

Simulation energieeffizienter Produktion und Logistik

ASIM-Mitteilung AM 183

eISBN 978-3-903347-68-7 DOI 10.11128/am.183

Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik



ASIM

Arbeitsgemeinschaft
Simulation



ASIM

Arbeitsgemeinschaft
Simulation

Simulation energieeffizienter Produktion und Logistik

ASIM-Mitteilung AM 183

ISBN ebook: 978-3-903347-68-7

DOI: 10.11128/am.183

**Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren in der
Simulation in Produktion und Logistik**

Über diesen Leitfaden

Seit einigen Jahren steht die Betrachtung energetischer Zielgrößen auch bei der simulationsgestützten Planung von Produktions- und Logistiksystemen im Fokus. Aus diesem Grund hat die Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“ (SPL) der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) in der Gesellschaft für Informatik (GI) e.V. bereits im Jahr 2014 eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen, die sich mit diesem Thema beschäftigt. Der vorliegende Leitfaden möchte – unter Einbeziehung der Ergebnisse der Arbeitsgruppe – das Thema anwendungsnah diskutieren. Ausgehend von einer

kurzen Begriffseinführung werden zunächst typische Anwendungsbereiche erläutert und ergänzende Aufgaben zur energetischen Modellierung, Simulation und Bewertung anhand eines Simulationsvorgehensmodells beschrieben. Zudem werden mögliche Lösungskonzepte zur Werkzeugnutzung aufgezeigt. Verschiedene industrienah Beispiele verdeutlichen die Bandbreite der Anwendungen. Der Leitfaden schließt mit einer Diskussion der Aufwand- und Nutzenaspekte.

Autorinnen und Autoren

Antal Dér, M. Sc., Technische Universität Braunschweig

Kilian Dickel, M. Sc., Technische Universität Braunschweig

Martin Maiwald, M. Sc., LOGSOL GmbH

Dipl.-Systemwiss. Andreas Manz, SimPlan AG

Dipl.-Kfm. Carsten Pöge, Volkswagen AG

Eva Russwurm, M. Sc., Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Thiede, University of Twente

Björn Vollack, M. Sc., Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel, Universität Kassel

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren danken allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe „Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren in SPL“ innerhalb der ASIM-Fachgruppe für ihr langjähriges Engagement in der Arbeitsgruppe. Nur durch die vielen Diskussionen und gemeinsamen umfassenden Recherchen konnte die Basis für dieses Buch entstehen.

Inhalt

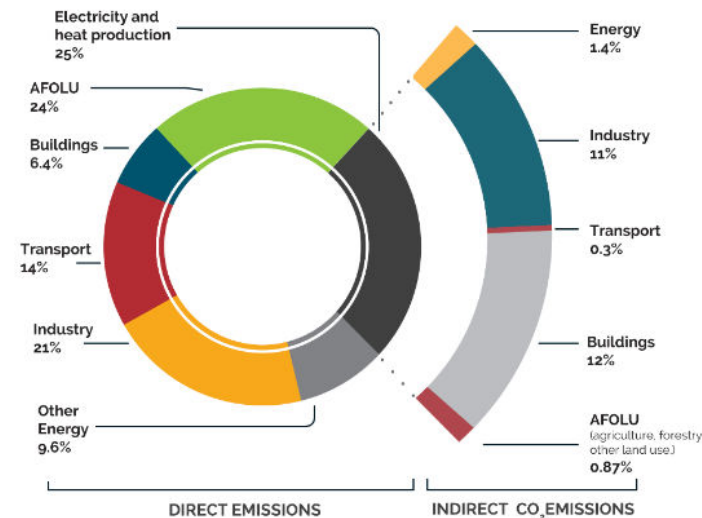
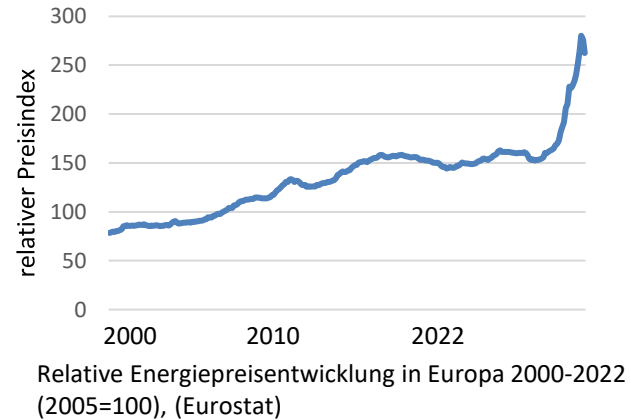
3	Einleitung
5	Begriffsklärung
7	Anwendungsbereiche und Voraussetzungen
11	Simulationsvorgehen
23	Lösungskonzepte zur Werkzeugnutzung
27	Anwendungsbeispiele
43	Aufwand und Nutzen
45	Literatur

Einleitung

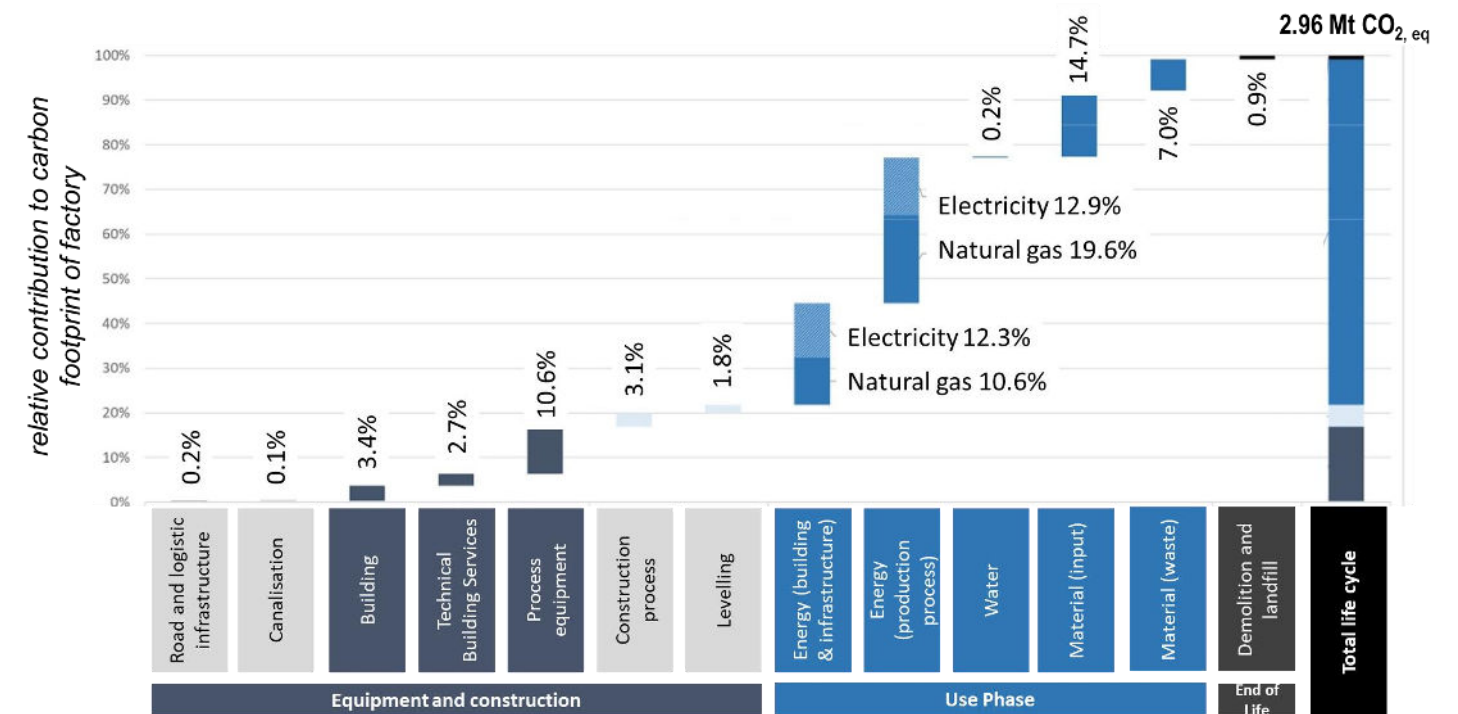
Relevanz des Themas Energie und Simulation

Industrielle Wertschöpfungsketten sind insgesamt (direkt und indirekt) für ca. ein Drittel der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Der überwiegende Anteil hierfür begründet sich im hohen Energiebedarf und der damit notwendigen Erzeugung. Auch aus Sicht des CO₂-Fußabdruckes einer einzelnen Fabrik spielt der Energiebedarf mit einem Anteil von 50-60 % eine entscheidende Rolle. Aber auch aus ökonomischer Sicht ist das Thema Energie von wachsender Bedeutung – die Energiepreise sind in den letzten Jahren stark gestiegen und stellen insbesondere energieintensive Branchen vor große Herausforderungen. Der hohe Anteil der Industrie am Energiebedarf ist nicht zuletzt auch aus Sicht der Versorgungssicherheit von strategischer Relevanz. In Zeiten kritischer Abhängigkeit von (fossilen) Energieträgern sowie wachsender Anteile volatiler erneuerbarer Energie (z. B. Wind und Sonne) ist die Berücksichtigung von industriellen Energieeffizienz- und Energieflexibilitätpotenzialen eine wichtige Betrachtungsgröße.

Bei Planung und Betrieb von Produktionssystemen und Fabriken ist die Nutzung von Simulationen etabliert, die sich ursprünglich aber auf die Berücksichtigung von Materialflüssen und deren Auswirkungen auf z. B. Durchlaufzeiten oder Auslastungen fokussieren. Die Integration von energetischen Einflussfaktoren in die dynamische Simulation ist somit ein vielversprechender Ansatz.



Zusammensetzung globaler Treibhausgasemissionen (IPCC 2014)



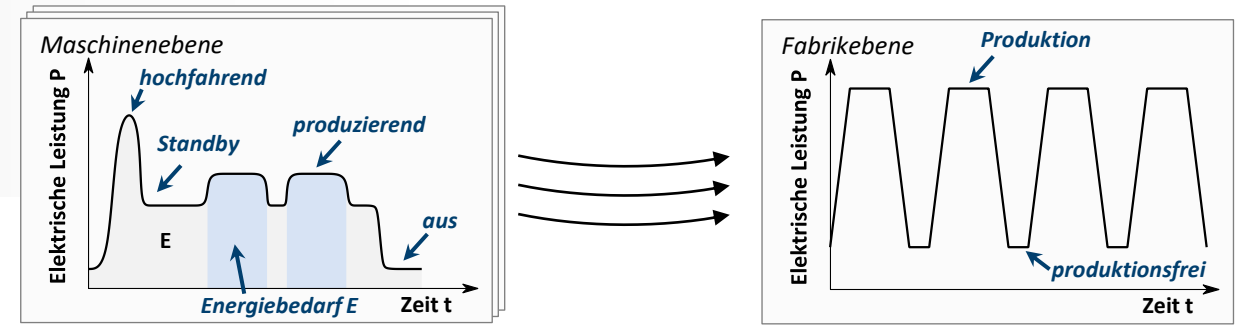
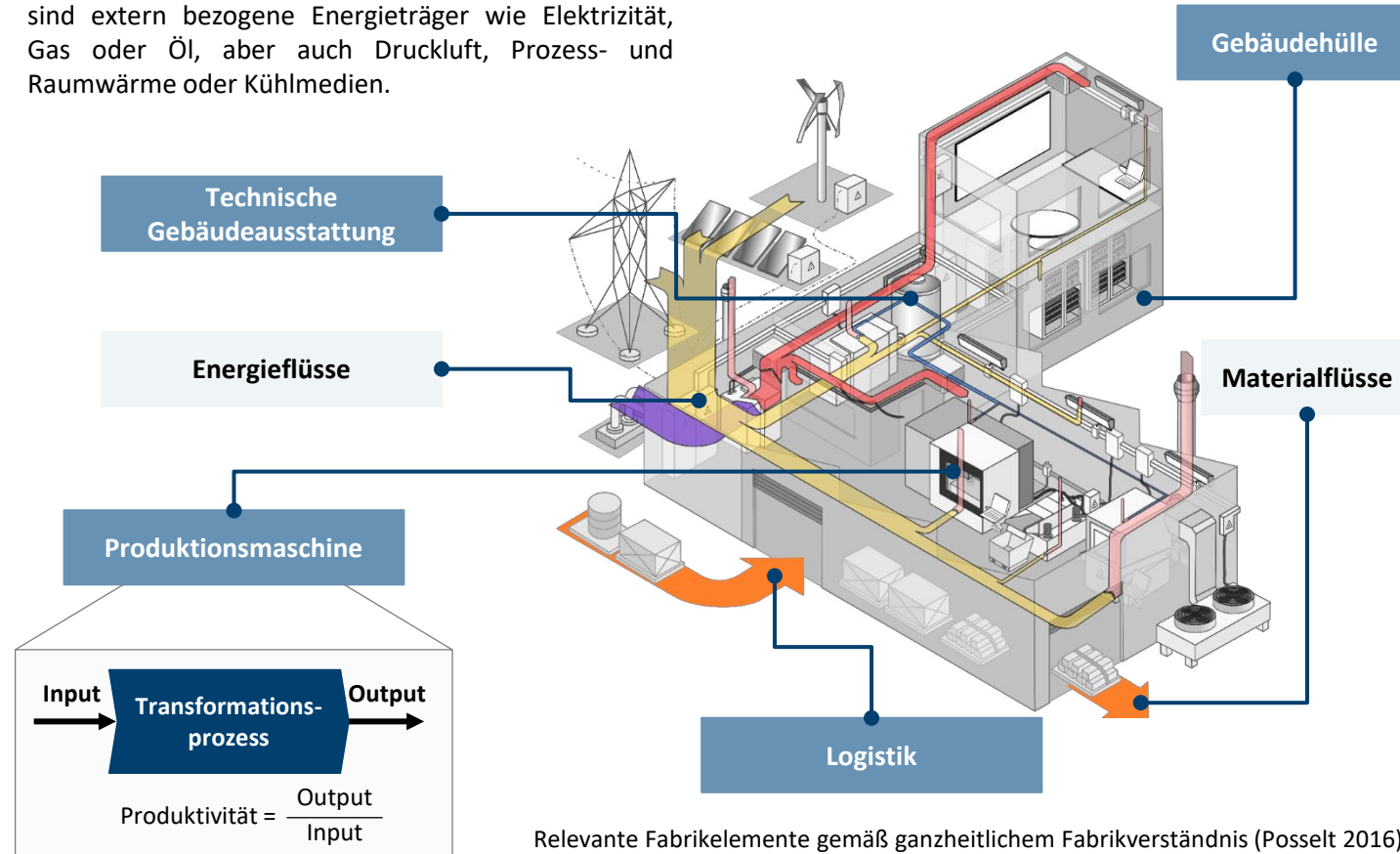
Lebenszyklusbezogener CO₂-Fußabdruck einer Automobilfabrik über 30 Jahre, Energiebedarf in Nutzungsphase mit größtem Anteil (Gebler et al. 2020)

Begriffsklärung

Ganzheitliches Fabrikverständnis

Wesentliche Teilsysteme einer Fabrik sind die Produktion, Logistik, technische Gebäudeausstattung sowie die Gebäudehülle. Hierbei spielen verschiedene (interne und externe) Energieflüsse und deren Wechselwirkungen eine entscheidende Rolle. Beispiele sind extern bezogene Energieträger wie Elektrizität, Gas oder Öl, aber auch Druckluft, Prozess- und Raumwärme oder Kühlmedien.

