

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-03-116
 Datum der Einreichung: 18.11.2025
 Datum der Annahme: 29.01.2026
 Datum der Veröffentlichung: 07.04.2026

Effizienzorientierte Planung industrieller Energiesysteme auf Basis des Energiewertstroms

Energiesystemplanung mit dem Energiewertstrom

F. Schnell, G. Solis Castillo, K. Erlach, V. Bezold, C. Kaucher, T. Bauernhansl, A. Sauer

ZUSAMMENFASSUNG Der Beitrag beschreibt ein integriertes Vorgehen, das die Energiewertstrommethode mit der industriellen Energiesystemplanung verknüpft. Zuerst werden Energieeffizienzpotenziale prozessspezifisch identifiziert und geeignete Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet. Darauf aufbauend werden Energiesystemvarianten modelliert, bewertet und zielkonform dimensioniert. So können Überdimensionierung vermieden und die Energieeffizienz sowie Wirtschaftlichkeit eines Produktionsstandortes verbessert werden.

STICHWÖRTER

Energieeffizienz, Fabrikplanung, Nachhaltigkeit

Energy system planning using the energy value stream – Efficiency-oriented planning of industrial energy systems based on the energy value stream

ABSTRACT The paper develops an integrated approach linking the energy value stream method to industrial energy system planning. First, it identifies process-specific opportunities to increase energy efficiency and derives suitable improvement measures. This serves as a basis to model, evaluate, and dimension the energy system configurations to meet the defined targets. This avoids over-dimensioning and improves both energy efficiency and economic profitability of production facilities.

1 Einleitung

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2045 netto-treibhausgasneutral zu sein. Zudem sollen ab dem Jahr 2050 negative Treibhausgasemissionen erreicht werden [1]. Diese Zielsetzung erfordert wirksame CO₂-arme sowie CO₂-freie Maßnahmen in Energieversorgung und -verbrauch, insbesondere in den Sektoren Industrie und Energiewirtschaft, die gemeinsam 56,3 % der Treibhausgasemissionen verursachen [2]. Zentrale Hebel hierfür sind neben Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz auch die Umgestaltung der dezentralen Energieversorgung unter Einbezug erneuerbarer Energien.

Vor diesem Hintergrund müssen Industrie- und Energieunternehmen erhebliche Investitionen tätigen, um bestehende Produktionsstandorte (Brownfield-Fabriken) zu modernisieren, zu erweitern und erneuerbare Energiequellen (wie etwa Windenergie, Photovoltaik) zu integrieren. Das hier vorgestellte methodische Vorgehen beantwortet die Frage, wie die Energiesystemplanung für eine Fabrik nicht nur bedarfsgerecht erfolgen, sondern dieser Bedarf vorab auch investitionskostenschonend durch Steigerung der Energieeffizienz reduziert werden kann.

Dazu sind die bestehenden Produktionsprozesse zu optimieren und energetisch effizient zu gestalten (Identifikation und Realisierung von Einspar- und Effizienzpotenzialen). Als geeignetes Vorgehen gilt die Energiewertstrommethode, eine erweiterte Form der Wertstrommethode, da sie die acht Arten der Energieverschwendung systematisch erfasst und konkrete, in der Praxis umsetzbare Maßnahmen identifiziert [3]. Die Energiewertstrommethode gliedert sich in drei Phasen:

1. Datenaufnahme/Energiewertstromanalyse,

2. Energiewertstromdesign und

3. Umsetzung des energieoptimierten Produktionssystems [4].

Auf die Effizienzsteigerung durch die Energiewertstrommethode folgt die Energiesystemplanung. Auf Grundlage der in der Energiewertstrommethode erhobenen Energiedaten wird das Energiesystem ausgelegt. In einem simulationsbasierten Verfahren werden unterschiedliche Systemvarianten unter verschiedenen Zukunftsszenarien multikriteriell analysiert, um die jeweils geeignetste Auslegung zu identifizieren.

Im Folgenden werden die Energiewertstrommethode und die Energiesystemplanung im Detail dargestellt. Danach wird gezeigt, wie beide Ansätze verknüpft werden, um ihre jeweiligen Stärken zu bündeln. Zuletzt erfolgt eine exemplarische Anwendung der kombinierten Vorgehensweise in einem Industrieunternehmen.

2 Energiewertstrom und Energiesystemplanung

In diesem Kapitel werden die Energiewertstrommethode und die industrielle Energiesystemplanung als Basis für das integrierte Vorgehen vorgestellt.

2.1 Energiewertstrommethode

Die Energiewertstrommethode baut auf den Prinzipien der in der Produktionsoptimierung etablierten Wertstrommethode auf und betrachtet eine ausgewählte Produktfamilie ganzheitlich, indem produkt- und prozessbezogene Informationen zusammengeführt werden. Die Auswahl und Abgrenzung der Produktfamilie erfolgt entweder datengetrieben über eine Produkt-Prozess-

