und Nachfrage wird als Abfall bzw. Emission kategorisiert. In der Programmierung wird die Einhaltung der Prämisse durch eine Vergleichsfunktion (Minimum) sichergestellt.

Masse- und Energiebilanzen: Um zu gewährleisten, dass in einem System keine Energie oder Masse entsteht oder fehlt, basieren die Komponenten und damit das gesamte Modell auf Energie- und Massenbilanzen. In Anlehnung an den Ansatz von Boix et al. (2015) wird die

Berechnung der Gleichgewichtszustände für verschiedene Zeitscheiben mit einem Differentialgleichungssystem gelöst.

Approximation: Physikalische Prozesse (insb. Thermodynamik, Logistik, Stromnetz) werden näherungsweise beschrieben. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Synergie nur dann umgesetzt wird, wenn eine signifikante Verbesserung, d. h. die Vorteile übersteigen die Nachteile bzw. den Aufwand deutlich, zu erwarten ist. Deshalb und aufgrund der Komplexität der physikalischen Vorgänge, nehmen wir Modellfehler in Kauf (z. B. vereinfachter thermodynamischer Zustandsübergang, Auslassung der Leistungsspannung). Dennoch werden die physikalischen Eigenschaften der Ressourcen berechnet, da sie die Grundlage für die Wiederverwendbarkeit der Ressourcen und die Technologiekompatibilität darstellen. Modelica arbeitet mit Zustands- und Flussvariablen, um Gleichungssysteme zu lösen. Die spezifische Enthalpie wird in Verbindung mit dem Druck als Zustandsvariable verwendet, um Ressourceneigenschaften bezüglich Energieniveau und Zustand (z. B. Temperatur, Wärmekapazität, Dichte) möglichst genau zu bestimmen (Abbildung 13).

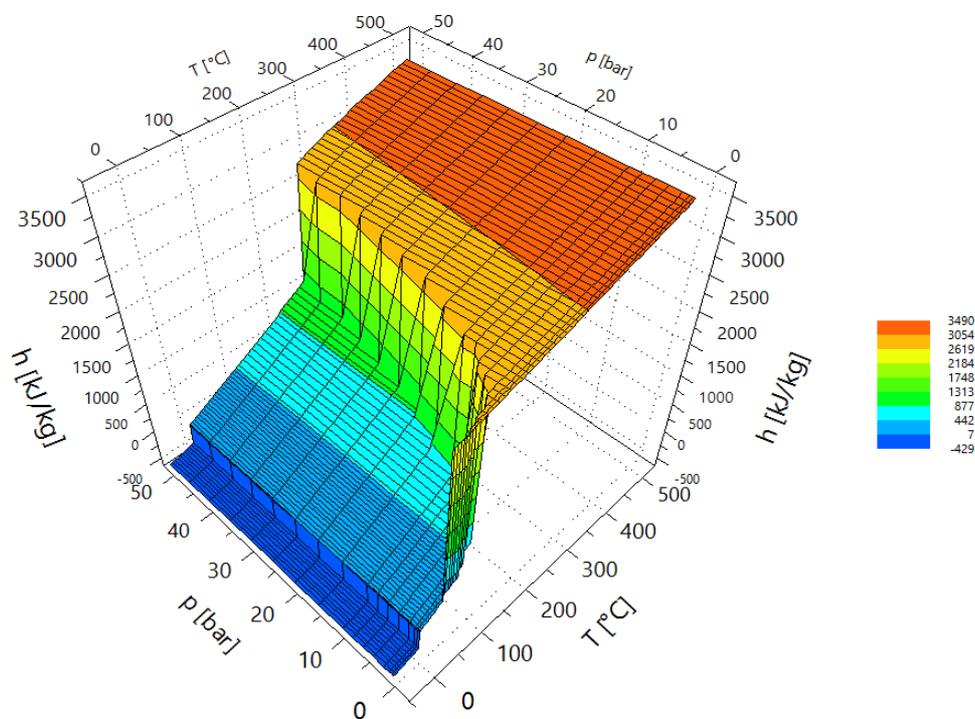


Abbildung 13: Enthalpie von Wasser in Abhängigkeit von Druck und Temperatur

Bibliotheksbausteine

Ressourcen: Der Austausch und die Wiederverwendung von Ressourcen hängt insbesondere von deren Eigenschaften ab. Da Energie (chemisch, elektrisch, thermisch etc.) mit Ausnahme von Elektrizität und Strahlungswärme in der Regel an materielle Energieträger gebunden ist, wird nur zwischen Material und Leistung unterschieden. Um neue Ressourcen anzulegen und eine vollständige Beschreibung dieser zu gewährleisten, wurde eine Basisressource definiert, von der spezifische Ressourcen (z. B. Stahl, Wasser, Erdgas) abgeleitet werden. Jeder Ressource wird eine ID zugewiesen, um Angebot und Nachfrage der gleichen Ressource zu gewährleisten. Die verschiedenen physikalischen Eigenschaften werden in Form

von statischen Werten, Kurven und Matrizen festgelegt. Die Daten basieren im Allgemeinen auf dem Chemistry WebBook des National Institute of Standards and Technology (NIST) (Linstrom 1997). Weiterhin wurden Daten für Brennstoffe aus eigenen Datenbanken eingefügt. Für elektrische Energie wird eine Basisleistung angesetzt, da für diesen Ressourcentyp die oben genannten Eigenschaften nicht erforderlich sind und keine unterschiedlichen Spannungsebenen berücksichtigt werden. Für Umweltanalysen werden jedoch verschiedene Strommixe berücksichtigt (z. B. Strommix Deutschland 2017, Prognose Deutschland 2040, 100 % erneuerbare Energien).