Aufgrund der Vielzahl an Fabrikelementen und deren Wechselwirkungen zueinander ist es praktikabel, ein Fabriksystem auf mehreren Ebenen zu beschreiben: Prozess- oder Maschinenebene, Prozessketten- oder Bereichsebene und Fabrikebene.



Entstehung und Aggregation von Lastkurven

Energiebedarf auf Maschinenebene

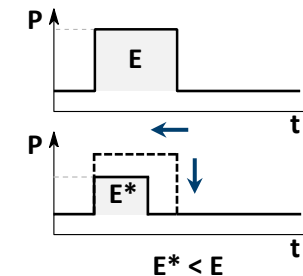
Leistungsbedarf und zugehöriger Energiebedarf einer Maschine sind dynamisch abhängig vom aktuellen Betriebszustand und ergeben charakteristische Lastkurven über die Zeit.

Energiebedarf auf Fabrikebene

Der aggregierte Energiebedarf einer Fabrik entsteht aus dem Zusammenspiel und den dynamischen Wechselwirkungen der Teilsysteme. Dabei addieren sich die Energiebedarfe aller Einzelverbraucher und ergeben den Gesamtenergiebedarf der Fabrik.

Energie und Leistung

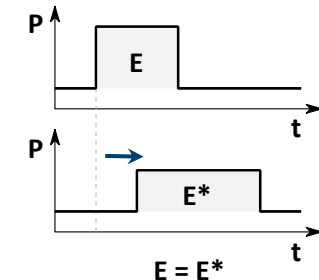
Der Energiebedarf eines Verbrauchers errechnet sich aus dem Produkt der energetischen Leistung (z. B. in Kilowatt) und der Zeit.



Energieeffizienz

Die Energieeffizienz beschreibt das Verhältnis der eingesetzten Energie bezogen auf den erzeugten Output. Die Erhöhung der Energieeffizienz kann bei gleichbleibendem Output durch die Reduzierung des Leistungsbedarfs, der Zeit oder durch eine Kombination von beiden erreicht werden.

$$E = P \cdot t$$



Energieflexibilität

Energieflexibilität beschreibt die Fähigkeit der Fabrik, Energiebedarfe zeitlich zu verschieben. Dabei steht die Reduzierung der Gesamtenergiemenge nicht im Vordergrund.

Anwendungsbereiche und Voraussetzungen

Die Anwendungsbereiche der Simulation energetischer Einflussfaktoren finden sich in einem breiten Spektrum an Branchen, Fertigungsstrukturen und Projektphasen, denen auf den ersten Blick lediglich die Wichtigkeit des Faktors Energie gemein ist.

Die Arbeitsgruppe hat eine Vielzahl veröffentlichter Simulationsstudien gesichtet und klassifiziert, bei denen energetische Einflussfaktoren Berücksichtigung finden.

Die Klassifizierung wurde in 11 Dimensionen vorgenommen, von denen einige Aufschluss über die Anwendungsbereiche geben, u. a. die Stufe der Wertschöpfungskette und die Branche.

Die Schwerpunkte, die sich in den Simulationsstudien zeigen, sind hier in Wortwolken dargestellt. Die Schriftgröße eines Stichwortes korreliert mit der Vorkommenshäufigkeit.



Wortwolke zur Dimension „Stufe der Wertschöpfungskette“



Wortwolke zur Dimension „Branche“

Wird den Schwerpunkten dieser Kategorien gefolgt und werden noch weitere Kategorien wie Fertigungsstruktur und Fertigungsart hinzugenommen, dann sind folgende Beispiele typische Anwendungsfälle:

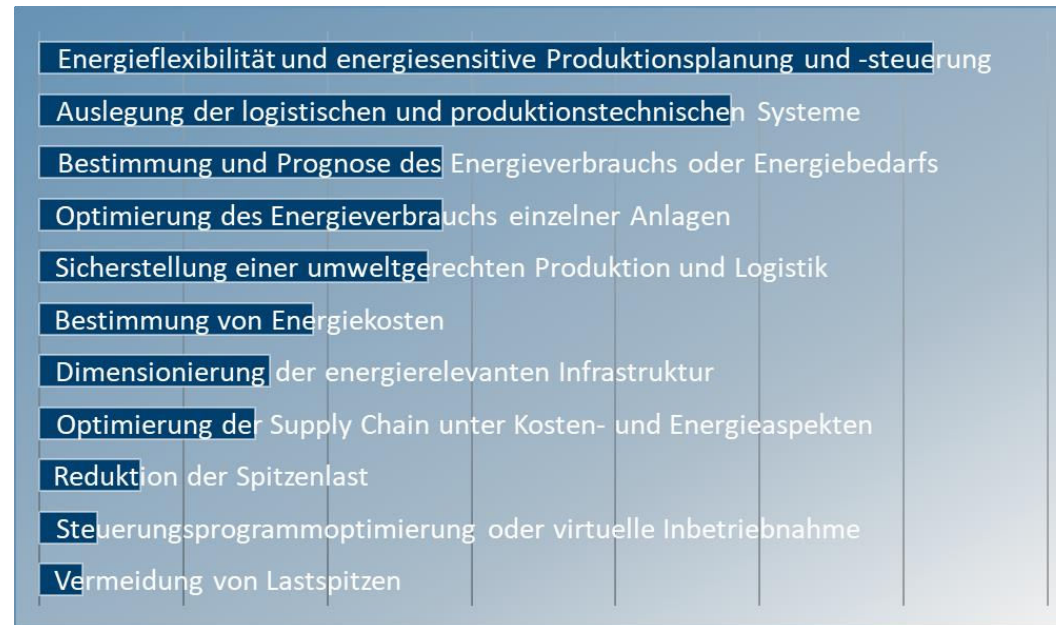
Die Simulation des Produktionsprozesses eines Zulieferteils für die Automobilindustrie, bei der der Energieverbrauch des Produktionssystems berücksichtigt wird.

Die Simulation der Fertigungsprozesse in einem Stahlwerk mit der Zielstellung, die Produktionsplanung energieeffizienter zu gestalten.

Die Simulation und Optimierung von Lebensmitteldistributionsketten unter Berücksichtigung der CO₂-Emissionen als zusätzliches Bewertungskriterium.

Anwendungsbereiche und Voraussetzungen

Welche Fragestellungen bei Simulationen unter Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren beantwortet werden, lässt sich an der Dimension „Einsatzziel“ ablesen, die ebenfalls für die Simulationsstudien ausgewertet wurde. Es zeigen sich folgende Schwerpunkte, die unten mit Beispielen verdeutlicht werden:



Relative Vorkommenshäufigkeit in der Dimension „Einsatzziel“

Energieflexibilität und energiesensitive Produktionsplanung und -steuerung:

- Wie kann die Auftragsreihenfolge einer Produktion in Bezug auf den Energieverbrauch optimiert werden, ohne dabei Durchsatzverluste in Kauf zu nehmen?
- Wie kann die Produktion flexibel auf die Energiebereitstellung durch erneuerbare Energien reagieren?

Auslegung der logistischen und produktionstechnischen Systeme:

- Welche zusätzlichen Pufferkapazitäten sind vorzuhalten, um an Anlagen energieeffizientere Standby-Steuerungen zu verwirklichen?

Bestimmung und Prognose des Energieverbrauchs oder Energiebedarfs:

- Welche Energiebedarfsspitzen entstehen bei unterschiedlichen Produktionsprogrammen und Steuerungsvarianten einer Anlage?

Optimierung des Energieverbrauchs einzelner Anlagen:

- Welche Energieeinsparung ist durch eine bestimmte Abschaltstrategie zu erzielen?

Voraussetzungen für die energetische Simulation

Wie bei der Durchführung von Simulationsprojekten allgemein, so muss auch bei der Berücksichtigung energetischer Aspekte geklärt werden, ob Simulationswürdigkeit – die Problemstellung erfüllt bestimmte Kriterien, sodass Simulation die zweckmäßige Problemlösungsmethode ist – und Simulationsfähigkeit – die notwendigen Ressourcen und Informationen zur Durchführung einer Simulation sind vorhanden – gegeben sind. Die genannten Punkte gelten zusätzlich zu den allgemeinen Kriterien für Simulationsprojekte (vgl. VDI 3633 Blatt 1 2014):

Simulationswürdigkeit

- Energie hat relevante ökonomische und ökologische Auswirkungen, sodass ein angemessenes Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Berücksichtigung energetischer Faktoren gegeben ist.
- Der Energiebedarf unterliegt einer zeitlichen Dynamik und ist durch Maßnahmen beeinflussbar, die simuliert werden können.
- Es steht keine geeignetere Methode zur Verfügung, um die energiebezogenen Fragestellungen mit hinreichender Genauigkeit zu beantworten, z. B. analytische Methoden.

Simulationsfähigkeit

- Energetische Daten in hinreichender Genauigkeit sind vorhanden bzw. können erhoben werden.
- Das energetische Verhalten des Systems kann so analytisch erfasst, beschrieben und ggf. in seiner Komplexität reduziert werden, dass es in einem Simulationswerkzeug abbildbar ist.
- Es stehen geeignete Simulationswerkzeuge zur Verfügung, um die energetischen Einflüsse angemessen abzubilden.
- Die nötigen Kenntnisse für die zusätzliche energetische Betrachtung sind bei den Projektbeteiligten vorhanden.

Simulationsvorgehen

Allgemeines

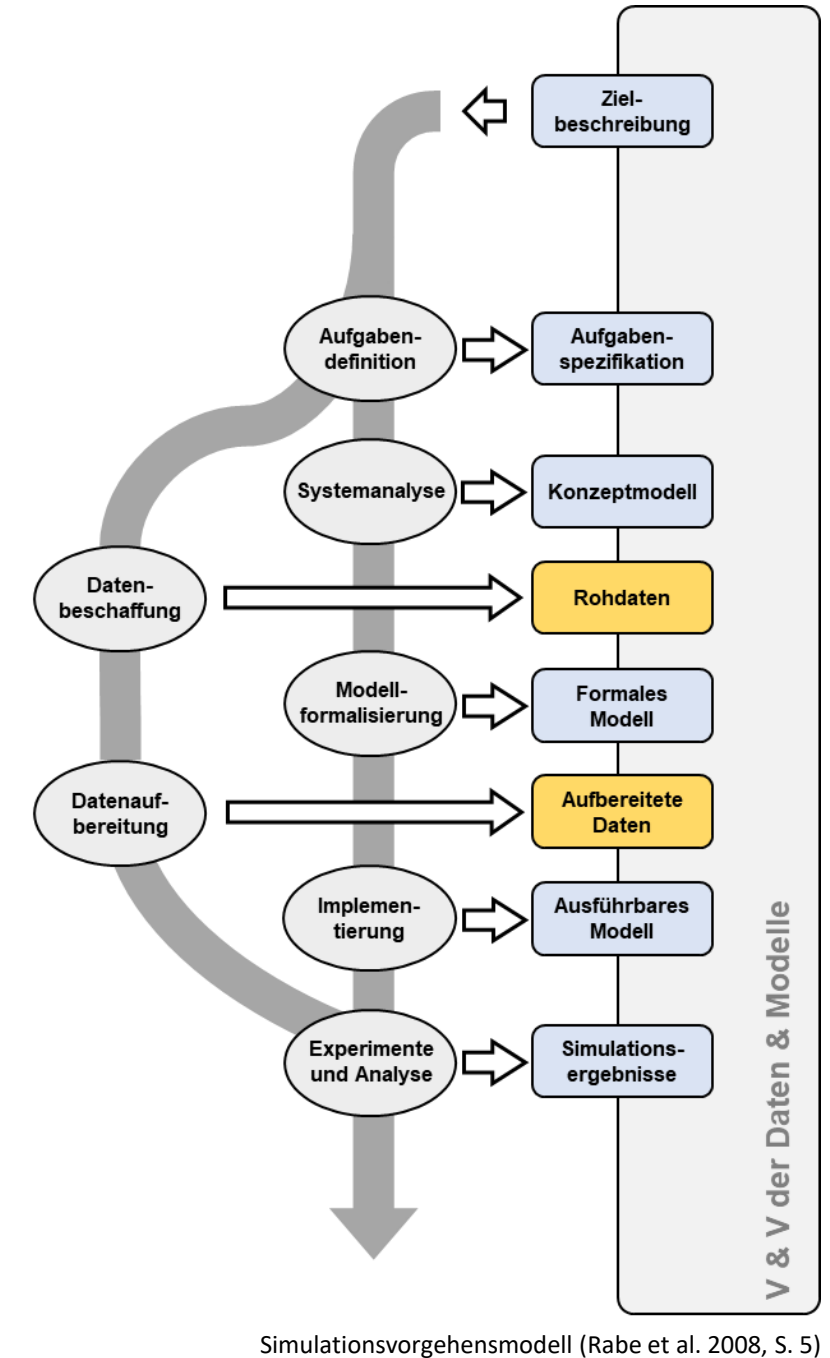
Die Durchführung von Simulationsstudien wird in der ereignisdiskreten Simulation über sogenannte Simulationsvorgehensmodelle unterstützt.

Ein in der Simulationsfachgemeinschaft etabliertes Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien ist das Vorgehen nach Rabe et al. (2008). Dieses umfasst ausgehend von einer Zielbeschreibung und einer Phase zur Aufgabendefinition mehrere Phasen, die der Modellbildung zuzuordnen sind (Systemanalyse, Modellformalisierung und Implementierung) sowie Phasen, die Aufgaben der Datenbeschaffung und -aufbereitung beinhalten. Die Phasenstränge zur Modellbildung sowie zur Datengewinnung verlaufen parallel, da sie in Projekten in der Regel zeitlich parallelisiert und relativ unabhängig voneinander bearbeitet werden können; zudem unterliegen sie oftmals unterschiedlichen Verantwortlichkeiten. Das Vorgehen schließt mit der Phase Experimente und Analyse ab.



Die einzelnen Phasen innerhalb des Vorgehensmodells werden im Folgenden kurz erläutert; Aspekte der Verifikation und Validierung (V&V) werden in den jeweiligen Phasen kurz angesprochen, aber nicht vertiefend behandelt (zu V&V-Kriterien siehe Rabe et al. 2008). Vielmehr wird die Notwendigkeit von Anpassungen in den einzelnen Phasen vor dem Hintergrund der Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik diskutiert.

Die ovalen Elemente stellen die Phasen, die rechteckigen Kästchen die jeweiligen Ergebnisse der Phasen dar; alle Phasenergebnisse unterliegen der V&V. Bei der Durchführung einer Simulationsstudie werden die Phasen sukzessive durchlaufen und können in Abhängigkeit von der Qualität der jeweiligen Phasenergebnisse wiederholt werden.