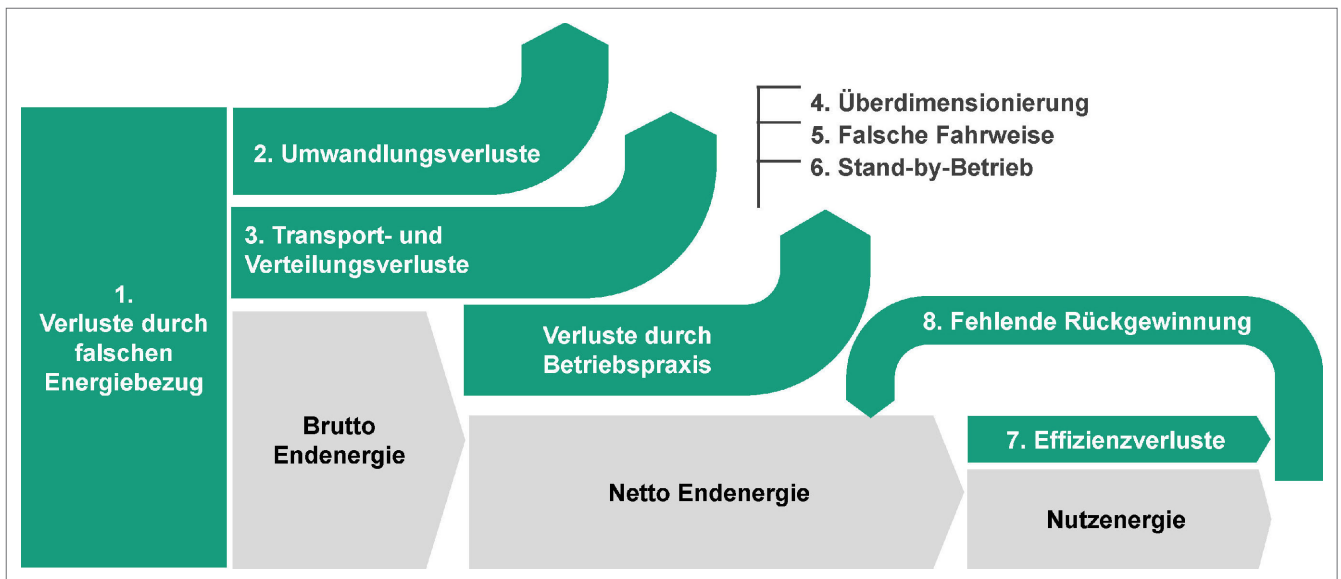


Bild 1 Die acht Arten der Energieverschwendung im Energieflussmodell. Grafik: [3]

Matrix oder produktseitig anhand von Merkmalsstruktur und Ablaufschema. Ergänzend können die Volumenströme des Materialflusses auch mittels Sankey-Darstellungen quantifiziert werden [5].

Die Methode beginnt mit einer Analyse des Ist-Zustands, in der Material- und Informationsflüsse über alle Phasen des Produktionsprozesses erfasst werden. Darauf folgt die Gestaltung des Soll-Zustands mit dem Ziel, Prozesseffizienz und Transparenz nach festgelegten Gestaltungsrichtlinien zu erhöhen. Zuletzt werden Maßnahmen zur Überführung vom Ist- in den Soll-Zustand geplant [5].

Über die klassische Wertstrommethode hinaus berücksichtigt die Energiewertstrommethode den Energieverbrauch der Produktion. Der Energieeinsatz wird energieträgerspezifisch und pro Prozessstufe erhoben und bewertet. Zur Identifikation der acht Arten der Energieverschwendung dient ein Energieflussmodell, das in **Bild 1** dargestellt ist.

Dabei tragen die klassischen Effizienzverluste durch den energetischen Wirkungsgrad (Nummer 7 in Bild 1) nur einen sehr geringen Anteil zur gesamten Energieverschwendung bei. Deutlich relevanter sind die in der Betriebspraxis entstehenden Verluste (Nummer 4–6), die in der Energiewertstromanalyse klar sichtbar werden, jedoch in anderen Methoden zur Energieanalyse oft nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden. Das klassische Energiemanagement betrachtet in der Regel lediglich die Verluste (Nummer 1–3). [3]

2.1.1 Datenaufnahme und Energiewertstromanalyse

Die Energiewertstromanalyse beginnt mit der systematischen Erfassung des Energieverbrauchs in den jeweiligen Prozessschritten. Dafür werden vorhandene Messdaten aus der Betriebsdatenerfassung genutzt und, sofern erforderlich, durch weiterführende Messungen ergänzt. Die Wahl des Messverfahrens richtet sich nach dem Energieträger und der vorhandenen Messinfrastruktur. Die in der Energiewertstrommethode am häufigsten betrachteten Energieträger sind Strom, Druckluft und Erdgas, die wie folgt gemessen werden können. [4]

Für elektrische Verbraucher bietet sich der Einsatz mobiler Leistungsmesstechnik an, bei der die Stromstärke phasenweise mit einer Stromzange erfasst wird. Unter der Annahme konstanter Netzspannung (oder alternativ durch Spannungsabgreifer) lässt sich daraus die Wirkleistung bestimmen. Da in Wechselstromnetzen Strom und Spannung typischerweise phasenverschoben sind, sind für eine korrekte Energiebilanz zusätzlich die Blindleistung und der Leistungsfaktor zu berücksichtigen.

Die Ermittlung des produktbezogenen Druckluftbedarfs setzt die Identifikation und Beseitigung von Leckagen voraus. Ultraschalldetektoren unterstützen dabei, Undichtigkeiten an Armaturen, Ventilen und Rohrverbindungen zu erkennen. Nach der Leckagebeseitigung erfolgt die Messung des prozessualen Druckluftbedarfs über eine definierte Messtrecke oder eine gezielt eingerichtete Entnahmestelle (zum Beispiel Kugelhahn). Zeitaufgelöst erfasst werden der tatsächliche und der aggregierte Verbrauch, der Systemdruck sowie die Leistungsaufnahme der Kompressoren.

Der Erdgasverbrauch wird meist auf Werksebene über fest installierte Messeinrichtungen erfasst. Fehlt eine prozessspezifische Auflösung, kann der aggregierte Bedarf durch temporäre Untermessungen, durch Auswertung von Laufzeit- und Betriebszustandsdaten oder anhand produktionsbezogener Kennwerte wie Stückzahlen, Prozesszeiten und Wirkungsgraden disaggregiert werden. [4]

Nach Abschluss der Datenerfassung wird als zentrale Kennzahl die Energieintensität berechnet. Die Energieintensität beschreibt den aufsummierten Energiebedarf zur Fertigung einer Einheit eines Produkts der betrachteten Produktfamilie und ermöglicht über ihre einzelnen Summanden die Identifikation wesentlicher Energietreiber entlang der Prozesskette (**Bild 2**). Das Zahlenbeispiel in der Abbildung zeigt, dass das Montieren aus energetischer Sicht zu vernachlässigen ist, während das Lackieren, trotz in Summe dreifacher Leistung, aufgrund der unterschiedlichen Zeitanteile nur knapp über dem Spritzguss liegt. [4]