Basismodule: Die konzeptionelle Modellierung zur Beschreibung der notwendigen Module und ihrer Eigenschaften erfolgte mittels einer Ontologie (Kosmol und Esswein 2018; Maiwald et al. 2018). Alle darin enthaltenen Technologien (Energie, Erzeugung, Transport, Speicherung) basieren auf Grundkomponenten. Diese Basiskomponenten (Funktionen) sind die folgenden: Quelle (Lieferant), Senke (Verbraucher), Speicherung, Zusammenführung, Trennung. Für jede Domäne gibt es eine entsprechende Basiskomponente, die in Abbildung 14 am Beispiel der Materialdomäne dargestellt sind.

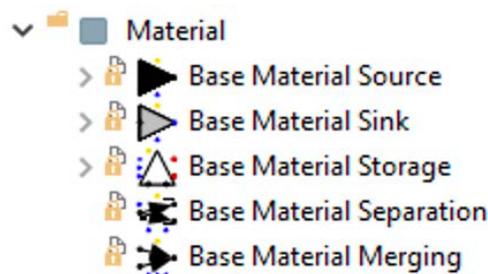


Abbildung 14: Basiskomponenten der Materialdomäne

Die Quellen und Senken sind als Systemschnittstellen zu verstehen, in den Material und Energie in das System gelangt bzw. es verlässt. Für Zusammenführung und Trennung gelten gemäß den Prämissen Masse- und Energiebilanzen. In jeder Komponente werden die Art der angeforderten Ressource und die technischen Parameter, welche die Kapazität und Verarbeitung der Ressource bestimmen (z. B. maximaler Massenstrom, maximale Heizleistung), festgelegt. Darüber hinaus enthält jede Komponente die Möglichkeit, den Stromverbrauch für ihren Betrieb zu wählen (Strommix und Verbrauchsmuster). Zur Abbildung verschiedener Betriebsarten und Nutzungsszenarien wird ein Schichtmodell sowie eine entsprechende Schnittstelle zur Übernahme bestimmter Verfügbarkeiten definiert.

Compounds: Compounds bestehen aus den vorgestellten Basismodulen und bilden eine komplexere Technologie oder Funktion ab. Die Daten für die Modellierung dieser stammen aus Berechnungen, Literaturangaben und Messungen von Industriepartnern. Zur Verdeutlichung wird das Beispiel der Fernwärmeleitung (Abbildung 15) verwendet.