Zielbeschreibung und Aufgabendefinition

Ausgangspunkt jeder Simulationsstudie ist die **Zielbeschreibung**, in der das Unternehmen bereits vor Projektbeginn festlegt, wie die Ausgangssituation ist, was in welchem Umfang und mit welchen Untersuchungszielen zu simulieren ist, was der Projektumfang ist sowie welche Rahmenbedingungen einzuhalten sind. Dies kann in Form eines Lastenheftes oder einer Ausschreibung erfolgen oder auch mit dem noch zu beauftragenden Unternehmen gemeinsam erarbeitet werden. Normalerweise werden die Inhalte der Zielbeschreibung mit einem Angebot des potenziellen Auftragnehmers fixiert (zur Angebotserstellung für Simulationsstudien vgl. Wenzel et al. 2008, S. 69-87). Im Rahmen der V&V bezieht sich die Prüfung der zur Zielbeschreibung erstellten Dokumente auf Vollständigkeit, Konsistenz, Genauigkeit, Aktualität, Plausibilität und Verständlichkeit.

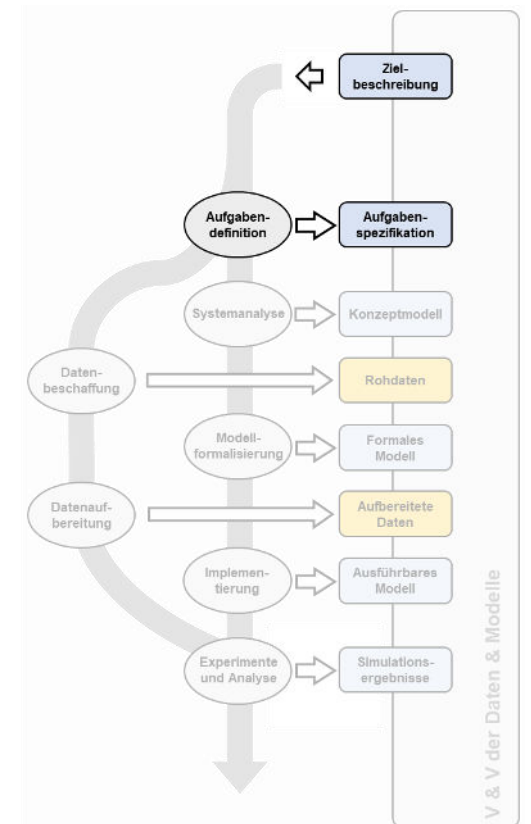
In der **Aufgabendefinition** als erste Phase des Vorgehensmodells wird die sogenannte Aufgabenspezifikation erstellt, die das zu lösende Problem, die einzusetzenden Mittel zur Lösung des Problems und den Zeit- und Kostenrahmen beschreibt. Damit werden in der Aufgabendefinition die Inhalte aus Zielbeschreibung, möglichen Lastenheften sowie Angeboten konkretisiert und für alle Beteiligten ein gemeinsames Verständnis über die Lösbarkeit der Aufgabe und das Vorgehen zu ihrer Lösung geschaffen. Die Aufgaben der V&V beziehen sich daher auch auf die Abstimmung der Inhalte mit dem Auftraggeber, auch in Bezug auf die Zielbeschreibung, sowie die Überprüfung der Aufgabenspezifikation auf Vollständigkeit, Konsistenz, Genauigkeit, Aktualität, Plausibilität und Verständlichkeit, aber auch auf Eignung des festgelegten Vorgehens im Sinne der Angemessenheit für die konkrete Aufgabenstellung, der Machbarkeit der Simulationsstudie selbst sowie der Datenverfügbarkeit.

Energiespezifische Aspekte

In der Zielbeschreibung und in der Aufgabenspezifikation werden der Untersuchungsgegenstand erläutert und die zu ermittelnden Kennzahlen festgelegt. Unter energetischen Gesichtspunkten können z. B. Energieverbrauch, aber auch Emissionen oder Energiekosten relevant sein. Spezifische Einsatzziele mit energetischem Kontext (Wenzel et al. 2018, S. 3278) sind beispielsweise

- die Auswahl und Dimensionierung der energierelevanten Infrastruktur,
- die energieeffiziente Auslegung logistischer und produktionstechnischer Systeme,
- die lokale Verbesserung des Energieverbrauchs von einzelnen Anlagen,
- die Verringerung von Lastspitzen,
- die Reduktion der Spitzenlast,
- die Bestimmung und Prognose des Energieverbrauchs bzw. -bedarfs,
- die Sicherstellung einer umweltgerechten Produktion und Logistik,
- die Schaffung von Energieflexibilität in Produktionssystemen und
- eine energiesensitive Produktionsplanung.

Einsatzziele und zu ermittelnde Kennzahlen bestimmen die Art der Simulation, die Notwendigkeit der Vernetzung von ereignisdiskreten und kontinuierlichen Simulationen sowie Art und Umfang der Ermittlung von energiespezifischen Daten. So ist z. B. zu klären, ob komplexe Zusammenhänge zwischen Systemzuständen und Energieflüssen bestehen oder sich Materialflusssteuerung und Energiekennzahlen gegenseitig beeinflussen (vgl. Stoldt und Putz 2017, S. 125). Bei komplexen und dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen sind für die Erstellung zu koppelnder Modelle auch Restriktionen im Laufzeitverhalten oder in Bezug auf Datenaustauschintervalle sowie die Frage nach dem Vorhandensein der Daten für die Modellierung der Energieflüsse abzustimmen (vgl. Peter 2019).



Systemanalyse

Basierend auf der Aufgabenspezifikation wird in der **Systemanalyse** für ein vorliegendes reales oder geplantes System ein **Konzeptmodell** erstellt. Mit diesem Konzeptmodell vereinbaren alle an einer Simulationsstudie beteiligten Personen, wie die in der Aufgabenspezifikation beschriebene Aufgabe konkret mittels eines Simulationsmodells gelöst werden soll. Für das zu modellierende System werden die Systemgrenzen, die zu betrachtenden Eingabe- und Ausgabegrößen sowie die relevanten internen Systemzustände festgelegt, die relevanten Systemelemente und die Beziehungen zwischen diesen bestimmt, ggf. das System in Teilsysteme zerlegt und die zu erfassenden Informationen und Daten vereinbart. Damit werden mit dem Konzeptmodell der für die Aufgabenstellung notwendige Umfang und Detaillierungsgrad geklärt (vgl. Rabe et al. 2008).

Die Erstellung des Konzeptmodells als erster Schritt der Modellierungsphasen ist von hoher Relevanz, da mit dem Konzeptmodell entschieden wird, was und was nicht in das spätere Simulationsmodell einfließt. Das Konzeptmodell wird simulationswerkzeugunabhängig beschrieben.

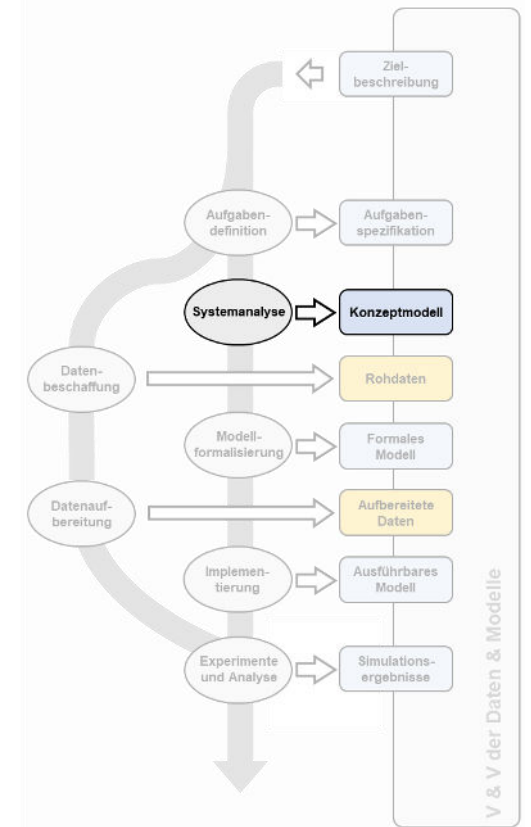


Die Systemanalyse steht in enger Beziehung zu der zumeist parallel stattfindenden Datenbeschaffung und -aufbereitung, da Entscheidungen zum Umfang und Detaillierungsgrad des Konzeptmodells Art und Umfang der notwendigen Daten beeinflussen können. Daher sind Abweichungen von der Aufgabenspezifikation zu dokumentieren und mit den an der Simulationsstudie beteiligten Personen abzustimmen.

Energiespezifische Aspekte

Bei der Betrachtung energetischer Aspekte müssen Umfang und Detaillierungsgrad auch für die Abbildung der energetischen Parameter und des ggf. separaten Energiemodells festgelegt werden. Zudem sollte im Rahmen der Systemanalyse entschieden werden, in welcher Detaillierung eine dynamische Betrachtung der energetischen Abläufe und ihrer Wechselwirkungen mit dem Materialfluss- bzw. Produktionsmodell notwendig ist, um die in der Aufgabenspezifikation formulierten Ziele zu erreichen. Ggf. sind zwei unterschiedliche Konzeptteilmodelle zu entwerfen, die in Abhängigkeit von der für die Zielstellung erforderlichen Abbildungsgenauigkeit auch unterschiedliche Detaillierungsgrade besitzen können. Bei getrennten Modellen sind ggf. kopplungsrelevante Ereignisse zu spezifizieren, und es ist festzulegen, wie sich die Modelle untereinander beeinflussen (vgl. Peter 2019).

In der V&V wird neben der intrinsischen Prüfung des Konzeptmodells bzw. der Konzeptteilmodelle auf Konsistenz, Plausibilität, Vollständigkeit und Verständlichkeit vor allem bewertet, ob die in der Aufgabenspezifikation formulierten Vorgaben hinreichend umgesetzt wurden. Zudem ist zu prüfen, inwieweit das Konzeptmodell bzw. die Konzeptteilmodelle für den formulierten Zweck geeignet sind und ob das reale (oder geplante) System hinreichend abgebildet wird.



Modellformalisierung und -implementierung

Das Konzeptmodell wird in der **Modellformalisierung** in ein sogenanntes formales Modell umgesetzt. Dieses Modell ist die Grundlage der dann folgenden **Implementierung** des ausführbaren Simulationsmodells unter Nutzung eines Simulationswerkzeugs. Inwieweit eine vollständige Formalisierung des Konzeptmodells notwendig ist, hängt vom Anwendungsfall ab. Häufig werden bereits im Konzeptmodell einzelne Aspekte (z. B. Strategien) formal beschrieben, sodass die Übergänge zwischen dem Konzeptmodell und dem formalen Modell im Sinne eines formalen Entwurfs fließend sein können. Mit dem formalen Modell liegt somit eine (semi-)formale Beschreibung (beispielsweise in UML – Unified Modeling Language) darüber vor, welche Aspekte wie in der Implementierungsphase im Simulationsmodell abzubilden sind. In diesem Zusammenhang sind beispielsweise komplexe Steuerungsalgorithmen, notwendige Datenstrukturen oder auch spezifische Auswertemechanismen zu beschreiben.

Werden in der Phase der Formalisierung ergänzende Annahmen und Vereinfachungen getroffen, sind diese zu dokumentieren, damit für alle am Projekt beteiligten Personen ein einheitliches Verständnis zu dem zu erstellenden Simulationsmodell vorliegt. Die konkrete Umsetzung des Simulationsmodells wird durch das Modellierungskonzept und die Beschreibungsmittel des zu verwendenden Simulationswerkzeugs geprägt. Möglicherweise ist die mit dem formalen Modell vorliegende Modellbeschreibung an das Modellierungskonzept des Simulationswerkzeugs anzupassen, bevor eine Implementierung des formalen Modells unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Simulationswerkzeugs erfolgen kann (vgl. Rabe et al. 2008).

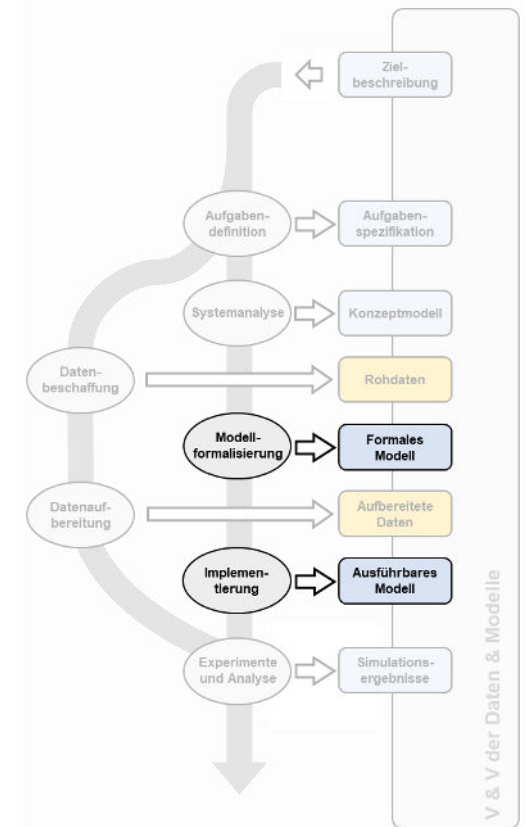


In Analogie zur V&V des Konzeptmodells erfolgt die intrinsische Prüfung der erarbeiteten Modelle auf Konsistenz, Plausibilität, Vollständigkeit und Verständlichkeit. Zudem wird überprüft, ob die in den vorherigen Phasen formulierten Vorgaben berücksichtigt wurden. Die Gültigkeit der Modelle für die Zielbeschreibung wird über die Prüfung der hinreichenden Abbildung des Systems für den formulierten Zweck festgestellt. Eine Modellabnahme durch den Auftraggeber am Ende der Modellimplementierung stellt sicher, dass alle an der Simulationsstudie beteiligten Personen das Modell für die Experimentphase als valide ansehen.

Energiespezifische Aspekte

Energetische Aspekte können als Parameter in einem Produktions- oder Logistikmodell abgebildet werden. In diesem Fall ist keine Erweiterung der Modellformalisierung um energetische Aspekte erforderlich; die Implementierung der energetischen Aspekte erfolgt durch Parametrisierung. Werden die energetischen Aspekte nicht als Parameter sondern in einem von dem Produktions- oder Logistikmodell getrennten Energieflussmodell abgebildet, sind bei der Modellformalisierung auch die Regeln für die Modellkopplung zu formalisieren und ggf. die für die energetischen Modelle relevanten (Differenzial-)Gleichungen zu beschreiben. Für die Modellkopplung sind zudem die Zeitsynchronisation, das Datenaustauschintervall sowie der Datenaustausch zwischen den Modellen formal zu beschreiben. Modellübergreifende Steuerungsstrategien sind ebenfalls zu formalisieren. In der Implementierungsphase ist im Fall von mindestens zwei Modellen die Umsetzung dieser Modelle in beispielsweise ereignisdiskreten und kontinuierlichen Simulationswerkzeugen sowie die Implementierung der Kopplung zu berücksichtigen (vgl. auch Peter 2019).

Bei gekoppelten Modellen müssen in der V&V nicht nur die Modelle überprüft, sondern auch die Modellkopplung selbst einer V&V unterzogen werden. Hierbei ist z. B. zu prüfen, ob das Datenformat von allen Modellen lesbar und der Datenaustausch zwischen den Modellen konsistent und vollständig ist sowie ob die jeweils richtige und aktuell gültige Modellversion für die Kopplung verwendet wird.