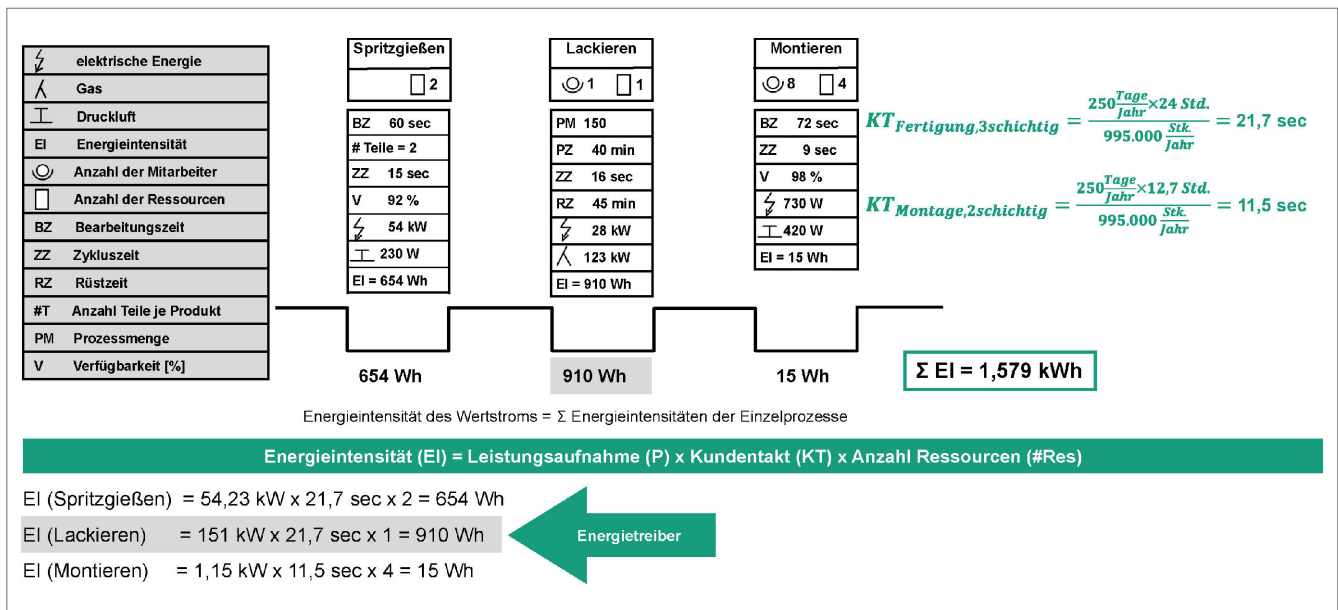


Bild 2 Die Energieintensität entspricht der Summe des produktionsprozessbezogenen Energieverbrauchs für eine Produkteinheit. Grafik: [4]

2.1.2 Energiewertstromdesign und Umsetzung des energieoptimierten Produktionssystems

Im Energiewertstromdesign sind geeignete Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs in den Produktionsprozessen zu identifizieren, zu bewerten und auszuwählen sowie umzusetzen. Dies erfolgt entlang der acht entsprechenden Gestaltungsrichtlinien, darunter die Ausrichtung auf den optimalen Betriebspunkt, die Senkung des Energiebedarfs im Normalbetrieb oder die Minimierung von An-/Abschaltverlusten [4]. Anknüpfungs- und Übergabepunkt an die Energiesystemplanung ist die achte Gestaltungsrichtlinie „Synchronisation von Energiebereitstellung und Energieverbrauch“, da sie unmittelbar auf die Auslegung des Energiesystems abzielt.

Ziel ist eine bedarfsgerechte Bereitstellung der Energie, möglichst durch erneuerbare Energiequellen. Die Erzeugungsstruktur ist hierzu geeignet zu dimensionieren und die gekoppelte Bereitstellung mehrerer Energieformen der getrennten Erzeugung vorzuziehen. In diesem Kontext bieten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen (KWKK) hohe Gesamtwirkungsgrade von bis zu 90 % und je nach System die Möglichkeit, nachhaltige Energieträger (zum Beispiel Biogas, Pflanzenöl) einzusetzen. [4]

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die effiziente Energieverteilung in der Fabrik. Hierzu zählt eine Exergie- und temperaturniveauangerechte Kaskadierung, bei welcher Hochtemperaturwärme zunächst an Prozesse mit entsprechendem Temperaturbedarf geliefert und anschließend über den Rücklauf an Verbraucher mit niedrigerem Temperaturniveau weitergegeben wird. Bei schwankenden Energiebedarfen kann außerdem ein modular aufgebautes Energiesystem sinnvoll sein, das je nach Bedarf stufenweise zu- oder abgeschaltet werden kann [6]. Dies verbessert die Teillastfähigkeit und reduziert zugleich Taktverluste. Wird temporär mehr Energie durch erneuerbare Quellen bereitgestellt, sind Speichertechnologien zu analysieren. Dabei sind lange Speicherzeiten zu vermeiden, da diese die Gesamtverluste erhöhen und damit die Nachhaltigkeitsziele beeinträchtigen. Insgesamt erfordert dies eine sorgfältige Energiesystemauslegung in Verbindung mit einer

geeigneten Betriebsstrategie, die Aspekte wie Speicherung, Lastverschiebung, Abregelung oder Netzeinspeisung berücksichtigt. Um die jeweiligen technologischen Möglichkeiten zu identifizieren, zu bewerten, auszuwählen und zu dimensionieren, ist ein methodisches Vorgehen zur industrielle Energiesystemplanung erforderlich.

2.2 Industrielle Energiesystemplanung

Ein etabliertes methodisches Vorgehen zur industriellen Energiesystemplanung wurde von Emde et al. [7] auf Grundlage von [8, 9] entwickelt und später von Schnell et al. [10] überarbeitet. Das Vorgehen umfasst insgesamt sechs Schritte und beginnt mit der Zielerfassung (Bild 3).