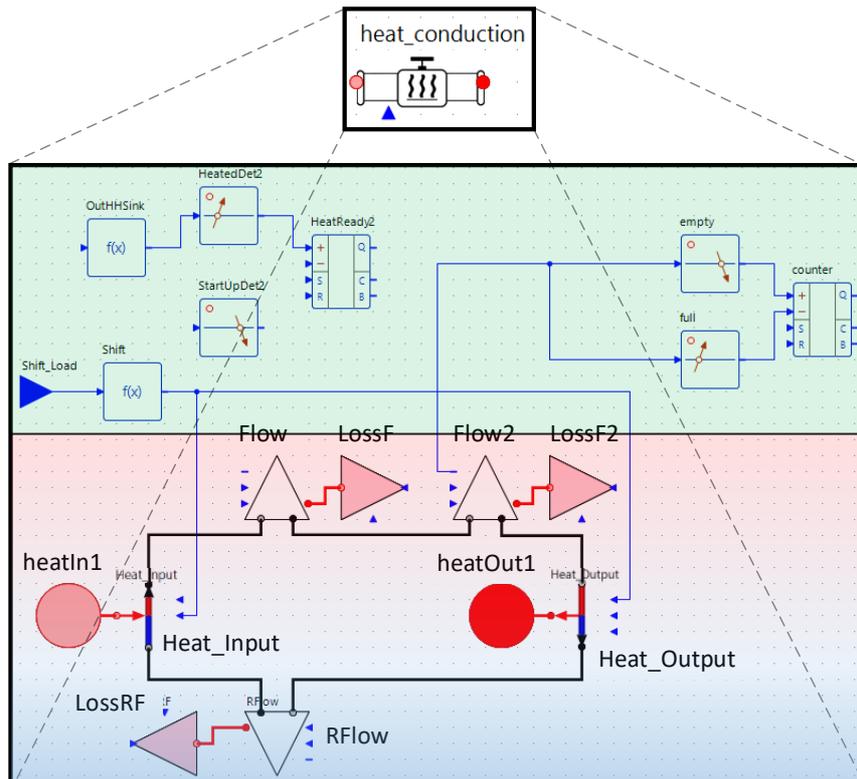


Abbildung 15: Compound der Fernwärmeleitung in der ESProNet-Bausteinbibliothek

Das übergeordnete Element hat drei Anschlüsse für Wärmeein- und -ausgang (rote Konnektoren) sowie für das Schichtmodell (blauer Signaleingang). Diese Anschlüsse sind auch in der inneren Struktur zu finden und zeigen die Verbindung der inneren mit der äußeren Struktur. Der Compound besteht aus zwei Teilen: Die Steuerungsebene (grün) und der physikalischen Objektebene (rot-blau). In der Steuerungsebene werden Informationen über das Schichtmodell an alle Komponenten weitergegeben, die diese Informationen benötigen. Weiterhin enthält diese Ebene zwei Zustandsautomaten, die zum einen den Zustand der Wärmeleitung (Aus / Ein) definieren und zum anderen Verzögerungszeiten beim Anfahren erfassen.

Der physikalische Berechnung des Wärmeübertragungskreislaufs umfasst insgesamt vier Technologietypenvertreter: Materialheizung, Speicher, Wärmesenke und Materialkühlung. Beginnend auf der linken Seite wird dem Kreislauf (Heat_Input) Wärme an ein Medium (Wasser, Thermoöl etc.) übertragen. Anschließend durchläuft das Medium zwei Speicher (Flow und Flow2), die abstrakt die Heatpipe darstellen. Zwei Speicher werden aufgrund des Anfahrverhaltens benötigt, wobei das kalte Medium erst aus der Rohrleitung gepresst werden muss. Die Verwendung eines Speichers würde die Temperatur langsam ansteigen lassen und somit den Temperatursprung nach dem Herausdrücken des kalten Mediums aus der Leitung vernachlässigen. An der Entnahmestelle (Heat_Output) wird dem Kreislauf Wärme entzogen, wenn sie von einer nachgeschalteten Stelle angefordert wird. Der Rücklauf (RFlow) wird durch eine Speicherkomponente dargestellt. Alle Speicher unterliegen einem Wärmeverlust (LossF, LossF2, LossRF), der von der Spezifik der Wärmeleitung und der Umgebungstemperatur abhängt.

Modellkombination

Damit die einzelnen Modellelemente oder Komponenten untereinander Ressourcen austauschen können, müssen die Verbindungen zwischen ihnen festgelegt werden. Komponenten können in SimulationX und anderen Modelica-Entwicklungsumgebungen durch Kanten verbunden werden. Diese Kanten können physische Ressourcenflüsse, Informationsflüsse oder beides sein. Für jede der modellierten Domänen gibt es spezifische Konnektoren.

Konnektor: Je nach Domäne enthalten die Konnektoren unterschiedliche Durchflussparameter, d. h. ein Materialkonnektor hat einen Massenstrom mit einer Temperatur, ein Wärmekonnektor hat zusätzlich einen Wärmestrom mit thermischer Leistung bei mittlerer Temperatur und der Leistungskonnektor hat Leistung als Durchflussgröße. Zusätzlich wird in den Konnektoren ein Parametervektor definiert, der festlegt, welche Eigenschaften von Ressourcen an die Komponente weitergegeben werden (ID, Phase, Temperatur, Dichte etc.).

Request: Die Pull-Orientierung wird über einen Anforderungsvektor (virtuelle KANBAN-Karte) realisiert. Dieser Vektor enthält die Ressourcen-ID, die angeforderte Menge (Materialfluss, Wärmestrom usw.), die Art der Anforderung (forced oder conditioned), Temperaturanforderungen (ideal, maximal, minimal) und Druck (maximal, minimal). Eine erzwungene Anforderung bedeutet, dass die Anforderung befolgt werden muss, während eine bedingte Anforderung bedeutet, dass die Anforderung befolgt werden kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Produktionstechnologien, insbesondere die anderer Unternehmen, eigenständig arbeiten und nicht unbedingt die erforderliche Menge an Ressourcen bereitstellen (conditioned), während die Speicher- und Energietechnologien in erster Linie der ausreichenden Versorgung der Produktion dienen (forced). Dieses Zusammenspiel ist in Abbildung 16 dargestellt.