Datenbeschaffung und -aufbereitung

Parallel zum Modellbildungsprozess werden die **Datenbeschaffung** und **Datenaufbereitung** durchgeführt. Während bei der Datenbeschaffung Rohdaten (z. B. aus Planungsdaten oder aus Vergangenheitsdaten der Produktion) ermittelt werden, sind in der Datenaufbereitung diese Rohdaten für die Verwendung in dem ausführbaren Simulationsmodell gezielt zu filtern, zu strukturieren und zu transformieren. Ggf. werden auch statistische Verteilungen aus den Rohdaten zur Verwendung im ausführbaren Modell generiert. Sollte eine hinreichende und zuverlässige Datenbeschaffung entsprechend der Aufgabenspezifikation nicht umsetzbar sein, kann dies das Konzeptmodell beeinflussen. Nach erfolgreicher Datenbeschaffung und -aufbereitung können die Daten im Simulationsmodell für die Experimentphase verwendet werden (vgl. Rabe et al. 2008).

Die zu ermittelnden Daten beziehen sich laut VDI 3633, Blatt 1 (2014) auf

- Systemlastdaten (wie Produktionsprogramme, Arbeitspläne oder Stücklisten),
- organisatorische Daten (wie Abläufe, Strategien, Ressourcenzuordnungen oder Schichtmodelle) sowie
- technische Daten (wie Layoutdaten, technische Leistungsdaten oder Stördaten).

Die Daten können sich auf bestimmte Zeiträume oder Produkte beziehen (vgl. VDI 3633 Blatt 1 2014).

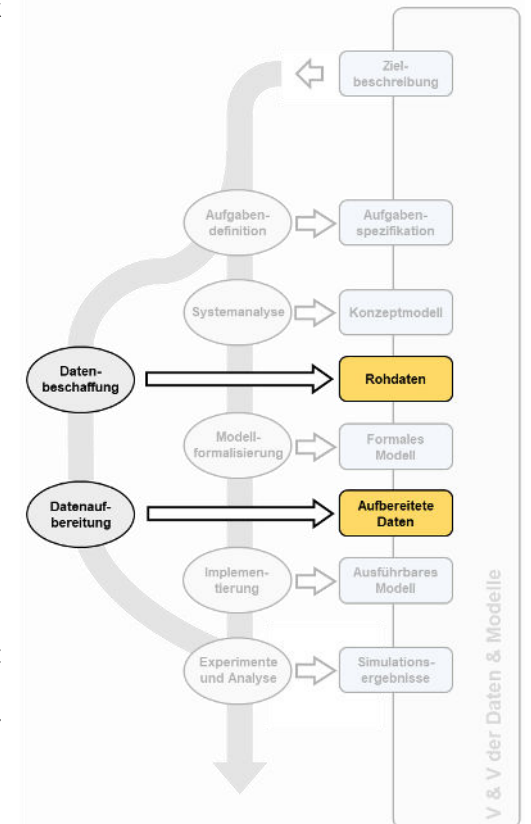
Im Rahmen der V&V werden die Daten selbst im Hinblick auf Vollständigkeit, Plausibilität und Konsistenz geprüft. Damit wird sichergestellt, dass die Daten in einer hinreichenden Qualität vorliegen. Zudem müssen die erhobenen Daten in Bezug auf ihre Eignung für die gegebene Aufgabenstellung, aber auch in Bezug auf die Plausibilität, Vollständigkeit, Konsistenz, Genauigkeit und Aktualität zu den während des Modellbildungsprozesses entstandenen Modellen geprüft werden.



Energiespezifische Aspekte

Um Energieflüsse modellieren zu können, sind neben den Daten für die Produktions- oder Logistikmodelle zusätzliche Daten erforderlich. Diese können sich auf spezifische energiebezogene Angaben zu Anlagen- und Transportsystemen, Emissionsäquivalente, energierelevante Aspekte für Aufträge oder Produkte, die Infrastruktur des Energieträgers, Energiepreis(modell)e oder physikalische Verhaltensmodelle beziehen. In Abhängigkeit davon, welche Daten relevant sind und ob diese im Hinblick auf bestimmte System-/Anlagenzustände und/oder Produktvarianten erfasst werden müssen, können diese selbst erhoben oder auch bei einem Energieversorger angefragt werden.

Bei der V&V von Daten für gekoppelte Modelle muss zudem geprüft werden, ob die zeitliche Auflösung der Daten für die Modelle hinreichend übereinstimmend ist und ob die Daten für die selben Zeiträume (vgl. Peter 2019) oder aus einem anderweitig geeigneten repräsentativen Zeitraum vorliegen.



Experimente und Analyse

Basierend auf einem validen ausführbaren Simulationsmodell und unter Nutzung der aufbereiteten Daten wird in der Phase **Experimente und Analyse** zunächst konkretisiert, welche Experimente mit dem Simulationsmodell durchgeführt werden sollen (Experimentplan). Die notwendigen Parameterkonfigurationen (Simulationsläufe) eines Experimentes (beispielsweise Grenzleistungsanalyse) sowie die Anzahl der aus statistischer Sicht erforderlichen Replikationen der zufallsabhängigen Simulationsläufe werden zwischen Simulationsfachleuten und Fachexperten gemeinsam abgestimmt. Nach der Durchführung der Experimente mit den entsprechenden Simulationsläufen liegen quantitative und qualitative Simulationsergebnisse vor. Die aus diesen Ergebnissen abzuleitenden Erkenntnisse können ggf. zu neuen Fragestellungen und damit zu weiteren Experimenten führen. Ggf. können Änderungen zurück bis zur Phase der Aufgabendefinition entstehen (vgl. auch Rabe et al. 2008).

Eine Analyse der Ergebnisse zu den Experimenten liefert auch die abschließenden Ergebnisse für die Simulationsstudie und dient damit der Lösung der eigentlichen Aufgabenstellung. Erkenntnisse aus den Experimenten können graphisch oder tabellarisch aufbereitet oder auch vergleichend bewertet werden. Grundsätzlich ist allerdings die statistische Signifikanz der Aussagen sicherzustellen (vgl. auch Rabe et al. 2008).

Die abschließende Ergebnisanalyse schafft die Basis für die Ableitung von Empfehlungen und Maßnahmen für das untersuchte System.



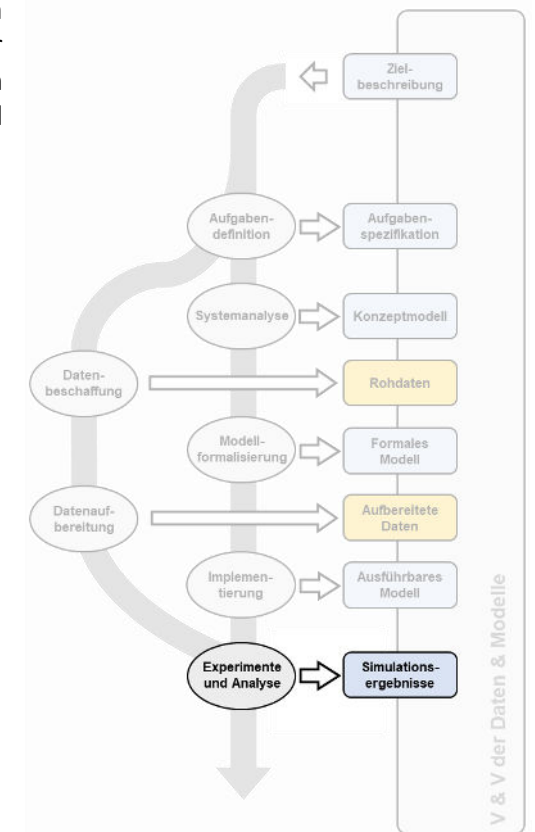
Die V&V der Experimente beinhaltet insbesondere die Überprüfung, ob die richtigen Experimente für die Aufgabenstellung durchgeführt wurden und ob die Ergebnisse hinreichend geeignet sind, die in der Zielbeschreibung und der Aufgabenspezifikation formulierten Fragen zu beantworten.

Energiespezifische Aspekte

Bei der Berücksichtigung energetischer Aspekte ändert sich das Vorgehen zur Planung und Durchführung von Experimenten nicht. Allerdings sind energetische Parameter bei der Experimentplanung entsprechend der Aufgabenstellung einzubeziehen. Liegt eine gekoppelte Simulation mit mindestens zwei Simulationsmodellen vor, sind die für die Experimente notwendigen Struktur- und Parametervariationen auch modellübergreifend konsistent durchzuführen und die Ergebnisse im vernetzten Zusammenhang aufzubereiten. Zudem ist bei der Durchführung der Experimente darauf zu achten, dass die Modelle zeitlich synchron ablaufen. Auch steigt die Komplexität der Experimente und der Aufwand zur Interpretation der Ergebnisse (vgl. auch Peter 2019).

Ergebnisse zu Simulationen mit energetischem Bezug sind beispielsweise

- Energieverbrauchsanteile (wertschöpfend und nicht wertschöpfend),
- der Energieverbrauch (absolut oder prozentual) pro Produkt, Produktvariante oder Transporteinheit,
- der Energieverbrauch (absolut oder prozentual) pro Zeiteinheit pro Anlage/Teilsystem/System,
- der Energieverbrauch nach Anlagenzuständen,
- Emissionen, Umwelteinflüsse (z. B. Temperatur) und Umweltgifte (Äquivalente), Zusammensetzung der Energieträger,
- abgeleitete Leistungskennzahlen von Anlagen/Teilsystemen/Systemen wie Spitzenlast oder gewichtete Durchschnittslast,
- die Energiekosten pro Zeit oder Bauteil je Energieart oder auch
- ein energiebezogener Wirkungs- und Versorgungsgrad.



Lösungskonzepte zur Werkzeugnutzung

Ganzheitliches Fabrikverständnis als Basis

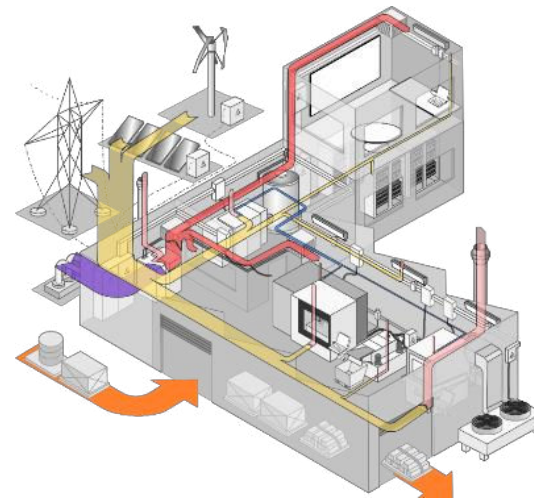
Der Energiebedarf einer Fabrik setzt sich aus einer Vielzahl von Einzelverbrauchern zusammen. Außerdem ist eine integrierte Perspektive auf verschiedene Zielgrößen in der Produktion notwendig. Dazu zählen technische Kennzahlen wie z. B. Durchlaufzeiten oder Auslastungen aber auch die wirtschaftliche Perspektive, z. B. bezüglich Kosten und Erlösen. Eine reine Betrachtung von Energie und Umweltwirkungen ist nicht zielführend oder kann sogar zu Problemverschiebungen führen. Allerdings bedeutet dieser multikriterielle Ansatz auch, dass Zielkonflikte auftreten können und entsprechend gelöst werden müssen.

Abgeleitet aus diesem ganzheitlichen Fabrikverständnis ergeben sich für die Simulation verschiedene notwendige Funktionsblöcke, die je nach Anwendungsfall mit verschiedener Ausprägung berücksichtigt werden können: Die Modellierung und Simulation der **Produktion** berücksichtigt die Gestaltung und die Steuerung des Produktionssystems und damit die produktionslogistischen Abläufe. **TGA-Simulation** betrachtet die betrieblichen Versorgungssysteme (technische Gebäudeausrüstung, TGA), u. a. bezüglich interner Energiewandlung oder Medienversorgung. Insbesondere im Bereich der Lüftung und Raumwärme bzw. Kühlung gibt es starke Wechselwirkungen mit der modellhaften Betrachtung der **Fabrikgebäude**. Letztendlich bedarf es auch einer integrierten **Bewertung** der energetischen und weiteren Simulationsergebnisse und der Überführung in aussagekräftige technische, ökologische und wirtschaftliche Kennzahlen.

Für alle diese Funktionen sind typischerweise spezialisierte Modellierungs-/Bewertungsansätze und Softwareumgebungen verfügbar. Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung besteht eine Herausforderung in der sinnvollen Auswahl und ggf. Zusammenführung.



Fabricsystem



Beispielhafte Darstellung verschiedener Energieflüsse in einer Fabrik (Posselt 2016)

Funktionsblöcke für energieorientierte Simulation

Produktion

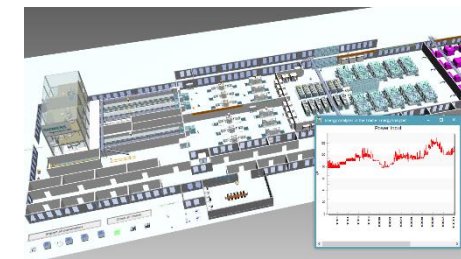
Simulation der Abläufe unter Berücksichtigung von Logistik, Layout sowie Produktionsplanung und -steuerung; Kennzahlen wie z. B. Durchlaufzeiten oder Auslastung

Gebäude und TGA

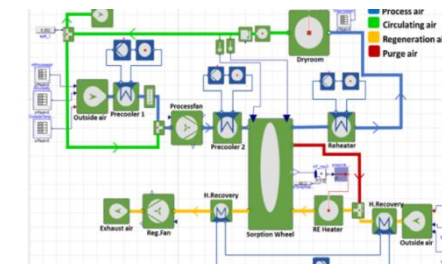
Simulation der Versorgungssysteme (Energie/Medien) und Auswirkungen im Gebäude, z. B. bei Raumlufttechnik; Kennzahlen wie Temperaturverteilungen, Luftströmung oder Versorgungsmengen

Energieflüsse/Bewertung

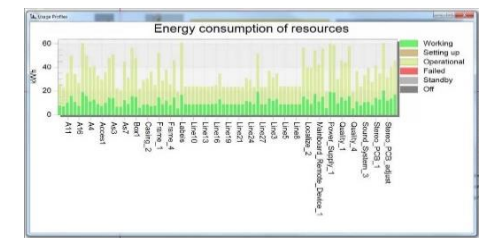
Erfassung und Auswertung der Energieflüsse, z. B. als Lastprofil mit zeitlicher Auflösung; Überführung in technische, wirtschaftliche und ökologische Kenngrößen



(Bild: Siemens PLM)

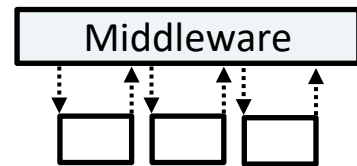
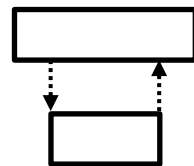
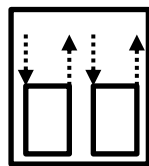
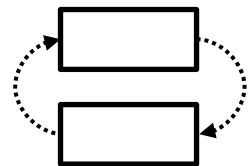