In der Zielerfassung sind die Ziele des Unternehmens in Bezug auf die Energieversorgung zu erfassen. Unterstützen können dabei unterschiedliche Feedbackmethoden wie die Fünf-Finger-Methode, die Zielscheiben-Methode oder die Ampelmethode [11, 12]. Wichtig ist, dass bei der Zielerfassung im Konflikt stehende Zielgrößen, etwa die Wirtschaftlichkeit und die Ökologie des Energiesystems, entsprechend priorisiert und gewichtet werden. Durch die Zielgewichtung kann im späteren Planungsprozess das am besten geeignete Energiesystem eindeutig identifiziert werden. Für die Zielgewichtung kann beispielsweise der „Analytic Hierarchy Process“ nach Saaty verwendet werden [13]. Über die Zielerfassung und -gewichtung hinaus sind im ersten Schritt der Energiesystemplanung Brownfield- und Greenfield-Planungsfall zu unterscheiden. Die Brownfield-Planung nimmt auf einen bereits bestehenden Unternehmensstandort Bezug, der umgebaut, rückgebaut oder revitalisiert werden soll. Dagegen handelt es sich beim Greenfield-Planungsfall um ein Neubauvorhaben, sprich, der geplante Fabrikstandort existiert noch nicht. [14]

Nach der Zielerfassung sind im zweiten Schritt die erforderlichen Daten für die Auslegung des Energiesystems zu erfassen. Neben unternehmensspezifischen Daten, wie den Lastprofilen zu den Energiebedarfen und den aktuellen Energiemarktdaten, sind zudem entsprechende Wetterdaten des Standorts zu ermitteln. Bei

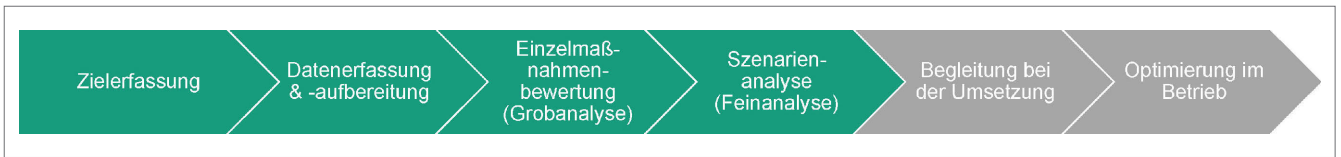


Bild 3 Methodenschritte der industriellen Energiesystemplanung. Grafik: [10]

Tabelle Vergleich der Methode zur Energiesystemplanung nach [10].

Methoden der Energiesystemplanung	Industriebezug	Zielgerichtete Dimensionierung	Variantenvergleich
Vorgehen zur industriellen Energiesystemplanung [7]	●	●	●
Integrated Energy System Planning [21]	●	○	○
Jordanger [22]	○	●	●
Installation Energy Plan [23]	○	●	○
Integrated Energy Planning Process [24]	○	●	○
IEA-Annex-51 [25]	○	●	○
Energy Master Planning Concept [26]	○	●	●
Energy System Development Plan [27]	○	●	○
Electre III [28]	○	○	●

den Lastprofilen ist zu beachten, dass diese nach Energieträgern getrennt zeitaufgelöst vorliegen müssen. Insbesondere im Brownfield-Planungsfall können diese Daten mithilfe geeigneter Messtechnik erfasst werden. Im Greenfield-Planungsfall hingegen müssen entweder analytische Ansätze oder Referenzstandorte verwendet werden, um auf den Energiebedarf des geplanten Unternehmensstandortes zu schließen. Ergänzend sind standortspezifische Randbedingungen wie geographische Gegebenheiten, welche die dezentrale Integration von Energieversorgungstechnologien beeinflussen, zu erfassen. So ist zum Beispiel die maximale Dimensionierung einer Photovoltaikanlage direkt von der am Standort verfügbaren Fläche abhängig. Ein weiteres Beispiel für standortspezifische Randbedingungen wären die einzuhaltenden Regularien, die am Unternehmensstandort herrschen. [10]

Mithilfe dieser Datengrundlage können im dritten Schritt, der Einzelmaßnahmenbewertung (Grobanalyse), einzelne Maßnahmen identifiziert und quantitativ bewertet werden. Einzelmaßnahmen können jegliche Energieversorgungstechnologien sein, die für den Produktionsstandort infrage kommen. Dabei sind die einzelnen Technologien auszulegen, zu modellieren und simulativ zu bewerten. Mögliche Bewertungsgrößen können ökologisch (wie CO₂-Emissionen, Wasserverbrauch), ökonomisch (wie Investition, Amortisation) oder technologisch (wie Autarkiegrad, Eigenverbrauchsquote) sein. Für die Bewertung der betrachteten Maßnahmen wird eine Baseline als Vergleichsmaßstab verwendet. In der Baseline wird die Ist-Situation des Energiesystems (Brownfield-Planungsfall) abgebildet und bewertet. Im Greenfield-Planungsfall kann die Baseline auf Basis des Energiesystems an einem verwendeten Referenzstandort modelliert werden und den bewerteten Einzelmaßnahmen gegenübergestellt werden. [10]

Im vierten Schritt werden anschließend die betrachteten Einzelmaßnahmen zu vollständigen Energiesystemen (in Varianten) kombiniert. Die entwickelten Energiesystemvarianten werden ebenfalls modelliert, bewertet und mit der betrachteten Baseline

verglichen. Der Vergleich der Energiesystemvarianten ermöglicht es den Entscheidungsträgern, ein Energiesystem auszuwählen. Zur Unterstützung der Auswahl im Rahmen der in Schritt 1 definierten Mehrfachzielsetzung können Entscheidungsmethoden für multikriterielle Entscheidungsprobleme aus der Entscheidungstheorie hilfreich sein (etwa Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (Topsis) oder Multi-Attribute Utility Theorie (Maut)) [15]. Ergänzend werden Zukunftsszenarien definiert, in denen zentrale Rahmenbedingungen wie Energiepreise variiert werden. Die erneute Bewertung der Varianten unter diesen Szenariobedingungen erlaubt eine belastbare und zukunftsorientierte Auswahl des Energiesystems. [10]