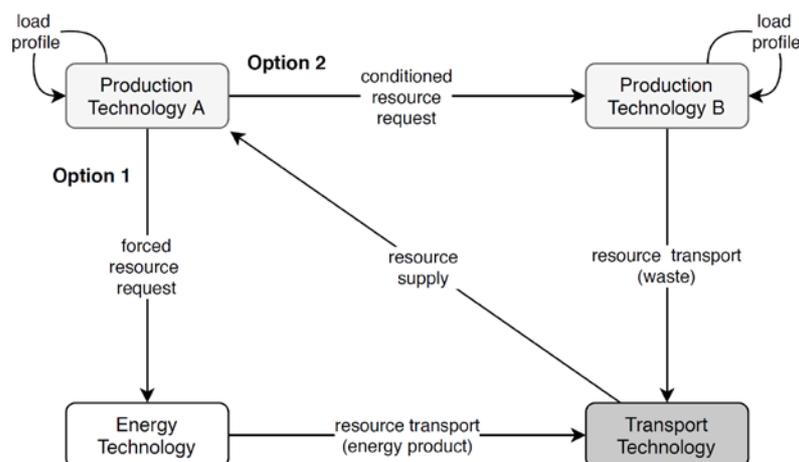


Abbildung 16: Forced und conditioned Request

Zusammenfassung und Fazit

Zur Ermittlung von IS-Wirkmechanismen wurde im Rahmen des Projekts eine Simulationsbibliothek entwickelt. Der Ansatz ist modular (objektorientiert), bottom-up (technologieorientiert), bedarfsbasiert (pull-orientiert) und verwendet die nicht-proprietäre, objektorientierte, gleichungsbasierte Modellierungssprache Modelica. Dabei wird gezeigt, wie eine gleichungsbasierte Sprache im gegebenen Kontext (z. B. Pull-Orientierung, virtuelle KANBAN-Karte) angewendet werden kann.

Derzeit muss eine ganzheitliche Analyse manuell durchgeführt werden. Einzelne Modellelemente können zwar mit den in SimulationX gegebenen Werkzeugen analysiert werden, aber

es fehlt eine umfassende Analysemethode des Gesamtmodells sowie wirtschaftliche Daten. Zukünftig muss eine Auswertungsmöglichkeit entweder innerhalb des Werkzeugs (z. B. eine Analysekomponente) oder durch Datenexport und Abfrage in einer Datenbank bereitgestellt werden. Da die wirtschaftliche Situation von einer Vielzahl von Faktoren abhängt, wie z. B. Entsorgungskosten, Beschaffungskosten oder Betriebskosten der einzelnen Anlagen, vertragliche Vereinbarungen usw., ist es schwierig, Preise innerhalb der Modellkomponenten selbst zuzuordnen.

6. Bewertende Zusammenfassung und Ausblick

6.1. Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben ESProNet wurden mehrere, aufeinander aufbauende Werkzeuge zur Analyse, Abbildung und Bewertung potentieller industrieller Symbiosen entwickelt, wobei eine breite Anwendbarkeit hinsichtlich der betrachteten Elemente (Maschinen- bis Industrieparklevel) und Nutzer (z. B. Fachexperte, Forscher, Berater) im Vordergrund stand.

Schwerpunkt des Projektes bestand in der Entwicklung einer Modellbibliothek zur Abbildung und Simulation von Energie- und Stoffströmen in Produktionssystemen, um letztendlich Untersuchungen hinsichtlich Ressourcen- und Energieeffizienzpotentialen vorzunehmen. Es wurden verschiedene Modelle (Bausteine) entwickelt, mit denen verschiedenste Produktionssysteme auf einem hohen Abstraktionsniveau (z. B. Quelle-Senke-Beziehung) oder einem detaillierteren Niveau (z. B. Technologie Wärmetauscher) abgebildet werden können. Die Modellbibliothek wurde genutzt, um einerseits verschiedenste konkrete Szenarien potentieller Symbiosen bei den einzelnen Projektpartnern abzubilden und zu untersuchen und andererseits hypothetische Szenarien zum Zwecke allgemeiner Aussagen zu entwerfen. Entsprechend wurde das Hauptziel des Vorhabens, eine funktionsfähige Modellierungs- und Simulationsbibliothek zu entwickeln, mit der sich potentielle Synergien abbilden und untersuchen lassen, erreicht. In diesem Zuge wurden auch Wirkungsweisen der modellierten Technologien in den modellierten energetisch-stofflichen Wertschöpfungsketten untersucht.

Die Entwicklung der angrenzenden Methoden ist weiterhin als sehr positiv zu bewerten, da sie hilfreich zur Vorbereitung und Informationsaufbereitung für die Identifikation und Bewertung von Synergiepotentialen sind und den methodischen, insbesondere praxisorientierten, Werkzeugkasten im Bereich der Industriellen Symbiose ergänzen.

Bei der Bearbeitung des Projektes konnten weiterhin verschiedene Erkenntnisse („Lessons Learned“) bezüglich der Modellierung und der industriellen Symbiose gewonnen werden (siehe Abbildung 17). So war beispielsweise ein untergeordnetes Ziel, generelle Handlungsempfehlungen zur Ressourceneffizienz durch Kooperation (z. B. für einen Industriepark) abzuleiten, allerdings war dies kaum möglich. Die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse haben gezeigt, dass eine Potentialabschätzung stets individuell und kontextabhängig ist, wodurch allgemeine Handlungsempfehlungen kaum abgeleitet werden können bzw. für den Einzelfall wenig Relevanz haben. Die technischen, wirtschaftlichen und strukturellen Gegebenheiten von Unternehmen und Regionen sind sehr unterschiedlich, weswegen nur fallspezifische Aussagen zu Symbiose-Potentialen in einem untersuchten Produktionssystem getroffen werden. Das bestätigt die Aussagen in der bisherigen Forschung. Die entwickelten Werkzeuge unterstützen jedoch die individuelle Potentialabschätzung.