(Bild: Vogt et al. 2021)



(Bild: Siemens PLM)

Lösungskonzepte zur Werkzeugnutzung



Direkte Kopplung

Synchronisation über Middleware

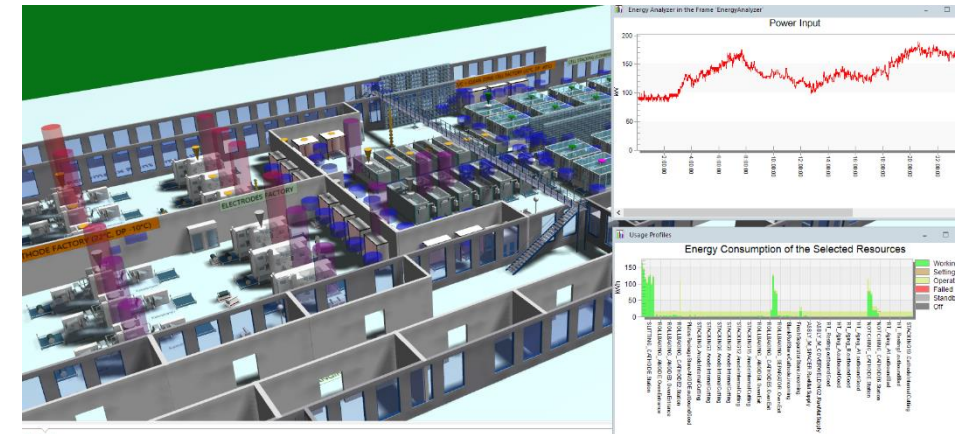
Offline-Kopplung
Nachlaufende Übergabe von Ergebnissen zwischen Modellen/Funktionen

Integration
Realisierung verschiedener Funktionen/Modelle in einer Umgebung

Online-Kopplung
Direkte Übergabe von Variablen zwischen Modellen/Funktionen während der Laufzeit. Möglich sind hier 1) direkte Kopplung oder 2) Synchronisation über Middleware

Kopplungsarchitekturen von Funktionen und Modellen

Zur Realisierung der notwendigen Funktionen für eine energieorientierte Simulation stehen in Forschung und Praxis verschiedene Methoden und Werkzeuge zur Verfügung. Diese können über unterschiedliche Mechanismen und damit Architekturen gekoppelt werden. Je nach Komplexität, Einsatzbereich und Ziel der spezifischen Fallstudie sind unterschiedliche Kombinationen möglich. Die Grafik rechts zeigt eine beispielhafte Auswertung verwendeter Software und Architekturen auf Basis publizierter Ansätze. Die Nutzung von in Produktionssimulation integrierter Energieauswertung ist hierbei besonders stark vertreten (z. B. Energy Analyzer in Plant Simulation).

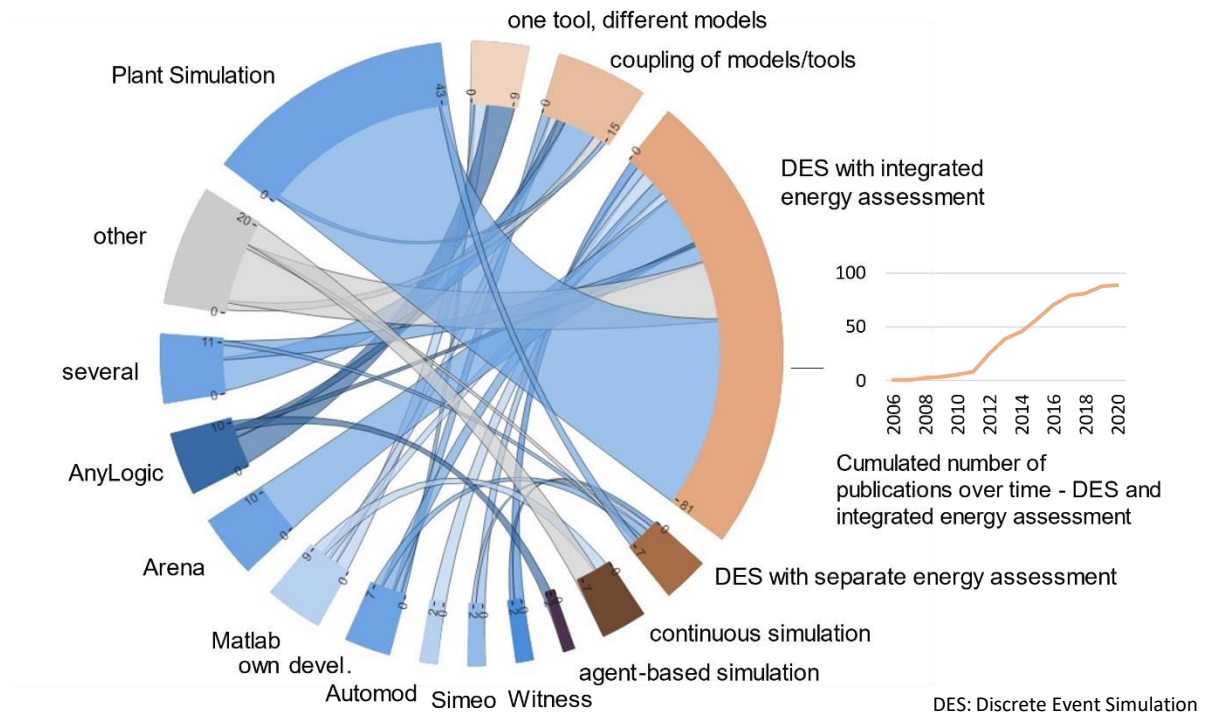


Beispielhafte Darstellung von Plant Simulation mit Energy Analyzer

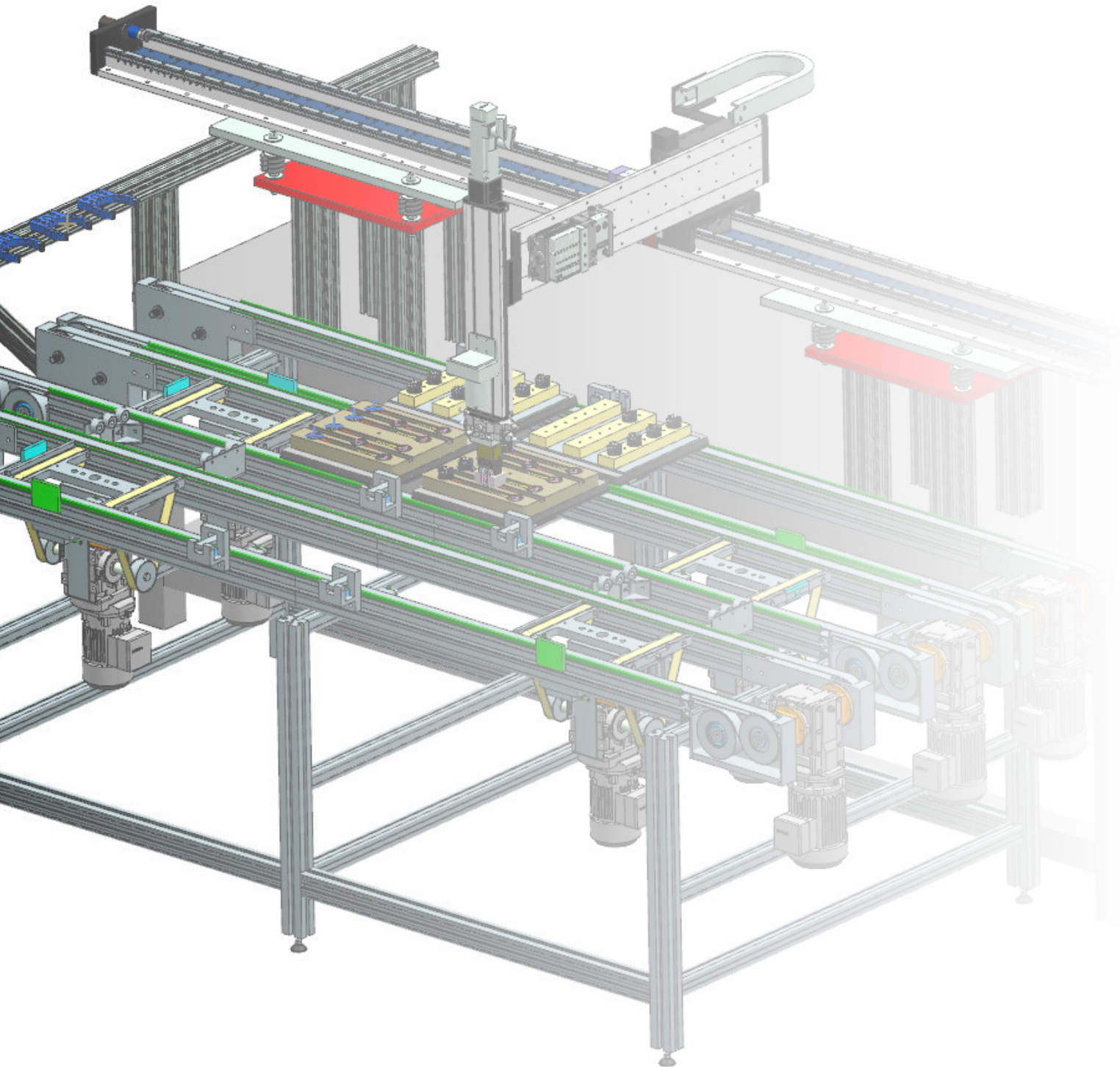
(Bild: Siemens PLM)

Simulation tools

Deployed architectures



Übersicht energieorientierter Simulationsansätze für Produktion und Logistik (Stoldt et al. 2021)



Simulation gekoppelter Anlagenmodelle

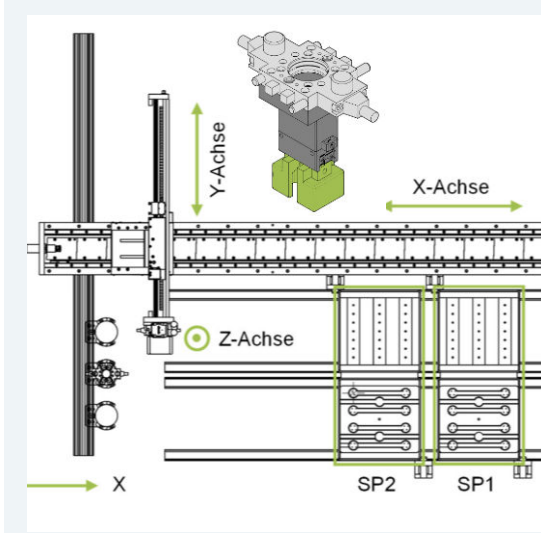
Motivation, Ausgangslage und Zielstellung

Zukünftig wird die ressourceneffiziente Produktion an Bedeutung gewinnen. Es muss eine immer größere Vielzahl an (Umwelt-)Auswirkungen durch die Produktion berücksichtigt werden, da Anlagen einen großen Anteil an der Umweltbelastung verursachen (Müller et al. 2009). Um das zu erreichen, ist die Einbindung erneuerbarer Energiequellen und -speicher notwendig.

Ziel des vorliegenden Beispiels ist es, einen ganzheitlichen digitalen Zwilling zu entwickeln und dabei sowohl prozessspezifische als auch energetische Aspekte zu berücksichtigen. Dazu sollen verschiedene Simulations- und Entwicklungsumgebungen miteinander kombiniert und eine Plattform erstellt werden, welche die verteilte Simulation koordiniert und orchestriert.

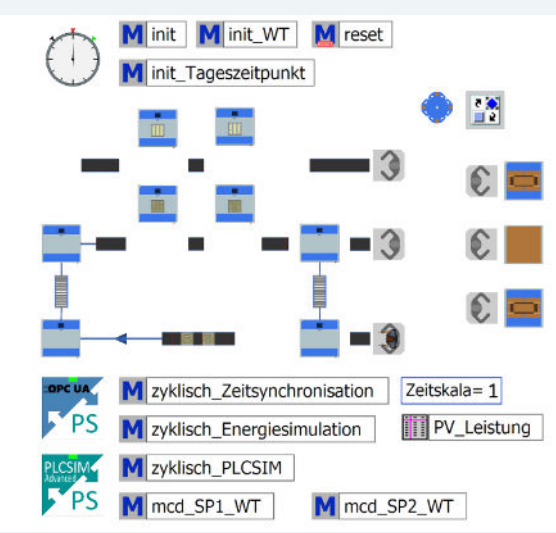
Simulation gekoppelter Anlagenmodelle

Die Industrie hat mit 30 % den zweithöchsten Anteil am Endenergieverbrauch in Deutschland und muss selbst aktiv werden, um eine Reduktion unter Berücksichtigung staatlicher Vorgaben zu erreichen und energieeffizient zu produzieren (Hirzel et al. 2011). Dazu ist ein strategisches Energiemanagement notwendig. Dieses und sämtliche für den Prozessablauf zu berücksichtigende Rahmenbedingungen sollen in der Simulation von Produktionsanlagen aufgenommen werden. Als Demonstrationsanlage dient eine Montageanlage für kleine Elektromotoren, die bei Drohnen zum Einsatz kommen. Sie besteht aus einem Fördersystem, auf welchem mit Statoren und Rotoren sowie mit fertigen Motoren bestückte Werkstückträger gefördert werden, und einer Linearachse, welche die Handhabungsoperationen ausführt. Das Fördern der Werkstückträger sowie die manuellen Operationen werden mittels eines Modells in Plant Simulation modelliert und simuliert. Die eigentlichen Fügeoperationen werden mittels Starr- und Kollisionskörpern im Mechatronics Concept Designer (MCD), einem Werkzeug zur Darstellung multiphysikalischer Abläufe, abgebildet. Zwischen den beiden Werkzeugen werden Signale ausgetauscht, sodass die Abläufe ohne Unterbrechung durchgeführt werden. Die einzelnen Prozessschritte werden sowohl in der Simulation als auch in der Realität über die Sensorik der Anlage ausgelöst. Sowohl das in Plant Simulation simulierte Fördersystem als auch das im MCD simulierte Portalsystem werden durch eine simulierte Steuerung mit dem realen Programmcode gesteuert. Über die Sensorik werden zusätzlich Informationen zum Leistungsbedarf aufgenommen, denn neben dem Prozessablauf soll in der Simulation die Versorgung der Anlage mit Energie aus erneuerbaren Energiequellen in Kombination mit -speichern betrachtet werden.

