

# Ein Kennzahlensystem zur systematischen Bewertung von Simulationsergebnissen als Grundlage zur energieeffizienten Industrieclusteroptimierung

A key performance indicator system for the systematic evaluation of simulation results as a basis for energy-efficient industrial cluster optimization

**Björn Vollack**  
**Mathias Kühn**  
**Thorsten Schmidt**

*Professur für Technische Logistik  
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme  
Fakultät Maschinenwesen  
Technische Universität Dresden*

**A**ktuelle Krisen wie weltweit gestörte Lieferketten, steigende Energiepreise und nicht zuletzt der Klimawandel führen einmal mehr vor Augen, wie wichtig der effiziente Umgang mit Ressourcen und insbesondere mit Energie ist. Industrielle Symbiose (IS) verfolgt das Ziel, mithilfe energetisch-stofflicher Austauschbeziehungen innerhalb von Eco-Industrial Parks (EIP) die Ressourceneffizienz zu erhöhen und somit einen wichtigen Beitrag zur Minderung der eingangs genannten Probleme beizusteuern. In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Ansätzen, mit denen IS-Maßnahmen untersucht und optimiert werden. Diese unterscheiden sich stark hinsichtlich ihres Betrachtungsumfangs und des Detaillierungsgrades, mit dem die einzelnen Prozesse analysiert und geplant werden. Aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge innerhalb eines EIP sind Simulationen hilfreich. Diese sind jedoch meist speziell auf einen konkreten EIP zugeschnitten und lassen sich nicht ohne Weiteres auf andere EIPs anwenden. Im Rahmen aufeinanderfolgender EIP-Projekte an der TU Dresden werden deshalb Simulationsmodelle sowie eine automatisierte Optimierung der Austauschbeziehungen für die Anwendung auf unterschiedliche EIPs entwickelt. Für die Optimierung ist die Bewertung der Simulationsergebnisse unerlässlich. Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag eine Methode zu systematischen Bewertung von Simulationsläufen möglicher Konstellationen an Symbiosen vorgestellt. Hierbei werden auch unterschiedliche Betrachtungsschwerpunkte durch eine Gewichtung der Bewertungsparameter berücksichtigt.

*[Schlüsselwörter: Industrial Symbiosis, Eco-Industrial Park, Simulation, Industrieclusteroptimierung]*

**C**urrent crises such as globally disrupted supply chains, rising energy prices and, of course, climate change demonstrate once again how important it is to use resources, and energy in particular, efficiently. Industrial symbiosis (IS) aims at increasing resource efficiency by means of energy-material exchange relationships within Eco-Industrial Parks (EIP) and thus contributes to the reduction of the problems mentioned above. In the literature, there is a variety of approaches to investigate and optimize IS measures. These differ significantly in terms of their scope of consideration and the level of detail with which the individual processes are analyzed or planned. Due to the complexity of the interrelationships within an EIP, simulations are helpful. However, these are usually designed for a specific EIP and cannot be applied to other EIPs without further effort. In the context of successive EIP projects at the TU Dresden, simulation models and an automated optimization of the exchange relationships are therefore being developed for application to different EIPs. The evaluation of simulation results is essential for optimization. For this reason, this paper presents a method for the systematic evaluation of simulation runs of possible constellations of symbioses. In this context, different focus areas are also taken into consideration by weighting the evaluation parameters.

*[Keywords: Industrial Symbiosis, Eco-Industrial Park, Simulation, Industrial Cluster Optimization]*

## 1 EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund insbesondere der kurzfristig gestiegenen Energiepreise gewinnt die Energie- und Ressourceneffizienz an Bedeutung. Industrial Symbiosis (IS) ist ein Konzept zur Erhöhung der Ressourceneffizienz durch den