Lessons Learned

IS-Modellierung

- Geeignet für homogene Ressourcen (!=Mischressourcen)
- Input-Output-Matching kann nicht durch das Tool geleistet werden
- Detaillierte Modelle sind interessant, wenn sie keinen Nachteil (Datenverfügbarkeit etc.) für den Nutzer haben
- Bausteine so simpel wie möglich halten, um Menge an notwendigen Daten in Grenzen zu halten

Organisatorisch

- Interne Symbiosen mit höherer Umsetzungschance (Interessenkonflikte, Offenheit mit (techn.) Daten)
- Aufzeigen der Potentiale nicht ausreichend
- Dezentrale Energieversorgung und IS-Aspekte für zukünftige Planung vorziehen, nicht zwingend Energiezentrale (s. BMW)
- Nicht jedes Produktionssystem eignet sich in gleichem Maße für IS. Auch nicht, wenn es sich um einen Hochenergieverbraucher handelt (Werkstattfertigung vs. Fließfertigung)
- Simulation ist Motivator aber kein „enabler“

Wirtschaftlich

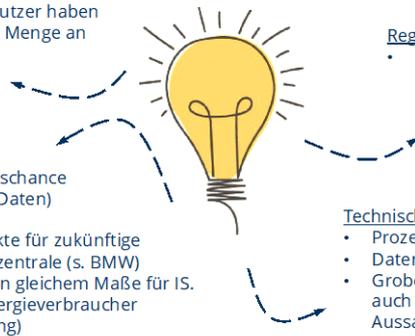
- Aktuelle Marktmechanismen stehen Konzept IS entgegen
- IS-Projekte sind umfangreiche Projekte / Maßnahmen
- Niedrige Energiepreise konterkarieren kurze ROI für IS-Projekte
- CO₂-Bepreisung als zukünftiges Potential

Regulatorisch

- Strenge Umweltauflagen haben zwar ihren Grund, sind jedoch nicht auf IS ausgelegt

Technisch

- Prozesssicherheit als Barriere für Synergien
- Datenverfügbarkeit kritisch zu beurteilen
- Grobe Modelle sind einfach zu erstellen und auch rechenfähig, aber mit begrenzter Aussagekraft



Lessons Learned

IS-Modellierung

- Geeignet für homogene Ressourcen (d.h. gut und eindeutig beschreibbare Ressourcen)
- Input-Output-Matching kann nicht durch das Tool geleistet werden
- Detaillierte Modelle sind interessant, wenn sie keinen Nachteil (Datenverfügbarkeit etc.) für den Nutzer haben
- Bausteine so simpel wie möglich halten, um Menge an notwendigen Daten in Grenzen zu halten

Organisatorisch

- Interne Symbiosen mit höherer Umsetzungschance (Interessenkonflikte, Offenheit mit (techn.) Daten)
- Aufzeigen der Potentiale nicht ausreichend
- Dezentrale Energieversorgung und IS-Aspekte für zukünftige Planung vorziehen, nicht zwingend Energiezentrale (s. BMW)
- Nicht jedes Produktionssystem eignet sich in gleichem Maße für IS. Auch nicht, wenn es sich um einen Hochenergieverbraucher handelt (Werkstattfertigung vs. Fließfertigung)
- Simulation ist Motivator aber kein „Enabler“

Wirtschaftlich

- Aktuelle Marktmechanismen stehen Konzept IS entgegen
- IS-Projekte sind umfangreiche Projekte / Maßnahmen
- Niedrige Energiepreise konterkarieren kurze ROI für IS-Projekte
- CO₂-Bepreisung als zukünftiges Potential

Regulatorisch

- Strenge Umweltauflagen haben zwar ihren Grund, sind jedoch nicht auf IS ausgelegt – z. B. verhindern Restriktionen zur Weiterverwendung von bestimmten Nebenprodukten oder bürokratische Hürden die Implementierung von Synergien

Technisch

- Prozesssicherheit als Barriere für Synergien
- Datenverfügbarkeit kritisch zu beurteilen
- Grobe Modelle sind einfach zu erstellen und auch rechenfähig, aber mit begrenzter Aussagekraft



Abbildung 17: Auszug der Lessons Learned aus dem ESProNet-Projekt

Durch die Zusammenarbeit mit den assoziierten Partnern aus der Praxis konnten zudem Erkenntnisse hinsichtlich der technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Barrieren zur Umsetzung der IS gewonnen werden.

6.2. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auf verschiedenen Tagungen (z. B. ESI SimulationX User Forum 2016, Winter Simulation Conference 2017, Dresdner Kraftwerkskolloquium 2017, Präsenztreffen Forschungsnetzwerk Energiesystemanalyse 2018) wurden keine Fortschritte anderer Stellen vorgestellt, die eine ganzheitliche Betrachtung und Modellierung von (unternehmensübergreifenden) Produktionssystemen oder vergleichbare Ansätze verfolgen.