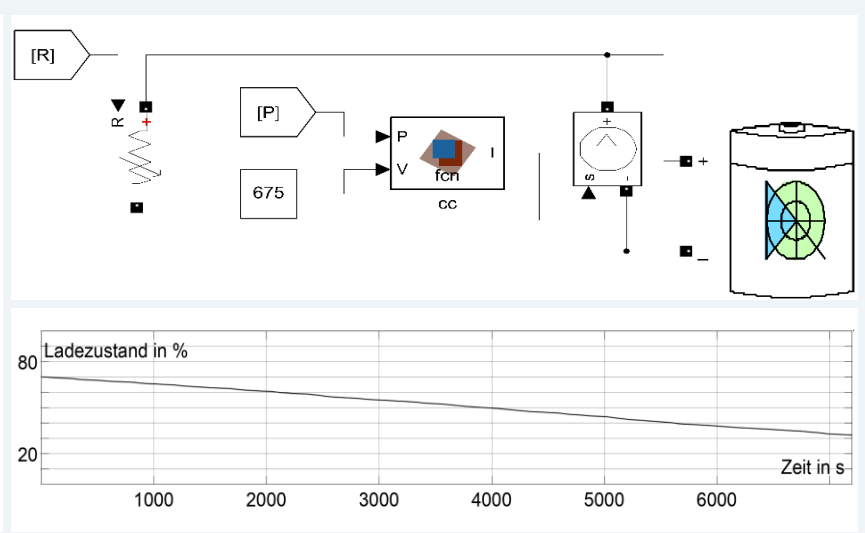


MCD (Simulation Fügeoperation)

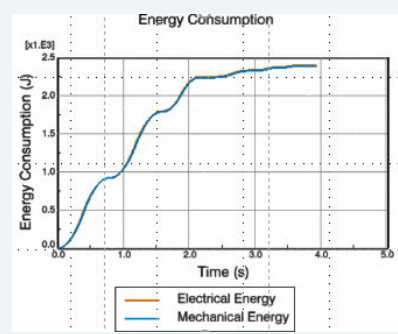
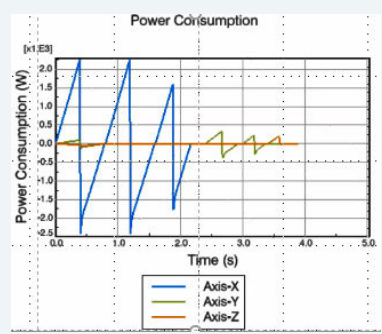
Für die Linearachse ist die Aufnahme der Lastparameter in den untenstehenden Grafiken abgebildet. In der rechten Abbildung sind der Aufbau und das Entladeverhalten des Akkumulators, welcher die Anlage neben dem Versorgungsnetz und einer Photovoltaikanlage mit Energie versorgt, dargestellt. Die Simulation des Akkumulators wurde in Matlab Simulink umgesetzt. Dazu wird in einem ersten Schritt der Leistungsbedarf der Anlage zu diskreten Zeitpunkten ermittelt und in einen Wert für den elektrischen Widerstand umgerechnet. Über diesen formalen Widerstand entlädt sich der simulierte Akkumulator und verändert seinen Ladezustand entlang der hinterlegten Entladekurve bzw. entlang seines spezifischen Entladeverhaltens. Umgekehrt erfolgt das Laden.



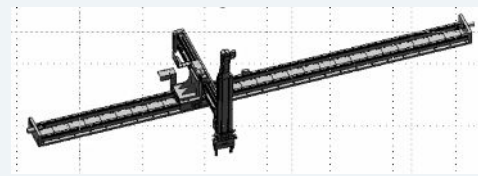
Plant Simulation (Simulation Fördertechnik)



Matlab Simulink (Simulation Akkumulator)



Lastparameter (Leistungs- und Energiebedarf) der Linearachse des Forschungsdemonstrators



Die Modellberechnung der einzelnen Simulatoren erfolgt selbstgetaktet, wodurch für eine zeitlich synchrone Kommunikation eine Synchronisation der Zeitbasen auf die reale Zeit erforderlich ist. Hierbei ist es auch möglich, eine Tageszeit für den Start der Simulation auszuwählen. Die Synchronisation übernimmt ein zentraler Orchestrator in Plant Simulation. In die Simulationen fließen verschiedene Einflussgrößen wie die Leistung der Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage), die Größe und damit der Energieinhalt des Akkumulators, die Taktzeit der Anlage sowie der Leistungsbedarf sämtlicher Komponenten wie der Förderbänder und der Linearachse ein. Nach erfolgreicher Simulation verschiedener vordefinierter Szenarien ist es beispielsweise möglich, die notwendige Größe des Akkumulators zu definieren oder den optimalen Zeitpunkt für das Laden oder das Entladen zu bestimmen. Weiterhin können Parallelisierungen von Tätigkeiten und Änderungen des Prozessablaufs hinsichtlich einer optimalen Ausnutzung der Energie der PV-Anlage bestimmt werden. In einem nächsten Schritt sollen durch maschinelle Lernverfahren die optimalen Größen und Bedingungen für die Energieversorgung ermittelt werden.



Anwendungsbeispiele

Ökoeffiziente Komponentenfertigung

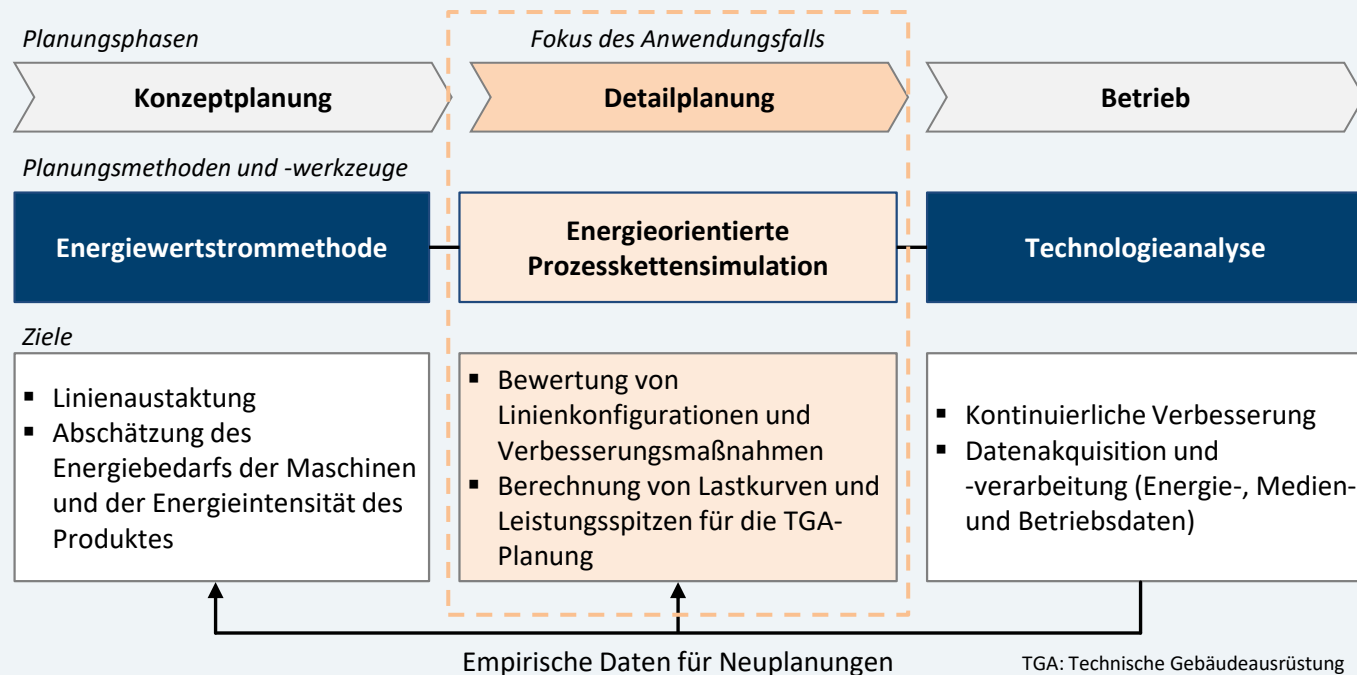
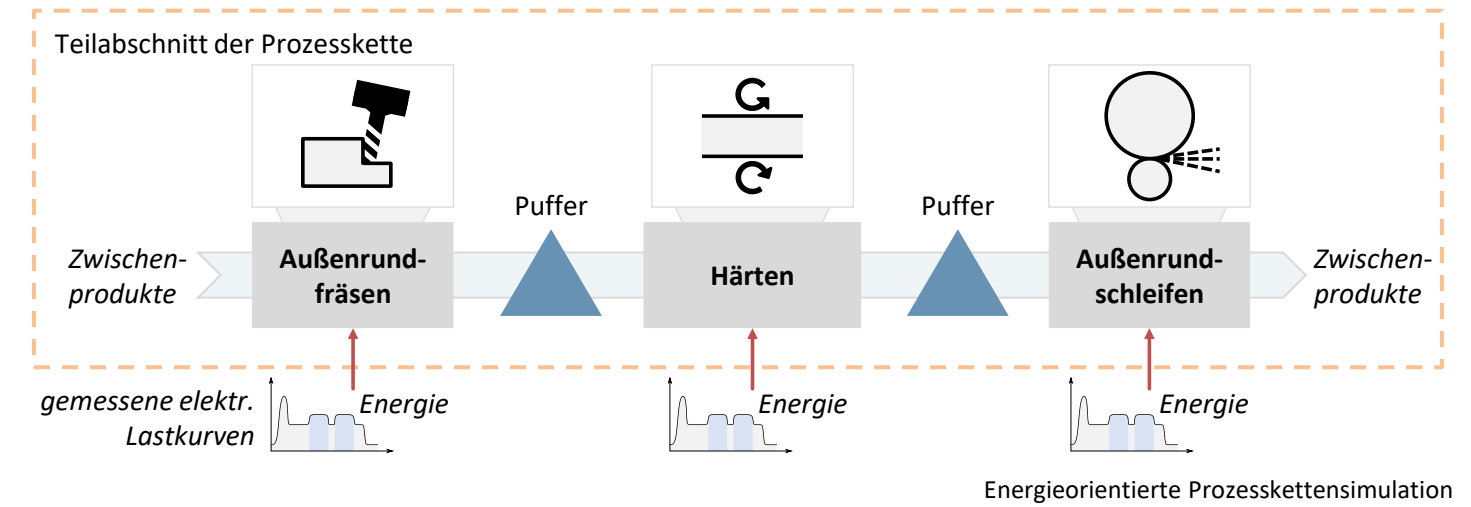
Motivation, Ausgangslage und Zielstellung

Produzierende Unternehmen sind immer stärker gezwungen, ökoeffiziente Prozessketten zu planen und zu betreiben. Industrielle Prozessketten zur Komponentenfertigung sind bis heute von zerspanenden Bearbeitungsprozessen geprägt, was gleichzeitig mit hohen Energie- und Medienbedarfen und einer Reihe von dynamischen Wechselwirkungen unter den Produktionsmaschinen und der technischen Gebäude-

ausrüstung einhergeht. Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel der folgenden Fallstudie, die Anwendung eines Vorgehens zur ökoeffizienten Planung von Prozessketten am Beispiel der Kurbelwellenfertigung zu demonstrieren.

Ökoeffiziente Komponentenfertigung

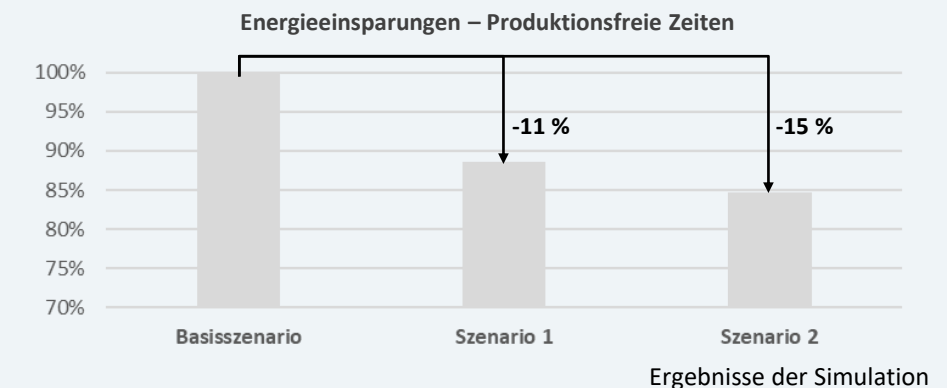
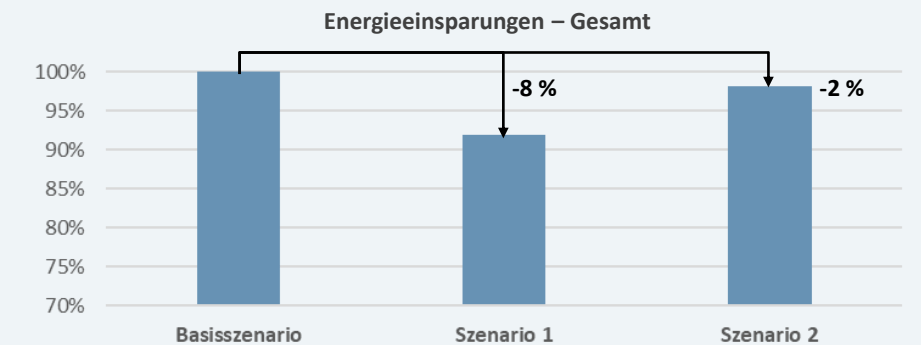
Die Kurbelwelle wird in einer Abfolge von mehreren Prozessschritten im 3-Schicht-System produziert. Dazu kommen überwiegend zerspanende Werkzeugmaschinen zum Einsatz, die miteinander verkettet sind. Zur Erreichung der Taktzeit wird, wo erforderlich, eine Parallelisierung vorgenommen. Konkret sind zwei mögliche Verbesserungsszenarien mittels der Prozesskettensimulation untersucht worden.