Austausch von Wasser, Energie, Abfällen und Nebenprodukten zwischen Unternehmen [1], [2]. Gegenwärtig sind die Gestaltung und der Betrieb von sogenannten Industrieclustern häufig nicht auf diese Austauschprozesse ausgerichtet. Das Ziel des Forschungsprojektes „Energieeffiziente Industrieclusteroptimierung“ (EnICO) ist die simulationsbasierte Optimierung von energetisch-stofflichen Austauschbeziehungen zur Gestaltung und zum Betrieb von Unternehmen eines IS-Clusters. Mithilfe eines Modellgenerators soll auf Basis einer objektorientierten und modular aufgebauten Bausteinbibliothek ein vernetztes Modell des Industrieclusters erstellt werden. In der anschließenden Optimierung mittels evolutionärer Algorithmen sollen gesamtoptimale Interaktionsbeziehungen unter Berücksichtigung diverser Zielfunktionswerte identifiziert werden. Als Grundlage der Optimierung ist zunächst eine standardisierte Bewertungsmethode der Simulationsergebnisse zu entwickeln, die unterschiedliche Gewichtungspräferenzen der Zielfunktionen des Anwenders berücksichtigt. Die Herausforderung besteht darin, die Ergebnisse dynamischer Simulationen aggregiert darzustellen und die Anwendbarkeit auf verschiedene EIP zu gewährleisten. Die Bewertungsmethode wird in diesem Beitrag vorgestellt.

## 2 STAND DER FORSCHUNG

Als Industriecluster wird in diesem Rahmen die Gruppierung mehrerer geografisch nahe beieinanderliegender Unternehmen verstanden, die in Austauschbeziehungen gemäß der IS stehen. Dies entspricht der Kernanforderung räumlicher Nähe, die CHERTOW als Grundvoraussetzung nennt, auch wenn inzwischen unternehmensinterne und überregionale Symbiosen ebenfalls Gegenstand der Forschung sind [1]. Diese Cluster werden als Eco-Industrial Park (EIP) bezeichnet [1], [3]. Das in der Literatur sehr häufig genannte Beispiel des EIP in Kalundborg, Dänemark, gilt mit dem Beginn des ersten Symbiose-Projekts als einer der ersten EIP, der mit einem konsequenten Fokus auf IS umgesetzt wurde und auch weiterhin erweitert und optimiert wird (siehe Abbildung 1). Das Konzept der IS ist dementsprechend nicht neu, wenngleich sich die Literatur erst seit den 1990er Jahren umfassend mit der Thematik befasst [1], [4].

NEVES et al. führen eine umfangreiche Auswertung von IS-Projekten durch. Dabei werden sowohl Analysen bestehender als auch in Planung befindlicher EIPs betrachtet. Der Betrachtungsumfang der Fallstudien umfasst dabei Nachhaltigkeit, Umwelteinflüsse sowie ökonomische und soziale Aspekte [5]. Dabei besteht die Problematik existierender Optimierungsansätze in der fehlenden Verknüpfung der verschiedenen Zielkriterien [6].

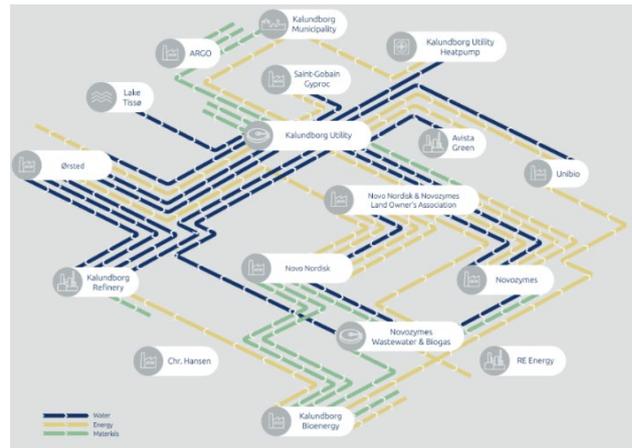


Abbildung 1. EIP Kalundborg, Dänemark [7]