Durch die getrennte Betrachtung der Einzelmaßnahmen im dritten Schritt und das Zusammenwirken der Einzelmaßnahmen in vollständigen Energiesystemen (vierter Schritt) können Unternehmen abschätzen, welches Optimierungspotenzial die einzelnen Maßnahmen bei der Umsetzung im fünften Schritt mit sich bringen. Auf diese Weise lässt sich beurteilen, welche Eigenschaften (etwa wirtschaftlich, ökologisch) die ausgewählte Energiesystemvariante bei einer sukzessiven Realisierung der Einzelmaßnahmen hätte. [10]

Nachdem das am besten geeignete Energiesystem schließlich umgesetzt ist, wird es kontinuierlich im Betrieb weiter optimiert [10]. In diesem Beitrag, dessen Schwerpunkt auf der Planung industrieller Energiesysteme liegt, werden jedoch die Umsetzung und Betriebsoptimierung (fünfter und sechster Methodenschritt) nicht weiter beleuchtet.

2.3 Forschungslücke

Auch wenn zahlreiche kommerzielle oder auch frei verfügbare Tools zur Modellierung dezentraler Energiesysteme bestehen [16–20], gibt es abgesehen von diesem Vorgehen keine weiteren methodischen Vorgehensweisen zur industriellen Energiesystemplanung, wie in der **Tabelle** dargestellt [10].

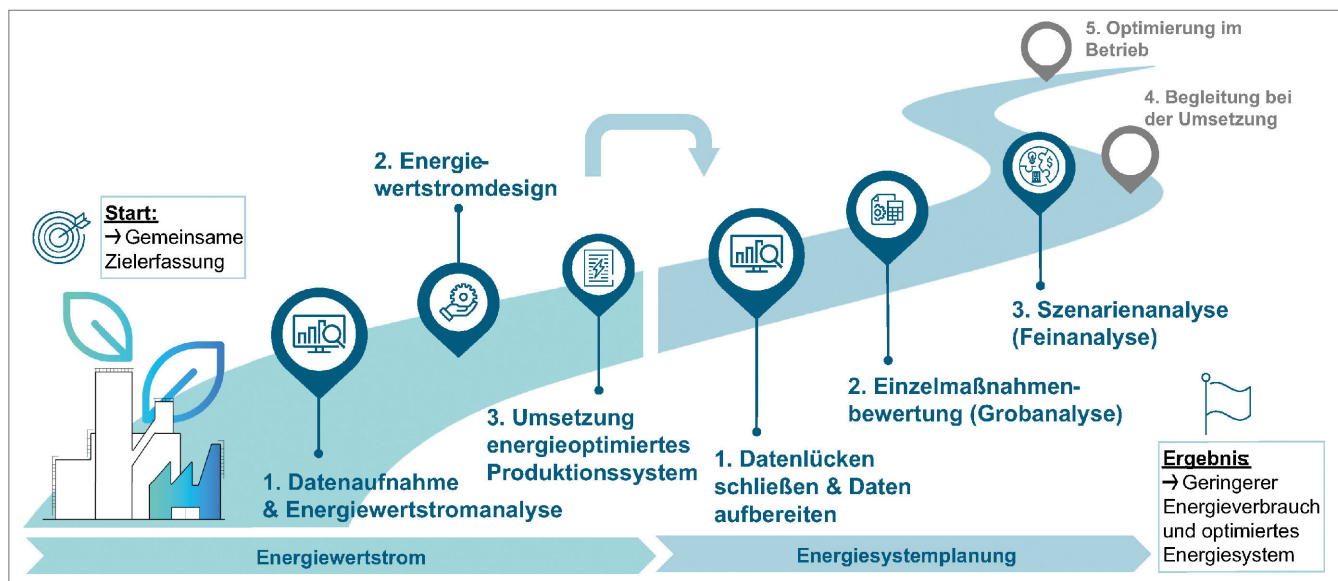


Bild 4 Integration des Energiewertstroms in die industrielle Energiesystemplanung. Grafik: Fraunhofer IPA

Lediglich die Planungsvorgehen von [7, 21] fokussieren sich auf Industrieunternehmen. Weitere Energiesystemplanungsvorgehen besitzen keinen Industriebezug, dimensionieren dennoch aber zielgerichtet und enthalten einen Variantenvergleich [22–28].

In der Praxis werden Energiesysteme oft auf Basis historischer oder grob abgeleiteter Lastprofile ausgelegt, ohne dass vorgelagerte, prozessspezifische Effizienzpotenziale systematisch identifiziert, quantifiziert und in Form optimierter Bedarfsprofile in die Auslegung überführt werden. Umgekehrt liefert die Energiewertstrommethode zwar eine strukturierte Sicht auf Energieverschwendung und Maßnahmen zur Reduktion des Energieeinsatzes, adressiert jedoch die daraus resultierenden Anforderungen an Erzeugungsstruktur, Dimensionierung und Betriebsstrategie des Energiesystems nur indirekt (vor allem an der Schnittstelle „Synchronisation von Energiebereitstellung und -verbrauch“). Damit fehlt ein durchgängiges, methodisch integriertes Vorgehen, das (i) Effizienzmaßnahmen auf Prozessebene belastbar identifiziert, diese in zeitaufgelöste Energiebedarfsprofile übersetzt, (ii) und diese Profile als konsistente Planungsgrundlage für die Bewertung und Dimensionierung von Energiesystemvarianten nutzt. Diese Forschungslücke soll im vorliegenden Beitrag geschlossen werden.

3 Integriertes Vorgehen der Energiesystemplanung mit Energiewertstrom

Um die Vorteile der Energiewertstrommethode mit jenen der industriellen Energiesystemplanung kombinieren zu können, wird im Folgenden ein neues, integriertes Vorgehen beider Methoden vorgestellt (Bild 4).