Vorgehen zur ökoeffizienten Planung von Prozessketten (Schmidt et al. 2017, Labbus et al. 2018)

Szenarioübersicht

Szenario 1	Erhöhung der Prozessrate am Bottleneck-Prozessschritt um 5 % und gleichzeitige Reduzierung der parallelen Maschinen im Bottleneck-Prozessschritt
Szenario 2	Energieeffizienter Standby-Modus an Hotspot-Maschinen mit der höchsten Grundlast



Multiskalensimulation von Batteriefabriken

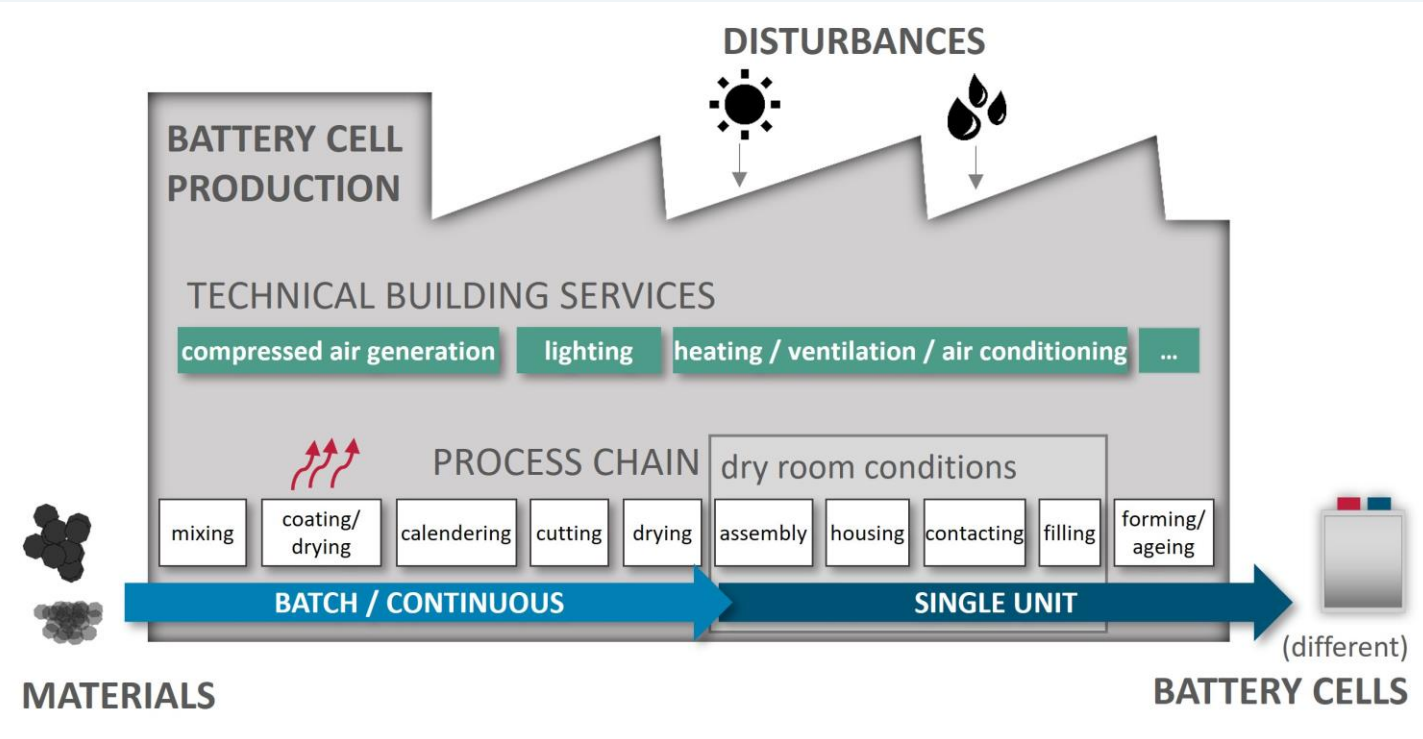
Motivation, Ausgangslage und Zielstellung

Batterien spielen für die Energiewende eine entscheidende Rolle und die Nachfrage nach Energiespeichern wird in den nächsten Jahrzehnten deutlich steigen. Während die Batteriefertigung bisher vor allem in Asien stattfand, sind auch in Europa und Nordamerika immer mehr Batteriefabriken geplant. Der Energiebedarf der Fertigung ist ein

wichtiger Faktor für den Erfolg der Batterieherstellung. Er bestimmt stark die mit der Produktion verbundenen Emissionen und ist auch aus Kostensicht relevant (deutlich hinter den Materialkosten, aber in der gleichen Größenordnung wie Personalkosten und Investitionen).

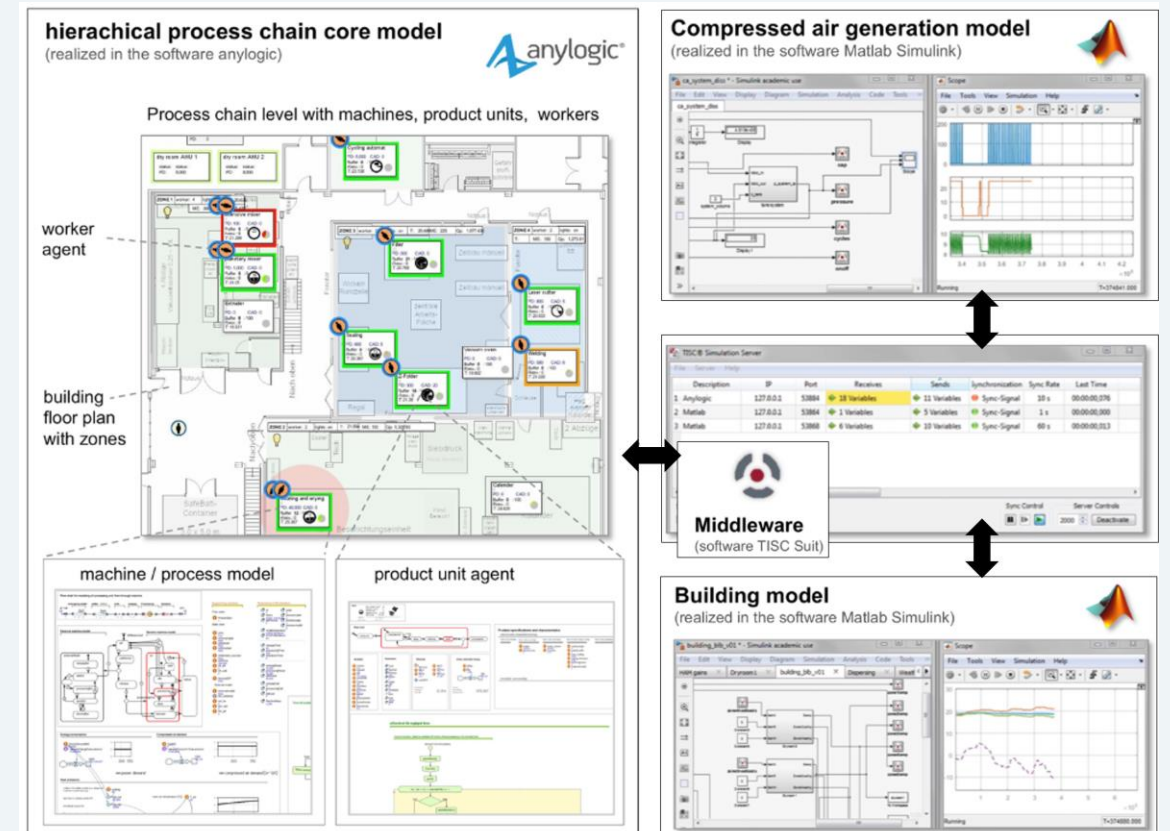
Multiskalensimulation von Batteriefabriken

Die Batterieherstellung zeichnet sich durch das komplexe Zusammenspiel einer Vielzahl von Prozessen aus (Kwade et al. 2018) – dies reicht von kontinuierlichen und Batch-Prozessen für die Elektrodenherstellung (z. B. Mischen, Beschichten/Trocknen, Kalandern) bis hin zu Einzelstückprozessen für die spätere Zellmontage und -veredelung). Neben den Prozessen als solchen spielt die technische Gebäudeausrüstung in Batteriefabriken eine wichtige Rolle – der wichtigste Aspekt in diesem Zusammenhang ist die notwendige Trockenraumumgebung für die Zellmontage, die typischerweise auch ein Haupttreiber für den Energiebedarf ist (Thomitzek et al. 2019). Alle diese Fabrikelemente stehen in enger Wechselwirkung und bestimmen letztendlich die Leistungsfähigkeit und den Energiebedarf der Batteriefabrik.

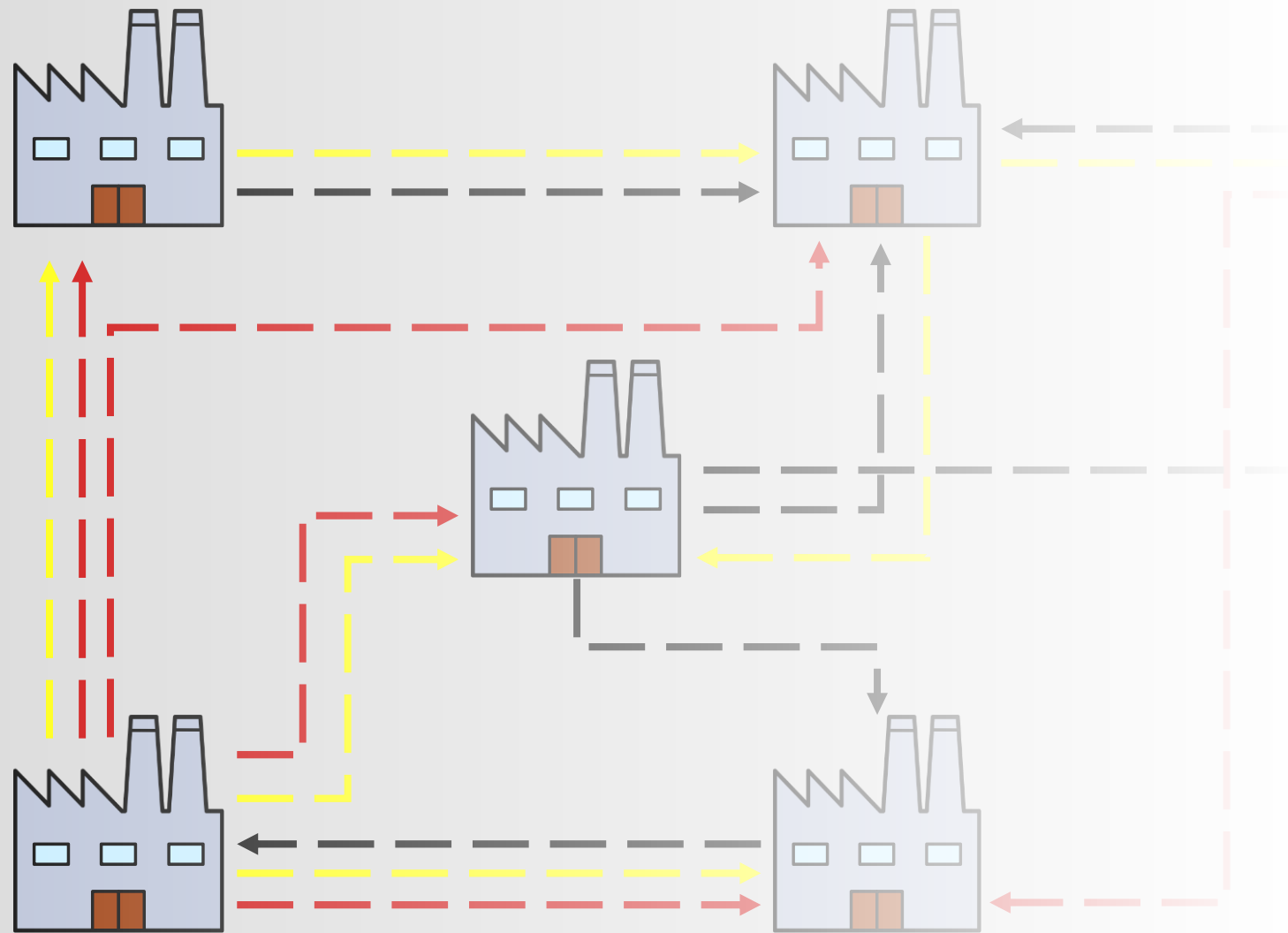


Systemelemente einer Batteriefabrik mit Produktionsprozessen und technischer Gebäudeausrüstung (Thiede et al. 2019)

Vor dem Hintergrund des heterogenen Aufbaus und der komplexen Wechselwirkungen in einer Batteriefabrik wurde eine hybride Multiskalensimulationsarchitektur entwickelt (Schönemann et al. 2019). Das Kernmodell verfolgt einen agentenbasierten Ansatz, der in AnyLogic realisiert wurde. Es bildet die Fertigungsprozesskette mit allen Maschinen, den Materialfluss (Produkteinheiten, die sich durch das System bewegen) und auch die Arbeiter ab. Weitere Detailmodelle u. a. für einzelne Prozesse, das Gebäude oder die Druckluftversorgung (z. B. realisiert in Matlab) können hiermit gekoppelt werden. Der Datenaustausch und die Synchronisation erfolgen durch eine zentrale Middleware. Der Multiskalenansatz erlaubt eine detaillierte Betrachtung des Energiebedarfs unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen und der Nutzung existierender Detailmodelle.



Multiskalensimulationsarchitektur für die Abbildung einer Batterieproduktion (Schönemann et al. 2019)



- ▶ Wärme
- ▶ Strom
- ▶ Materialien

Simulative Optimierung industrieller Symbiosen

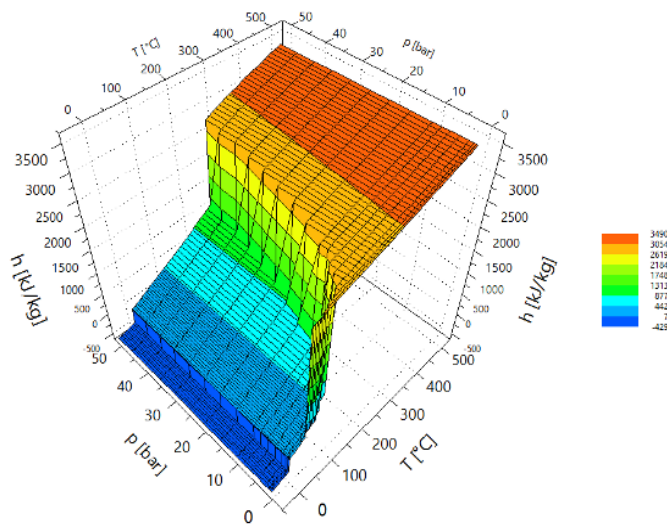
Motivation, Ausgangslage und Zielstellung

Industrieunternehmen stehen zunehmend vor der Herausforderung, den eigenen Ressourcen- und Energiebedarf ökologisch und ökonomisch nachhaltig zu decken. Ein diesbezüglich vielversprechendes Konzept ist das der industriellen Symbiose. Hierbei bieten energetische und/oder stoffliche Austauschbeziehungen zwischen oder innerhalb von Industrieunternehmen (z. B. innerhalb eines Industrieparks) die Möglichkeit von Synergieeffekten. Der Fokus liegt dabei auf lokal-regionalen

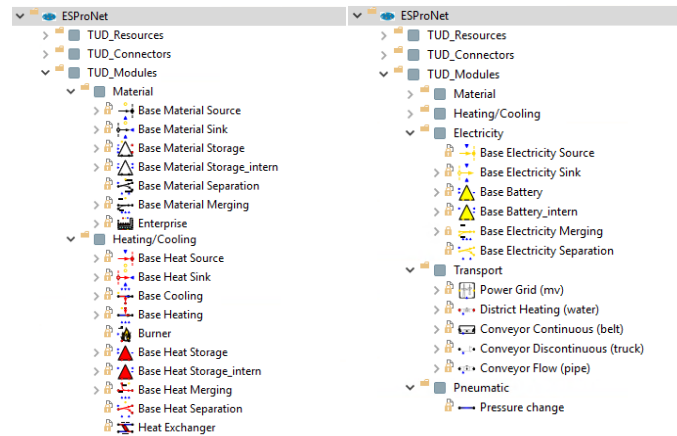
Wertschöpfungsketten, wodurch ökonomische und ökologische Wettbewerbsvorteile erlangt werden. Um das Symbiosepotenzial objektiv einschätzen zu können, werden die möglichen Austauschbeziehungen im Kontext des Industrieparks oder auf Prozessebene simuliert und anschließend hinsichtlich ihrer Eignung bewertet.

Simulative Optimierung industrieller Symbiosen

Für die Analyse komplexer Produktionssysteme und wechselseitig abhängiger Prozesse ist eine statische Bewertung nicht ausreichend. Sie würde z. B. sich selbstverstärkende Prozesse und komplexe Zusammenhänge trivialisieren, weshalb eine dynamische Analyse in Form von Simulation notwendig ist. Das verwendete Tool ist das Modelica-basierte SimulationX, welches insbesondere bei der Analyse physikalischer Systeme Anwendung findet.