Im Rahmen des Forschungsprojektes ESProNet<sup>1</sup> haben MAIWALD et al. eine Modell-Bibliothek entwickelt, mit der eine dynamische Simulation von IS möglich ist [8]. Es wird die Programmiersprache Modelica in der Simulationsumgebung SimuliaonX<sup>2</sup> genutzt. Einzelne Bausteine lassen sich zu einem Symbiose-Netz zusammenfügen und simulieren. Dabei werden insbesondere auch physikalische Größen betrachtet. Berücksichtigung finden der Austausch von Materialien, Wärme und Elektrizität. Das Tool eignet sich jedoch lediglich zur Simulation einzelner Konfigurationen. Anpassungen im Rahmen neuer Symbiose-Verknüpfungen müssen manuell eingepflegt werden. Es werden ökonomische und ökologische Potentiale analysiert. Eine automatisierte Bewertung bzw. Optimierung ist bisher nicht vorgesehen, wird von den Autoren aber als eine wichtige Weiterentwicklung ihrer Simulation angesehen. Diese Bewertungsmethode zur Ergänzung des bestehenden Simulationsmodells ist Gegenstand des vorliegenden Beitrags.

Beim Aufbau eines Kennzahlensystems gilt es die richtigen Kennzahlen auszuwählen. Zunächst muss als Ziel definiert werden, welche Informationen die Kennzahlen abbilden sollen. Die Kennzahlen sollen unterschiedliche Detailierungsgrade aufweisen und es muss eine Beschränkung auf die wichtigsten erfolgen [9]. In der Literatur gibt es eine Vielzahl an Kennzahlensystemen zu EIPs. Die Klassifizierung erfolgt dabei häufig in ökonomische, ökologische und soziale Kennzahlenarten [10] [11]. YILMAZ et al. haben im Rahmen eines EU-Projekts eine sehr umfangreiche Auflistung mit Kennzahlen erstellt. Auch sie gliedern diese grob nach den drei Kriterien, steigern dann aber deutlich den Detaillierungsgrad und gruppieren z. B. die Energieformen oder Kennzahlen zur Kreislaufwirtschaft [12].

<sup>1</sup> [www.espronet.de](http://www.espronet.de)

<sup>2</sup> <https://www.esi-group.com/products/system-simulation>

### 3 BEWERTUNGSMETHODE

Die Methode zur Bewertung der Simulationsergebnisse gliedert sich in zwei Schritte. Zunächst werden auf Basis der Simulationsergebnisse Kennzahlen berechnet. Diese werden im zweiten Schritt in einer gemeinsamen Zielfunktion kombiniert. Dabei erfolgt eine Gewichtung der Kennzahlen untereinander, um in einem späteren Schritt verschiedene Optimierungsziele darstellen zu können. Die Kennzahlen sind auf unterschiedliche EIPs anwendbar.

### 3.1 SIMULATION

In Abbildung 2 ist das einfache Beispiel eines Simulationsmodells eines EIP dargestellt. Es wird die Simulationsbibliothek von MAIWALD et al. verwendet [8]. Das Modell besteht aus vier Fabriken und einem Blockheizkraftwerk (BHKW). Materialflüsse werden schwarz, Wärmeströme rot und Elektrizität gelb dargestellt. Es existieren externe Quellen und Senken, d. h. diese Ressourcen werden von außerhalb des EIP bezogen bzw. außerhalb abgesetzt. Die hellen Punkte (hellgrau, hellrot, hellgelb) der Unternehmensbausteine aller drei Ressourcenarten stellen die Eingänge dar, die dunklen Punkte (schwarz, rot, gelb) die Ausgänge. Der Transport kann entweder über stetige Flüsse (Stetigförderer, Rohre etc.) oder unstetig (LKW) erfolgen.