Da die Energiewertstrommethode Energieeffizienzpotenziale aufzeigt und so die Gesamtenergieeffizienz der Fabrik gesteigert werden kann, sind ihre entsprechenden Methodenschritte vor der Energiesystemplanung durchzuführen. Zu Beginn des Planungsvorhabens werden die Ziele zur Gestaltung von Energiewertstrom und Energiesystem gemeinsam erfasst. Auch in diesem Fall ist zwischen konfligierenden Zielen eine Gewichtung einzuführen. Durch die gemeinsame Zielerfassung kann ein einheitliches Zielverständnis für das Planungsvorhaben sichergestellt werden.

Im ersten Schritt erfolgt nun die Energiewertstromanalyse. Zunächst wird mit geeigneter Messtechnik an den zu betrachtenden Produktionsanlagen die Energieaufnahme über einen definierten Referenzzeitraum gemessen. Dann werden die Produktfamilien wie zuvor beschrieben gebildet und der Ist-Zustand des Prozesses dargestellt. Dabei werden die Energieintensität der einzelnen Produktionsprozesse beziehungsweise des Gesamtprozesses ermittelt. Anhand der Energieintensität werden die Hauptenergietreiber des Prozesses identifiziert, während ein Blick auf die Energieverschwendungsarten aufzeigt, welche Effizienzsteigerung im Vergleich zum Stand der Technik erreicht werden kann. Anschließend wird der Soll-Zustand des Produktionsprozesses entwickelt. Unter Berücksichtigung der zuvor genannten acht Arten der Energieverschwendung werden unter Verwendung der acht Gestaltungsrichtlinien des Energiewertstromdesigns geeignete Energieeffizienzmaßnahmen abgeleitet und umgesetzt.

Sobald das energieoptimierte Produktionssystem definiert ist, wird mit der Energiesystemplanung begonnen. Da die Ziele und ein Großteil der Energiebedarfe der Fabrik im Rahmen des Energiewertstroms bereits erfasst wurden, sind nun primär ergänzende Daten wie die Wetterdaten für die Bewertung erneuerbarer dezentraler Technologien zu erfassen. Beispiele hierfür wären Solarstrahlungsdaten für eine Photovoltaikanlage oder Winddaten für ein Windkrafttrad. Mithilfe von Produktionsplänen kann aus der Datengrundlage des Energiewertstroms der Energiebedarf der Fabrik realitätsnah abgebildet werden. Auf dieser Grundlage werden die Energiesystemmodelle wie zuvor beschrieben aufgesetzt, simulativ bewertet und das zukunftsfähigste Energiesystem ausgewählt. Dafür werden unterschiedliche ökonomische (Investition, Kapitalwert, Amortisation), ökologische (CO₂-Emissionseinsparung, CO₂-Emissionen je MWh Energieeinsatz) und technische Bewertungskriterien (Spitzenleistung am Netzanschlusspunkt, Autarkiegrad, Eigenverbrauchsquote) verwendet.

Dieses integrierte methodische Vorgehen von Energiewertstrom und Energiesystemplanung bietet wesentliche Vorteile für das Energiesystem von Produktionsstandorten. Indem die Energiebedarfe durch Energieeffizienzmaßnahmen reduziert worden sind, kann das Energiesystem bedarfsgerecht ohne Überdimensionierung ausgelegt werden. Gleichzeitig erlauben die auf Produkt-

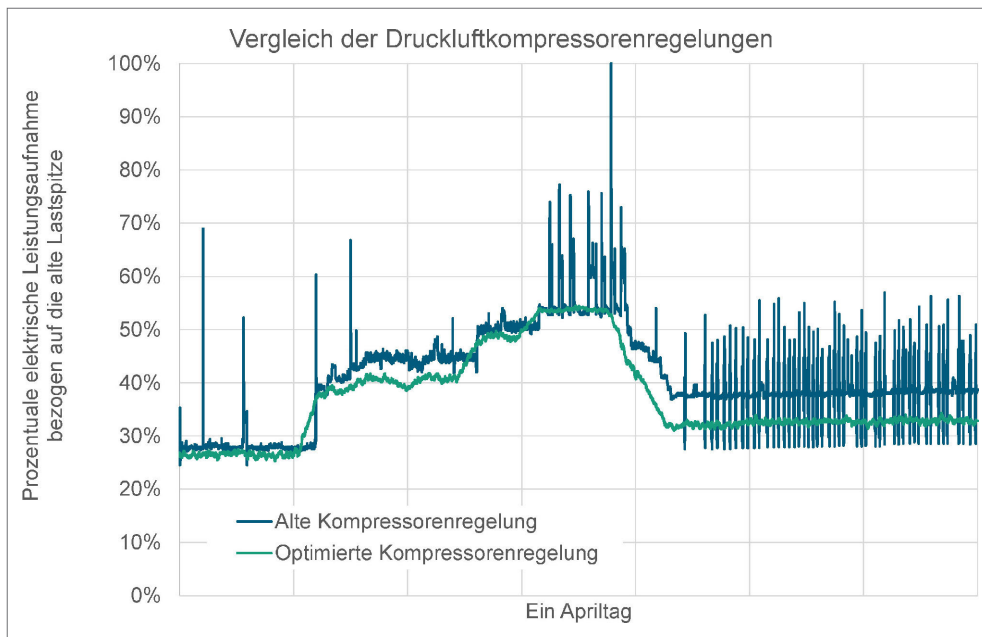


Bild 5 Vergleich der Druckluftkompressorenregelungen.
Grafik: Fraunhofer IPA

familien Ebene erhobenen Energiekennzahlen eine belastbare Prognose der zukünftigen Energiebedarfsentwicklung in Abhängigkeit von der Geschäftsentwicklung. Steigt beispielsweise die Nachfrage nach zuvor als energieintensiv identifizierten Produkten, ist ein steigender Gesamtenergiebedarf zu erwarten, der bei der Dimensionierung erneuerbarer und dezentraler Energiesysteme berücksichtigt werden kann.