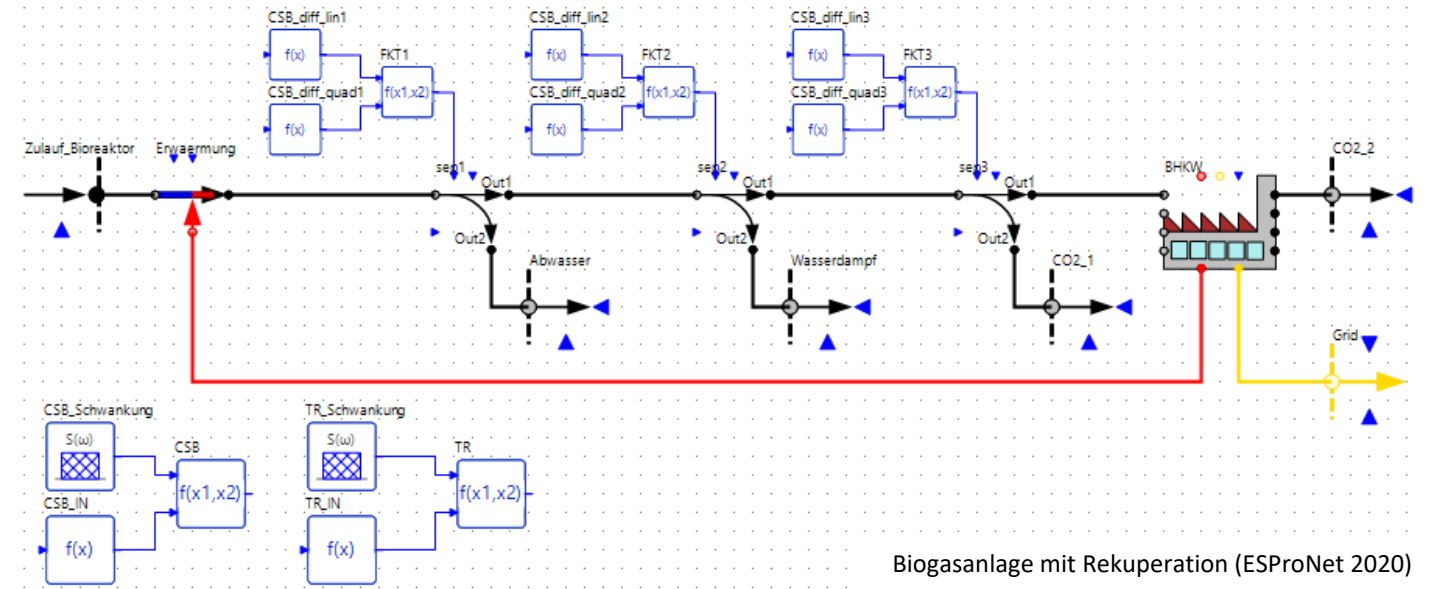


3D-Kennfeld physikalischer Eigenschaften von Wasser (ESProNet 2020)



Auszug ESProNet Basisbaustein-Bibliothek (ESProNet 2020)

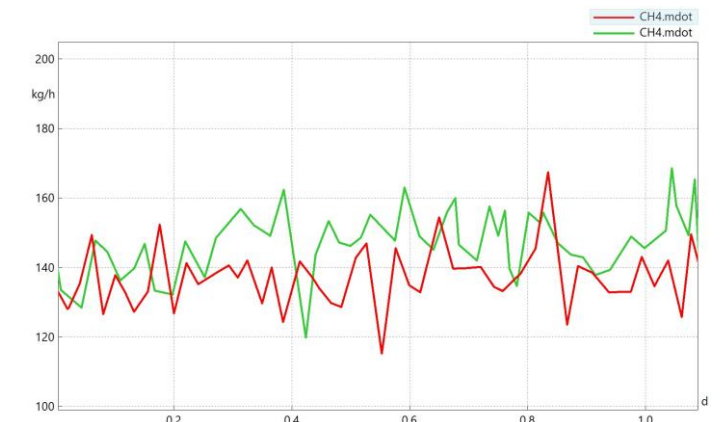
Im Rahmen des Projektes Energetische Simulation dynamischer Produktionsnetze (ESProNet) wurde eine neue Bausteinbibliothek entwickelt. Die Bibliothek umfasst Ressourcenmodelle, bei denen zwischen Hauptprodukten, Hilfs-, Neben- und Betriebsstoffen sowie Abfällen unterschieden wird. Der Zustand von Ressourcen wird über Enthalpie und Druck definiert, die in Beziehung zur Temperatur gesetzt werden. Beispielhaft ist das beschriebene 3D-Kennfeld für Wasser abgebildet. Darüber hinaus werden Heizwert, temperaturabhängige Dichte und spezifische Wärmekapazität sowie bestimmte Fixpunkte (z. B. Schmelztemperatur) angegeben. Weiterhin umfasst die Bibliothek Basisbausteine in den Domänen Material, Wärme/Kälte und Elektrizität.



Biogasanlage mit Rekuperation (ESProNet 2020)

Ein Beispiel für eine interne Symbiose ist die Abwärmenutzung in einer Abwasseraufbereitungsanlage zur Erhöhung der Abbauraten in Biogasreaktoren (Maiwald et al. 2020). Das Modell einer Biogasanlage zeigt alle relevanten Komponenten. Die Abwasseraufbereitung besteht aus einem Einlaufbecken, der Klärung in mehreren Stufen und der Entsorgung von Biogas in einem Blockheizkraftwerk (BHKW), das den erzeugten Strom ins Netz einspeist. Die Wärme wird lediglich zu einem geringen Teil zur Warmwasserbereitung für angrenzende Büros verwendet, der Großteil wird an die Umgebung abgegeben. Der Ansatz sieht vor, den Einlauf des Biogasreaktors im Bedarfsfall (z. B. im Winter) zu heizen und somit höhere Abbauraten und folglich höhere Biogasausbeute zu erreichen, da die Aktivität der Bakterien im Biogasreaktor hochgradig temperaturabhängig ist. Im Ergebnis konnte eine höhere Netzeinspeisung im Heizbetrieb (+12,8 %) erreicht und die Kapazität der Biogasreaktoren durch Temperaturführung erhöht werden. Dargestellt sind die obere Hüllkurve des Basisszenarios (rot) und die

untere Hüllkurve des Rekuperationsszenarios (grün). Die Graphen zeigen, dass der Biogas-Output im Basisszenario in seltenen Fällen die schlechtesten Ergebnisse des Rekuperationsszenarios übersteigen.



Vergleich zwischen Basisszenario (rot) und Rekuperationsszenario (grün) (Maiwald et al. 2020)

Aufwand und Nutzen

Quantitative und qualitative Betrachtung

Wie die VDI 3633, Blatt 1 (2014) bereits darlegt, ist die Ermittlung von Aufwand und Nutzen für Simulationsstudien grundsätzlich schwierig; rein quantitativ können diese nur auf Basis eines konkreten Projektes bewertet werden.

Für die quantitative Nutzenermittlung werden die erwarteten Aufwände für die Durchführung der Simulationsstudie dem erwarteten Nutzen beispielsweise aufgrund einer durch Simulation erreichbaren günstigeren Planungsvariante, eines früheren Zeitpunktes des Produktionsbeginns und damit gewonnener Betriebszeit oder einer energieeffizienteren Produktion und damit den eingesparten Energiekosten gegenübergestellt.

Aus diesen wenigen Beispielen ist bereits erkennbar, dass die Quantifizierung höchst problematisch ist, da durch den Einsatz der Simulation sich auch die möglicherweise teure Planungsvariante als die einzig sinnvolle ergeben könnte. Die tatsächlichen

Einsparungen ergeben sich dann erst im laufenden Betrieb durch die Sicherstellung desselben aufgrund der Umsetzung der kostenintensiveren Lösung. Gleichzeitig ist auch zu beachten, dass grundsätzlich nicht alle Investitions- und Betriebskosten durch die Erkenntnisse der Simulation beeinflussbar sind.

Rein qualitativ lassen sich Nutzenaspekte für die Simulation hingegen projektunabhängig formulieren. Hierzu zählen laut VDI 3633, Blatt 1 (2014) vor allem:

- Sicherheitsgewinn und höhere Planungsqualität
- Abgesicherte Lösungsvarianten mit nach unterschiedlichen Zielgrößen (z. B. Durchlaufzeit, Auslastung oder Durchsatz) abgestimmten Ressourcen und verbesserten Abläufen
- Besseres Systemverständnis mit einer objektiven Entscheidungsbasis für die gewählte Lösung
- Verkürzung der Anlaufphase
- Entscheidungsunterstützung im laufenden Betrieb

Simulation energetischer Faktoren

Bei der Simulation energetischer Faktoren erhöht sich – wie bereits dem Simulationsvorgehen zu entnehmen ist – der Aufwand für alle Phasen. So sind während der Datenbeschaffung und -aufbereitung zusätzliche Daten z. B. zu energetischen Verbräuchen bereitzustellen. Bei der Modellbildung entstehen ggf. zusätzliche Implementierungsaufwände, z. B. um die Kopplung von unterschiedlichen Modellen umzusetzen oder modellübergreifende Kennzahlen zu ermitteln. Generell gut abzuwägen ist der Detaillierungsgrad der energetischen Betrachtung – abhängig von der gewählten Fragestellung können hier vereinfachte analytische Betrachtungen ausreichend oder zeitlich hoch aufgelöste Energiedaten notwendig sein. Zudem ist anzumerken, dass der Lösungsraum für die Verbesserung des energetischen Verhaltens einer Anlage oft dadurch beschränkt wird, dass ein Durchsatzverlust oftmals nicht akzeptiert wird. Hier fehlt i. d. R. eine gemeinsame Zielfunktion.

Bezüglich der Nutzenseite können – zusätzlich zu den genannten allgemeinen Potenzialen von Simulationsstudien – durch energieorientierte Produktionssimula-

tion verschiedene Handlungsfelder adressiert werden. Diese umfassen z. B. die Reduktion des (spezifischen) Energiebedarfs und damit der Energiekosten oder energiebezogenen Umweltwirkungen, z. B. durch Vermeidung von Leerlauf-Verlusten. Aber auch simulationsbasiert abgeleitete Strategien zur Lastspitzenvermeidung, der Wiederverwendung von Energieströmen (z. B. Abwärme) oder der Integration von erneuerbaren Energien sind vielversprechend. Eine verbesserte Dimensionierung der energieorientierten Infrastruktur kann auch zu Kosteneinsparungen führen. Als zusätzlicher – nicht monetärer – Nutzen kann die Unterstützung der Einhaltung gesetzlicher Vorgaben zum Energieverbrauch (oder zu CO₂-Emissionen) bzw. die Unterstützung der Zertifizierung zur umweltgerechten Produktion genannt werden. Insgesamt ist je nach Aufgabenstellung und geplantem Lösungsansatz eine Quantifizierung des Nutzens nur projektspezifisch möglich und die Frage nach der Simulationswürdigkeit des zu untersuchenden Problems vorab zu klären.



Erhöhter Aufwand zur Datenerhebung und Modellierung



Potenzieller Nutzen u. a. durch Energieeinsparung, Lastspitzen- oder Kostenreduktion



Literaturverzeichnis

ESProNet (2020): Energetische Simulation dynamischer Produktionsnetze. https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/itla/tl/forschung/fabrikplanung_old/projekte/espronet. (Zugriff am 14.03.2023).

Gebler, M., Cerdas, J. F., Thiede, S., & Herrmann, C. (2020). Life cycle assessment of an automotive factory: Identifying challenges for the decarbonization of automotive production – A case study. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122330.

Hirzel, S., Sontag, B., & Rohde, C. (2011). Betriebliches Energiemanagement in der industriellen Produktion. Fraunhofer ISI. Karlsruhe.

IPCC (2014): Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Kwade, A., Haselrieder, W., Leithoff, R., Modlinger, A., Dietrich, F., & Droeder, K. (2018). Current status and challenges for automotive battery production technologies. *Nature Energy*, 3(4), 290-300.

Labbus, I., Schmidt, C., Dér, A., Herrmann, C., & Thiede, S. (2018). Automated production data integration for energy-oriented process chain design. *Procedia CIRP*, 72, 551-556.

Maiwald, M., Kosmol, L., Pieper, C., & Schmidt, T. (2020). ESProNet: A Model Library for the Dynamic Simulation of Industrial Symbiosis. *International Journal of Modeling and Optimization*, 10(1), 1-7.

Müller, E., Engelmann, J., Löffler, T., & Jörg, S. (2009). Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin: Springer.

Peter, T. (2019). Gekoppelte hybride Simulation von Materialfluss und Energie in Produktion und Logistik. Reihe: *Produktionsorganisation und Fabrikplanung*; Band 6, Aachen: Shaker.

Posselt, G. (2016). Towards energy transparent factories (Vol. 135). Cham: Springer International Publishing.

Rabe, M., Spieckermann, S., & Wenzel, S. (2008). Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin: Springer.

Schmidt, C., Labbus, I., Herrmann, C., & Thiede, S. (2017). Framework of a modular tool box for the design of process chains in automotive component manufacturing. *Procedia CIRP*, 63, 739-744.

Schönemann, M., Bockholt, H., Thiede, S., Kwade, A., & Herrmann, C. (2019). Multiscale simulation approach for production systems: application to the production of lithium-ion battery cells. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 1373-1390.

Stoldt, J., & Putz, M. (2017). Procedure model for efficient simulation studies which consider the flows of materials and energy simultaneously. *Procedia CIRP*, 61, 122-127.

Stoldt, J., Prell, B., Rabe, M., Wenzel, S., & Thiede, S. (2021). A Criteria-based Database for Research and Applications of Energy-oriented Simulation in Production and Logistics. In: Franke, J., Schuderer, P. (Eds.): *Simulation in Produktion und Logistik*. Göttingen: Cuvillier, 93–102.

Thiede, S., Turetskyy, A., Kwade, A., Kara, S., & Herrmann, C. (2019). Data mining in battery production chains towards multi-criterial quality prediction. *CIRP Annals*, 68(1), 463-466.

Thomitzek, M., von Drachenfels, N., Cerdas, F., Herrmann, C., & Thiede, S. (2019). Simulation-based assessment of the energy demand in battery cell manufacturing. *Procedia CIRP*, 80, 126-131.

VDI 3633 Blatt 1 (2014): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Berlin: Beuth.

Vogt, M., Koch, K., Turetskyy, A., Cerdas, F., Thiede, S., & Herrmann, C. (2021). Model-based energy analysis of a dry room HVAC system in battery cell production. *Procedia CIRP*, 98, 157-162.

Wenzel, S., Peter, T., Stoldt, J., Schlegel, A., Uhlig, T., & Jósvei, J. (2018). Considering energy in the simulation of manufacturing systems. In: Rabe, M., Juan, A. A., Mustafee, N., Skoogh, A., Jain, S. & Johansson, B. (Eds.): *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference (WSC)*. Piscataway: IEEE, 3275–3286.

Wenzel, S., Collisi-Böhmer, S., Pitsch, H., Rose, O., & Weiß, M. (2008). Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg: Springer.