Literaturrecherchen zu Modellierung und Simulation in diesem Bereich ergab, dass die objektorientierte Modellierung und der Fokus auf Technologien zur Darstellung von Ressourcenflüssen bisher kaum aufgegriffen werden. Es wurde eine Übersicht zu vorhandenen Industrial Symbiosis-Tools zusammengestellt, die mit ESProNet vergleichbare Werkzeuge und Ansätze haben. Diese sind nachfolgend in Tabelle 6 dargestellt. Nach genauerer Untersuchung stehen diese dem Forschungsvorhaben bzw. den Verwertungsabsichten nicht entgegen. Sie sind für ESProNet im Sinne der Weiterentwicklung und Verfolgung alternativer Ansätze relevant gewesen.

Tabelle 6: Übersicht relevanter IS-Projekte

Ansatz	Ziel/Bemerkungen	Quelle
Agent-based modeling & Innovation Diffusion Theory	Untersuchung der Auswirkungen von Förderstrategien auf die Identifikation von IS-Möglichkeiten in einem Industriesystem; Schwerpunkt auf Strategiebewertung für Förderung von „Wissenskoordination“ und „Beziehungskoordination“.	Zheng und Jia (2017)
J-Park Simulator (JPS)	Ontologiebasierter Ansatz zur Abbildung von Eco-Industrial Parks mit Fokus auf Abwärmenutzung, Simulationstool; Energieströme stehen im Vordergrund; Materialströme werden nicht berücksichtigt.	Zhang et al. (2017)
SCOR model for Eco-Industrial Parks management	Das Vorhaben zielt auf die Bewertung der Leistung und des Nutzens eines Eco-Industrial Parks ab. Dafür werden Methoden der Logistik, konkret dem Supply Chain Operations Reference-Model (SCOR), auf die Industrial Symbiosis-Fallstudien übertragen.	Le Tellier et al. (2017)
SymbioSyS	Datenbankbasiertes System, dass Input-/Waste-Stoffströme abzugleichen versucht. Es wird auf generelle Verfügbarkeit und Realisierbarkeit von Austauschbeziehungen abgezielt. Die Betrachtung erfolgt auf Netzwerkebene und trifft keine Aussagen zur technisch-wirtschaftlichen Realisierbarkeit.	Álvarez und Ruiz-Puente (2017)

6.3. Nutzen und Verwertung der Ergebnisse

Der Nutzen der Ergebnisse entspricht der Zielsetzung des Vorhabens. Die entwickelte Modellbibliothek kann zur Untersuchung verschiedener energetisch-stofflicher Kooperationen in Produktionssystemen eingesetzt werden.

Die Bibliothek enthält zum einen konfigurierbare Bausteine, die eine fallspezifische Anwendbarkeit ermöglichen und zum anderen sind Untersuchungen auf einem abstrakten Niveau (top-down) sowie Untersuchungen im Detail (bottom-up) möglich, je nach Ziel- und Wissenstand des Anwenders. Die praxisorientierte Durchführung des Projekts gewährleistet zudem, dass Modellbausteine entwickelt wurden, die praktische Relevanz haben. Weiterhin ist durch die Praxisorientierung der einzelnen Projektarbeiten sichergestellt, dass die weitere Verwertbarkeit der Modellbibliothek, aber auch der anderen Werkzeuge (z. B. RFD-IS, Kennzahlensystem) somit für die Industriepartner und die Verbundpartner (TLA, EVT und WISE) gegeben ist. Mit den zusätzlichen Werkzeugnissen ist weiterhin eine tool-unabhängige Verwertbarkeit der Projekterkenntnisse und -entwicklungen für die Industrie- und Verbundpartner sowie die Wissenschaft gegeben, da diese Erkenntnisse publiziert wurden.

Nach umfangreichen Literaturrecherchen, konnte die Relevanz der einzelnen bearbeiteten Themen bestätigt werden. Vor diesem Hintergrund trägt das Projekt ESProNet dazu bei, die bisher eher qualitativen Aussagen zur Vorteilhaftigkeit solcher Kooperationsformen mit konkreten quantitativen Messwerten und Simulationsergebnissen zu untermauern und dabei insbesondere Transparenz hinsichtlich der Potentialabschätzung zu schaffen.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten: Im Projektverlauf wurden den beteiligten Unternehmen Potentiale aufgezeigt, die Umsetzung und Anwendung der Projekthinhalte, um wirtschaftliche Effekte zu erzielen, obliegt letztendlich den Unternehmen. Weiterhin wurden im Rahmen der Projektbearbeitung mit Schwerpunkt auf der Modellierung und Simulation Verbesserungsaspekte an den Softwarebetreiber und -entwickler ESI-ITI rückgespiegelt, die in die Weiterentwicklung der Simulationsumgebung eingeflossen sind.

Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten: Die Expertise aus dem Projekt wird in den Forschungs- und Praxisprojekten der teilnehmenden Professuren weiter angewandt. Es wurde bereits ein Folgeantrag (DFG, Projektnummer 439187891) gestellt und bewilligt. Weitere Antragsstellungen in diesem Bereich werden angestrebt.