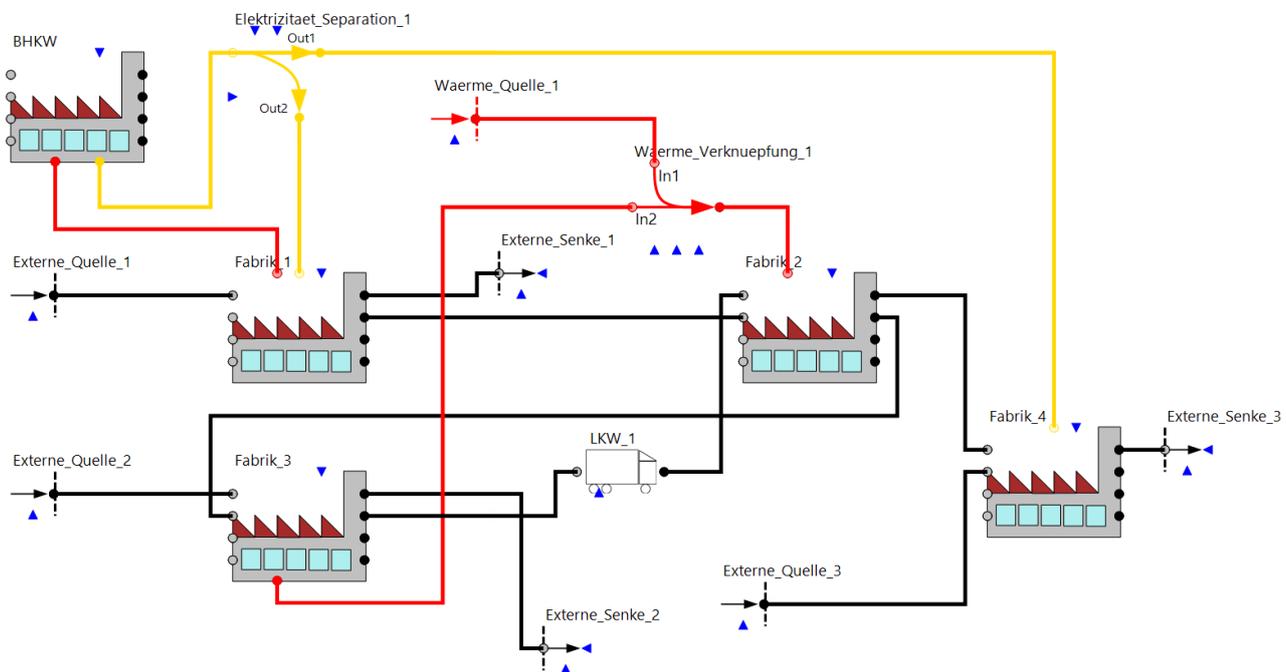


Abbildung 2. Beispielmodell SimulationX

Die Modellbibliothek bietet die Möglichkeit, weitere Bausteine, wie z. B. Lager oder Wärmetauscher, für eine realistische Abbildung der Wirklichkeit zu ergänzen. Zudem ist die Implementierung von Schichtsystemen möglich, um die entsprechenden Produktionszeiten der einzelnen Fabriken zu berücksichtigen. Dies bietet die Möglichkeit einer realitätsnahen Abbildung von EIPs.

### 3.2 ABLEITUNG DER KENNZAHLEN

Während der Simulation kann eine Vielzahl an Parametern aufgezeichnet und im Anschluss als Ergebnisdatei ausgegeben werden. Da das Ziel jedoch die Entwicklung einer auf unterschiedliche EIPs anwendbaren Methode ist, schließt das einige für einzelne EIPs spezifische Kennzahlen aus. Ein Beispiel für eine solche Kennzahl ist der Verbrauch eines konkreten Materials, da dieses mit hoher

Wahrscheinlichkeit nicht in jedem EIP vorkommt. Vielmehr muss der Materialverbrauch abstrahiert werden und beispielweise in ein Verhältnis zur Auslastung einer Fabrik gesetzt werden. Das Ziel des Kennzahlensystems ist es, unterschiedliche EIPs zu bewerten, ohne im Voraus jeweils spezifische Anpassungen durchführen zu müssen. Zudem eröffnet dies die Möglichkeit unterschiedliche EIPs miteinander zu vergleichen, z. B. im Hinblick auf Abfall- bzw. Recyclingraten. Die Auswahl der Kennzahlen für das Kennzahlensystem erfolgt anhand von drei Kriterien: Darstellbarkeit/Ableitbarkeit mithilfe der Simulation, Zugehörigkeit zu einem Optimierungsfokus sowie Eignung, um IS-Zusammenhänge darzustellen.