Zudem führt die zeitaufgelöste Erfassung der Energiebedarfe im Rahmen der Energiewertstrommethode zu einer höheren Datenqualität für die Energiesystemplanung, da wesentliche Verbrauchsprofile bereits vorliegen. Verbleibende Verbraucher können mit geringem Aufwand ergänzt werden, etwa durch den Abgleich der gemessenen Anlagenbedarfe mit dem Gesamtenergieverbrauch des Standorts. Diese verbesserte Datenbasis unterstützt nicht nur eine präzise Systemauslegung, sondern schafft zugleich die Basis für einen energieeffizienten und netzdienlichen Fabrikbetrieb. Als energieintensiv identifizierte Produktionsschritte lassen sich in Zeitfenster mit geringeren Energiekosten verlagern, während weniger energieintensive Prozesse in Hochpreisphasen durchgeführt werden können. Hier liegt also eine Rückwirkung auf den Energiewertstrom vor (Gestaltungsrichtlinie 7: energieoptimale Produktionsreihenfolge). Dies trägt sowohl zur wirtschaftlichen Optimierung als auch zur besseren Nutzung erneuerbarer Energien bei und stärkt die Fähigkeit der Fabrik, flexibel auf volatile Energiepreise zu reagieren. Damit unterstützt das integrierte Vorgehen nicht nur die Planung eines emissions- und kosteneffizienten Energiesystems, sondern auch dessen energieeffiziente und wirtschaftliche Betriebsführung.

4 Fallstudie: Photovoltaik-Auslegung für optimierte Druckluftherzeugung

Das vorgeschlagene integrierte Vorgehen wurde bei einem Industrieunternehmen angewendet, das auf die Herstellung von Schneid- und Mikrobearbeitungswerkzeugen in Deutschland spezialisiert ist.

Zu Beginn wurde eine Energiewertstromanalyse durchgeführt, in welcher der Energieverbrauch der einzelnen Prozesse hinsicht-

lich Strom, Druckluft und Erdgas messtechnisch erfasst wurde. Als Energietreiber wurden der elektrische Energiebedarf der Werkzeugschleifmaschinen, das Klimatisierungssystem sowie das Druckluftsystem identifiziert, wovon das Druckluftsystem der zentrale Energietreiber mit Effizienzpotenzialen ist. Eine detaillierte Untersuchung ergab, dass die bestehende Steuerung des Druckluftkompressorenverbands ineffizient arbeitet. Auf Grundlage dieser Erkenntnis wurde die Regelungsstrategie des Druckluftsystems simulativ abgebildet und angepasst, um Lastspitzen zu reduzieren und den Betrieb stärker am tatsächlichen Druckluftbedarf auszurichten.

Bild 5 zeigt den Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme der Kompressoren vor und nach der simulativen Regelungsanpassung für einen exemplarischen Apriltag. Dabei ist zu erkennen, dass durch die neue Regelung die Lastaufnahme über den betrachteten Zeitraum hinweg gleichmäßiger verläuft und die energetischen Verluste infolge häufiger Ein- und Ausschaltvorgänge reduziert werden konnten.

Insgesamt konnte eine Effizienzsteigerung des Druckluftsystems von über 9 % erzielt werden. Begleitend wurden im Zuge der Messkampagne systematisch Anomalien detektiert und, wo erforderlich, organisatorische Maßnahmen implementiert, etwa zeitgesteuerte Abschaltungen bei Nichtbetrieb, um den spezifischen Energieeinsatz nachhaltig zu reduzieren.

Basierend auf dem optimierten Energiebedarf der Druckluftkompressoren lässt sich im zweiten Schritt das Energiesystem gemäß den beschriebenen Schritten zielgerichtet auslegen. Es wurde daher eine Variante einer Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage) auf Basis der alten Druckluftkompressorenregelung und eine zweite mit optimierter Regelung betrachtet. Die Analysen zeigen, dass mit optimierter Steuerung ein Autarkiegrad von 40 % bereits mit einer 60 kWp-PV-Anlage erreicht wird, während im Altfall durch die geringere Effizienz über 70 kWp nötig sind, um denselben Autarkiegrad zu erzielen. Diese 70-kWp-PV-Anlage ist durch die standortspezifischen Rahmenbedingungen am Fabrikstandort nicht umsetzbar. Auch wenn die Wirtschaftlichkeit der größeren PV-Anlage gegeben wäre, sind höhere Investitionen für dieselbe Autarkie notwendig und die Energiekostenreduktion durch die

vermehrte Einspeisung überschaubar. Darüber hinaus sinken die jährlichen CO₂-Emissionen trotz kleinerer PV-Leistung um über 5 % durch die beschriebenen Effizienzsteigerungen.

Auch wirtschaftlich ist die Kombination aus kleinerer PV-Anlage und optimierter Regelung überlegen: Die 60-kWp-PV-Anlage amortisiert sich durch die optimierte Druckluftkompressorenregelung und die damit verstärkte Eigenverbrauchsquote des bereitgestellten PV-Stroms nach zwölf Jahren und damit rund drei Jahre früher als mit der alten Druckluftkompressorenregelung. Dabei lägen die Investitionen der 70-kWp-Anlage über 10 % höher als jene der 60-kWp-Anlage, wohingegen die Energiekosten nur rund 5 % sinken. Dennoch wären die CO₂-Emissionen bei der größeren PV-Anlage geringer. Dies ist insbesondere möglich, da bei der kleineren Anlage durch die geglätteten Lastspitzen der PV-Strom anteilig effizienter genutzt werden kann. Diese Ergebnisse unterstreichen die Vorteile des integrierten methodischen Vorgehens. Die simulativ bestimmte, optimierte Druckluftkompressorenregelung muss nun in der realen Produktionsumgebung implementiert und die PV-Anlage installiert werden.