7. Veröffentlichungen

1. Maiwald, M., L. Kosmol, C. Pieper, T. Schmidt, und A. Magdanz. 'Energy Simulation in Dynamic Production Networks (ESPRONET): Simulation for Industrial Symbiosis'. In Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference (WSC), 2684–95. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2017.
2. Kosmol, Linda, und Werner Esswein. 'Capturing the Complexity of Industrial Symbiosis'. In Advances and New Trends in Environmental Informatics, edited by Hans-Joachim Bungartz, Dieter Kranzlmüller, Volker Weinberg, Jens Weismüller, and Volker Wohlgemuth, 183–97. Progress in IS. Springer International Publishing, 2018.
3. Benedict, Martin, Linda Kosmol, und Werner Esswein. 'Designing Industrial Symbiosis Platforms – from Platform Ecosystems to Industrial Ecosystems'. In Proceedings of the 22nd Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS), 26–30. Yokohama, Japan, 2018.
4. Maiwald, Martin, Linda Kosmol, Christoph Pieper, und Thorsten Schmidt. 'ESProNet: A Model Library for the Dynamic Simulation of Industrial Symbiosis'. International Journal of Modeling and Optimization 10, no. 1 (February 2020): 1–7.
5. Kosmol, L. 'Sharing Is Caring - Information and Knowledge in Industrial Symbiosis: A Systematic Review'. In 2019 IEEE 21st Conference on Business Informatics (CBI), 01:21–30. Moscow, Russia: IEEE, 2019.
6. Kosmol, Linda, und Christian Leyh. 'ICT Usage in Industrial Symbiosis: Problem Identification and Study Design'. In Proceedings of the 14th Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 18:685–92. Leipzig, Germany: IEEE, 2019.
7. Kosmol, Linda, und Lena Otto. 'Implementation Barriers of Industrial Symbiosis: A Systematic Review'. In Proceedings of the 53rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 6052–60. Maui, HI, USA, 2020.
8. Kosmol, Linda, Martin Maiwald, und Christoph Pieper. 'Mapping Energy and Material Flows for Industrial Symbiosis: RFD-IS'. In 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 98–107. Paris, France, 2020.
9. Kosmol, Linda, Martin Maiwald, Christoph Pieper, Joscha Plötz, und Thorsten Schmidt. 'An Indicator-Based Method Supporting Assessment and Decision-Making of Potential

by-Product Exchanges in Industrial Symbiosis'. *Journal of Cleaner Production* 289, 2021.

8. Literaturverzeichnis

Álvarez, Roberto; Ruiz-Puente, Carmen (2017): Development of the Tool SymbioSyS to Support the Transition Towards a Circular Economy Based on Industrial Symbiosis Strategies. In: *Waste and Biomass Valorization* 8 (5), S. 1521–1530. DOI: 10.1007/s12649-016-9748-1.

Boix, Marianne; Montastruc, Ludovic; Azzaro-Pantel, Catherine; Domenech, Serge (2015): Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks. A literature review. In: *Journal of Cleaner Production* 87, S. 303–317. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.032.

Brunner, Paul H.; Rechberger, Helmut (2016): Practical handbook of material flow analysis. In: *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, S. 1–318.

Cecelja, F.; Raafat, T.; Trokanas, N.; Innes, S.; Smith, M.; Yang, A. et al. (2015): e-Symbiosis. Technology-enabled support for Industrial Symbiosis targeting Small and Medium Enterprises and innovation. In: *Journal of Cleaner Production* 98, S. 336–352. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.051.

Chertow, Marian; Ehrenfeld, John (2012): Organizing Self-Organizing Systems. Toward a Theory of Industrial Symbiosis. In: *Journal of Industrial Ecology* 16 (1), S. 13–27. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00450.x.

Chertow, Marian R. (2000): Industrial symbiosis. Literature and taxonomy. In: *Annual Review of Energy and the Environment* 25, S. 313–337. DOI: 10.1146/annurev.energy.25.1.313.

Chertow, Marian R.; Lombardi, D. Rachel (2005): Quantifying economic and environmental benefits of co-located firms. In: *Environmental Science & Technology* 39 (17), S. 6535–6541. DOI: 10.1021/es050050+.

Cohen-Rosenthal, Edward; Musnikow, Judy (Hg.) (2017): Eco-industrial Strategies. Unleashing Synergy between Economic Development and the Environment. First edition. London: Taylor and Francis.

Frank, Ulrich (2013): Domain-Specific Modeling Languages: Requirements Analysis and Design Guidelines. In: Iris Reinhartz-Berger, Arnon Sturm, Tony Clark, Sholom Cohen und Jorn Bettin (Hg.): *Domain Engineering*, Bd. 7. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 133–157.

Guedes, Gisele Bortolaz; Paganin, Lucas Barboza Zattar; Borsato, Milton (2017): Material Flow Mapping and Industrial Ecosystems. A Literature Structured Review. In: *Transdisciplinary Engineering: A Paradigm Shift, Advances in Transdisciplinary Engineering* (5), S. 774–781.

Guedes, Gisele Bortolaz; Paganin, Lucas Barboza Zattar; Borsato, Milton (2018): Bibliometric and Systemic Analysis on Material Flow Mapping and Industrial Ecosystems. In: *J. Ind. Intg. Mgmt.* 03 (04), S. 1850001. DOI: 10.1142/S242486221850001X.