Die folgenden Kennzahlen lassen sich zum jetzigen Entwicklungsstand aus den Simulationsergebnissen extrahieren und für die weitere Nutzung zusammenfassen:

- Externer Ressourcenbedarf
- Ungenutzte Ressourcen
- Übertragungsverluste
- Auslastung
- Verknüpfungsanzahl
- Absatzmengen an extern

Der externe Ressourcenbedarf bezieht sich dabei auf alle Materialien sowie den Wärme- und Elektrizitätsbedarf. So reduziert sich beispielsweise der externe Wärmebedarf, wenn die auftretende Abwärme von Fabrik 3 genutzt und Fabrik 2 zur Verfügung gestellt wird, anstatt sie an die Umgebung abzugeben (vgl. Abbildung 2). Übertragungsverluste sollen minimiert werden. Dies steht in direktem Zusammenhang mit der Menge ungenutzter Ressourcen, wobei hierbei vor allem die Recyclingquote des Materialstroms gemeint ist. Übertragungsverluste treten beispielsweise bei Wärmeleitungen zwischen Unternehmen auf. Hier ist es sinnvoll, mögliche Wege kurz zu halten und bei ähnlich großen zu transportierenden Wärmemengen den räumlich nächsten Abnehmer anzuschließen. Auch wenn ein EIP im Idealfall eine übergeordnete Verwaltungs- bzw. Koordinierungsstelle besitzt, handelt jedes einzelne Unternehmen im EIP dennoch nach eigenen Zielvorgaben. Dies geht im Regelfall mit einer möglichst hohen Auslastung der Produktionskapazitäten einher. Die Verknüpfungsanzahl beschreibt die Anzahl an Verbindungen, mit denen die einzelnen Unternehmen miteinander in Verbindung stehen. Diese sollte die Anzahl an aus ökonomischer Sicht sinnvollen Austauschbeziehungen nicht überschreiten, d. h. Wärmeleitungen mit sehr geringen Übertragungswerten sind beispielsweise zu vermeiden. Die Absatzmenge an externe Abnehmer bezieht sich auf alle Ressourcenströme, die den EIP verlassen.

### 3.3 ZIELFUNKTIONEN

Tabelle 1. Zielkriterien

Kategorie	Kennzahl	Optimierungsziel
Ökologisch	Externer Ressourcenbedarf	minimieren
	Ungenutzte Ressourcen	minimieren
	Übertragungsverluste	minimieren
Ökonomisch	Auslastung	maximieren
	Verknüpfungsanzahl	minimieren
	Absatzmengen an extern	maximieren

Die in Abschnitt 3.2 genannten Kennzahlen bedingen sich teilweise gegenseitig und stehen in einem Zielkonflikt.

Es werden deshalb zunächst einzelne Zielfunktionen aufgestellt, die in einem zweiten Schritt zu einer Gesamtziel-funktion zusammengefasst werden. Das Ziel unterschiedlicher Optimierungsfokusse wird dabei durch eine Gewichtung der einzelnen Parameter vorgenommen. Tabelle 1 zeigt dabei die in Abschnitt 3.2 vorgestellten Kennzahlen. Zudem sind das Optimierungsziel, also ob die Kennzahl minimiert oder maximiert werden soll, sowie die Kategorisierung, die die beiden übergeordneten Optimierungsziele ökologisch und ökonomisch bilden, dargestellt.

Die Gewichtung erfolgt mithilfe des Analytic Hierarchy Processes (AHP) [13]. Dabei werden gemäß Tabelle 2 alle Kennzahlenpaare hinsichtlich ihrer Wichtigkeit im direkten Paarvergleich bewertet. Die Ergebnisse werden in die Paarvergleichsmatrix überführt und nach erfolgreicher Konsistenzprüfung die Gewichtungsfaktoren berechnet. In einem ersten Demonstrator gibt es neben einer individuell durchzuführenden Gewichtung zudem die Möglichkeit, voreingestellte Parameter zu übernehmen, um so zum Beispiel den Fokus eher auf eine ökonomische oder ökologische Optimierung zu legen.

Tabelle 2. Skalentabelle AHP

Grad der Wichtigkeit	Definition
1	Gleiche Bedeutung
3	Etwas größere Bedeutung
5	Deutlich größere Bedeutung
7	Sehr viel größere Bedeutung
9	Absolut dominierend
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte

Formel 1 zeigt beispielhaft den Teil der Zielfunktion, der die Maximierung der Auslastung abbildet. Dabei ist  $G$  der Gewichtungsfaktor,  $P = \{1, \dots, P\}$  die Menge der Produzenten/Unternehmen,  $T = \{1, \dots, T\}$  die Menge der betrachteten Perioden,  $h_{p,t}$  die hergestellte Menge des Hauptproduktes von Produzent  $p$  in Periode  $t$  sowie  $K_p$  die maximale Produktionskapazität für das Hauptprodukt des Produzenten  $p$ .

$$\min(Z_{Auslastung}) = \frac{G}{P} * \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{h_{p,t}}{K_p} \quad (1)$$

Die Gesamt-Zielfunktion wird dazu genutzt, den Fitnesswert für die entsprechen EIP-Konfiguration zu bestimmen. So lassen sich unterschiedliche Varianten von Austauschbeziehungen miteinander vergleichen.

## 4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorgestellte Methode konsolidiert zunächst die Ergebnisse von IS-Simulationen eines EIP. Dazu werden die

über den Zeitverlauf berechneten Zustände ausgewertet und in Kennzahlen zusammengefasst. Diese Kennzahlen werden in einer Zielfunktion kombiniert, die zur Berechnung eines Gesamt-Fitnesswertes genutzt werden kann. Dies schafft eine Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Simulationen und ist zudem auf andere EIP-Konstellationen übertragbar. Die Auswertung erfolgt dabei automatisiert. Diese Bewertung liefert die Basis für die spätere Optimierung. Ziel dieser Optimierung wird dann die Identifikation der gesamt optimalen Interaktionsbeziehungen sein. Dieser Schritt soll mithilfe evolutionärer Algorithmen erfolgen.

Weitere Entwicklungsschritte liegen auch in der Erweiterung des Simulationsmodells und der anschließenden Erweiterung der Bewertungsmethode. So ist gerade vor dem Hintergrund unterbrochener Lieferketten die Resilienz eines EIP ein wichtiger Faktor, der zunehmend an Aufmerksamkeit gewinnt. Hierbei gilt es zu bewerten, inwieweit alternative Liefermöglichkeiten vorhanden sind und in welchem Umfang Ausfälle kompensiert werden können. Des Weiteren scheint die Erweiterung um eine monetäre Komponente angebracht, da zum aktuellen Zeitpunkt lediglich die physikalischen Beziehungen betrachtet werden, ohne dass den entsprechenden Maßnahmen der Umsetzung einer Industriellen Symbiose konkrete finanzielle Aufwände zugeordnet werden. So lassen sich beispielsweise die Kosten für eine Fernwärmeleitung auf Basis der Distanz zwischen zwei Unternehmen kalkulieren. Hier ist aus Sicht der Autoren die Einbindung in eine externe Optimierungsumgebung sinnvoll, da sich diese Komponenten nur schwierig in die bestehende Modelica-Bibliothek implementieren lassen.

## 5 FÖRDERHINWEIS

Dieses Forschungsvorhaben wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft mit einer Laufzeit von September 2020 bis August 2023 gefördert (GEPRIS-Nr.: 439187891).