Jacobsen, Noel Brings (2006): Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark: A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects. In: *Journal of Industrial Ecology* 10 (1-2), S. 239–255. DOI: 10.1162/108819806775545411.

Koenig, Andreas W.; Lowitt, Peter C.; Angus, Neil (2009): Eco-Industrial Park Development. A Guide for North America.

- Kosmol, Linda; Esswein, Werner (2018): Capturing the Complexity of Industrial Symbiosis. In: Hans-Joachim Bungartz, Dieter Kranzlmüller, Volker Weinberg, Jens Weismüller und Volker Wohlgemuth (Hg.): *Advances and New Trends in Environmental Informatics*, Bd. 25. Cham: Springer International Publishing (Progress in IS), S. 183–197.
- Le Tellier, Mathilde; Berrah, Lamia; Stutz, Benoit; Barnabé, Simon; Audy, Jean-François (2017): From SCM to Eco-Industrial Park Management: Modelling Eco-Industrial Park's Symbiosis with the SCOR Model. In: Hermann Lödding, Ralph Riedel, Klaus-Dieter Thoben, Gregor von Cieminski und Dimitris Kiritsis (Hg.): *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*, Bd. 514. Cham: Springer International Publishing (IFIP advances in information and communication technology), S. 467–478.
- Linstrom, Peter (1997): NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database 69.
- Lowe, E. A.; Moran, S. R.; Holmes, D. B.; Martin, S. A.; United States. Environmental Protection Agency; Indigo Development (1996): *Fieldbook for the Development of Eco-industrial Parks. Final Report: Indigo Development*. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=1BbaHAAACAAJ>.
- Maiwald, Martin; Kosmol, Linda; Pieper, Christoph; Schmidt, Thorsten (2020): ESProNet: A Model Library for the Dynamic Simulation of Industrial Symbiosis. In: *IJMO*, S. 1–7. DOI: 10.7763/IJMO.2020.V10.738.
- Maiwald, Martin; Kosmol, Linda; Pieper, Christoph; Schmidt, Thorsten; Magdanz, Alex (2018): Energy simulation in dynamic production networks (ESPRONET): Simulation for industrial symbiosis. In: *Proceedings - Winter Simulation Conference*, S. 2684–2695.
- Martin, Michael; Harris, Steve (2018): Prospecting the sustainability implications of an emerging industrial symbiosis network. In: *Resources, Conservation and Recycling* 138, S. 246–256. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.07.026.
- Martin, Michael; Svensson, Niclas; Eklund, Mats (2015): Who gets the benefits? An approach for assessing the environmental performance of industrial symbiosis. In: *Journal of Cleaner Production* 98, S. 263–271. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.06.024.
- Meyer, Urs B.; Creux, Simone Elisabeth Marie; Weber Marin Silva, Andrea Katharina (2005): *Grafische Methoden der Prozessanalyse. Für Design und Optimierung von Produktionssystemen*. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/isbn/9783446400412>.
- Michael, Judith; Mayr, Heinrich C. (2015): Creating a Domain Specific Modelling Method for Ambient Assistance. In: 2015 Fifteenth International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer). 2015 Fifteenth International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer). Colombo, Sri Lanka, 24.08.2015: IEEE, S. 119–124.
- Mintzberg, Henry (1979): *The structuring of organizations. A synthesis of the research*. London: Prentice-Hall Internat.
- Neves, Angela; Godina, Radu; G. Azevedo, Susana; Pimentel, Carina; C.O. Matias, João (2019): The Potential of Industrial Symbiosis: Case Analysis and Main Drivers and Barriers to Its Implementation. In: *Sustainability* 11 (24), S. 7095. DOI: 10.3390/su11247095.
- Schneider, Oliver; Hohenstein, Frank; Günthner, Willibald A. (2011): *Bewertung von Methoden hinsichtlich einer ganzheitlichen Prozessdarstellung*.

Tas, Nilguen; Alhilali, Smail; Meylan, Frédéric; Kechichian, Etienne; Demir, Sinem; Shin, Nah Yoon et al. (2018): A Practitioner's Handbook for Eco-Industrial Parks. Implementing the International EIP Framework. Washington, D.C.: World Bank.

Valenzuela-Venegas, Guillermo; Salgado, J. Cristian; Díaz-Alvarado, Felipe A. (2016): Sustainability indicators for the assessment of eco-industrial parks: classification and criteria for selection. In: *Journal of Cleaner Production* 133, S. 99–116. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.113.

Zhang, Chuan; Romagnoli, Alessandro; Zhou, Li; Kraft, Markus (2017): Knowledge management of eco-industrial park for efficient energy utilization through ontology-based approach. In: *Applied Energy* 204, S. 1412–1421. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.03.130.

Zheng, Kaifang; Jia, Suling (2017): Promoting the opportunity identification of industrial symbiosis. Agent-based modeling inspired by innovation diffusion theory. In: *Sustainability (Switzerland)* 9 (5). DOI: 10.3390/su9050765.