## LITERATUR

- [1] M. R. Chertow, "Industrial symbiosis. Literature and taxonomy. In: Annual Review of Energy and the Environment 25, S. 313–337, 2000.
- [2] FISSAC, "Fostering Industrial Symbiosis for a Sustainable Resource Intensive Industry across the extended Construction Value Chain: Was ist industrielle Symbiose?" [Online]. Verfügbar: <https://fissacproject.eu/de/was-ist-industrielle-symbiose>. [Abgerufen: 22.04.2022].
- [3] M. Martin, N. Svensson, M. Eklund, "Who gets the benefits? An approach for assessing the environmental performance of industrial symbiosis," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 98, S. 263–271, 2015.
- [4] N. B. Jacobsen, "Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark. A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects," *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 10, No. 1-2, S. 239-255, 2006.
- [5] A. Neves, R. Godina, S. G. Azevedo, J. C. Matias, "A comprehensive review of industrial symbiosis," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 247, S. 1–44, 2020.
- [6] M. Boix, L. Montastruc, C. Azzaro-Pantel, S. Domenech, "Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks: a literature review," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 87, S. 303-317, 2015.
- [7] SymbiosisCenter Denmark, "Kalundborg Symbiosis," [Online]. Verfügbar: <http://www.symbiosis.dk/en/>. [Abgerufen: 28.07.2022].
- [8] M. Maiwald, L. Kosmol, C. Pieper, T. Schmidt, "ESProNet: A Model Library for the Dynamic Simulation of Industrial Symbiosis," *International Journal of Modeling and Optimization*, Vol. 10, No. 1, S. 1-7, 2020.
- [9] W. Simon, "GABALs großer Methodenkoffer. Managementtechniken," Offenbach: GABAL Verlag, 2005.
- [10] L. Fraccascia, I. Giannoccaro, "What, where, and how measuring industrial symbiosis: A reasoned taxonomy of relevant indicators," *Resources, Conservation & Recycling*, Vol. 157, S. 1-11, 2020.
- [11] A. Lütje, V. Wohlgemuth, "Tracking Sustainability Targets with Quantitative Indicator Systems for Performance Measurement of Industrial Symbiosis

in Industrial Parks,” Administrative Sciences, Vol. 10, No. 1, Art. 3, 2020.

- [12] O. Yilmaz, E. Yontem, E. Alkaya, “Industrial Symbiosis Indicators,” Fostering Industrial Symbiosis for a Sustainable Resource Intensive Industry across the extended Construction Value Chain (FISSAC), 2016, [Online]. Verfügbar: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5ace5dfaf&appId=PPGMS>. [Abgerufen: 03.08.2022].
- [13] T. L. Saaty, “Decision making - the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP),” Journal of Systems Science and Systems Engineering, 13 (1), S. 1-35, 2004.

Address: Technische Universität Dresden, Professur für Technische Logistik, 01062 Dresden, Germany, Phone: +49 351 463-32538, Fax: +49 351 463-35499, E-Mail: [thorsten.schmidt@tu-dresden.de](mailto:thorsten.schmidt@tu-dresden.de)

---

**Björn Vollack, M.Sc.**, Research Assistant at the Chair of Logistics Engineering, TU Dresden since 2020. Between 2014 and 2020 he studied Industrial Engineering at the Leibniz University Hannover.

Address: Technische Universität Dresden, Professur für Technische Logistik, 01062 Dresden, Germany, Phone: +49 351 463-33510, Fax: +49 351 463-35499, E-Mail: [bjoern.vollack@tu-dresden.de](mailto:bjoern.vollack@tu-dresden.de)

**Dr.- Ing. Mathias Kühn**, Research Assistant at the Chair of Logistics Engineering, TU Dresden since 2014. Between 2007 and 2014 he studied Mechanical Engineering at the TU Dresden. He received his Ph.D. from the TU Dresden in 2021.

Address: Technische Universität Dresden, Professur für Technische Logistik, 01062 Dresden, Germany, Phone: +49 351 463-32112, Fax: +49 351 463-35499, E-Mail: [mathias.kuehn@tu-dresden.de](mailto:mathias.kuehn@tu-dresden.de)

**Prof. Dr.- Ing. Thorsten Schmidt**, Head of the Chair of Logistics Engineering, TU Dresden. Prof. Thorsten Schmidt is full professor at the TU Dresden and heads the Chair of Logistics Engineering at the Mechanical Engineering Faculty since 2008. He holds a diploma degree in Mechanical Engineering (TU Dortmund) and a master degree in Industrial Engineering (Georgia Institute of Technology). He received his Ph.D. from the TU Dortmund in 2001. His current research interest include energy-efficient control strategies in material flow, formal verification of control logic, power analysis of distributed and self-controlled systems, lightweight structures in material flow, and stress analysis of wire ropes and timing belts.