5 Ergebnisse und Ausblick

Der vorliegende Beitrag stellt ein integriertes methodisches Vorgehen aus Energiewertstrommethode und industrieller Energiesystemplanung vor. Durch die Verknüpfung beider Ansätze wird es möglich, zunächst Energieeffizienzpotenziale systematisch zu identifizieren und anschließend das Energiesystem auf Basis realer, optimierter Bedarfsprofile passgenau auszulegen.

Die Fallstudie verdeutlicht die Wirksamkeit dieses Vorgehens: Durch die Optimierung der Druckluftkompressorenregelung konnte der elektrische Energiebedarf reduziert werden, dieselben ökologischen und energetischen Zielgrößen mit einer kleineren PV-Anlage erzielt werden und die Energiekosten der Fabrik gesenkt werden. Das entwickelte Vorgehen bietet die Möglichkeit (i) Effizienzmaßnahmen auf Prozessebene belastbar zu identifizieren, diese in zeitaufgelöste Energiebedarfsprofile zu übersetzen, und (ii) diese Profile als konsistente Planungsgrundlage für die Bewertung und Dimensionierung von Energiesystemvarianten zu nutzen. Damit legt das Vorgehen den Grundstein für den Betrieb effizienter Produktionssysteme in Kombination mit kostenoptimierten Energiesystemen.

Zukünftige Arbeiten sollten die vorgestellte Methode um die Kopplung mit intelligenten Energiemanagementsystemen und einer dynamischen, energieflexiblen Produktionsplanung erweitern. So können Energiebedarfe gezielt an fluktuierende Strompreise und die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien angepasst werden.

Außerdem wird empfohlen, die integrierte Methode um die Betrachtung der CO₂-Emissionen im Sinne des CO₂-Wertstroms zu erweitern [29]. Beide Ansätze stehen in enger Wechselwirkung, da die im Energiewertstrom identifizierten und reduzierten Verluste unmittelbar zur Senkung der CO₂-Intensität beitragen. Dies schafft eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung des digitalen Produktpasses (DPP), der auf europäischer Ebene vorangetrieben wird und eine zentrale Rolle für Transparenz und Nachhaltigkeit industrieller Wertschöpfungsketten einnimmt.

LITERATUR

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz – BMWK: Bundeskabinett verabschiedet umfassendes Klimaschutzprogramm 2023. Stand: 2023. Internet: www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/10/20231004-bundeskabinett-verabschiedet-umfassendes-klimaschutzprogramm-2023.html. Zugriff am 30.01.2026
- [2] Statista: Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren des Klimaschutzgesetzes in den Jahren 1990 bis 2024¹ und Prognose für 2030². Stand: 2026. Internet: de.statista.com/statistik/daten/studie/1241046/umfrage/treibhausgasemissionen-in-deutschland-nach-sektor/. Zugriff am 30.01.2026
- [3] Erlach, K.: Energiewertstrom – Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch Ressourcenorientierte Produktion. München: Carl Hanser Verlag 2014, S. 41–63
- [4] Erlach, K.; Westkämper, E.: Energiewertstrom. Der Weg zur energieeffizienten Fabrik. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2009
- [5] Erlach, K.: Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik. Heidelberg: Springer Vieweg 2020
- [6] Kuhlmann, T.: Methode zur Gestaltung der energetischen Wandlungsfähigkeit in Fabriken. Dissertation, Universität Stuttgart, 2019
- [7] Emde, A.; Schnell, F.; Sauer, A.: Methodisches Vorgehen zur Energiesystemplanung. *wt Werkstattstechnik online* 113 (2023) 01/02, S. 13–17
- [8] Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T. et al.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2009
- [9] Emde, A.; Ritter, M.; Sauer, A.: Methode zur Auslegung von energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeichern. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (2021) 9, S. 613–618
- [10] Schnell, F.; Emde, A.; Sauer, A. et al.: Vergleich von Energiesystemplanungsmethoden/Comparison of planning methods for the energy supply of industrial companies. *wt Werkstattstechnik online* 113 (2023) 11/12, S. 512–517. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [11] Gregory, P.; Lassenius, C.; Wang, X. et al.: *Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming*. Cham: Springer International Publishing 2021
- [12] Schmid, P.: Im Unterricht braucht es «eine kräftige Portion Feedback». *Basler Schulblatt* 81 (2020) 4. doi.org/10.26041/fnwn-3716
- [13] Saaty, R. W.: The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling* 9 (1987) 3–5, pp. 161–176
- [14] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 5200 Blatt 1. *Fabrikplanung – Planungsvorgehen*. Berlin: Beuth Verlag 2011
- [15] Zimmermann, H.-J.; Gutsche, L.: *Multi-Criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*. Heidelberg: Springer-Verlag 1991
- [16] Wirtz, M.: nPro: A web-based planning tool for designing district energy systems and thermal networks. *Energy* 268 (2023), #126575
- [17] Hörsch, J.; Hofmann, F.; Schlachtberger, D. et al.: PyPSA-Eur: An open optimisation model of the European transmission system. *Energy Strategy Reviews* 22 (2018), pp. 207–215
- [18] Pfenninger, S.; Pickering, B.: Calliope: a multi-scale energy systems modelling framework. *Journal of Open Source Software* 3 (2018) 29, #825
- [19] Krien, U.; Schönfeldt, P.; Launer, J. et al.: oemof.solph—A model generator for linear and mixed-integer linear optimisation of energy systems. *Software Impacts* 6 (2020), #100028
- [20] Schnell, F.; Weiner, P.; Sauer, A.: Python-based Industrial Energy System Planning. *Proceedings of the 6th International Conference on Clean and Green Energy Engineering (CGEE 2025)*, Zagreb/Kroatien, 2025, pp. 68–72, doi.org/10.1109/CGEE65971.2025.11327666
- [21] Zhao, J.; Chen, L.; Wang, Y. N. et al.: A review of system modeling, assessment and operational optimization for integrated energy systems. *Science China Information Sciences* 64 (2021) 9, pp. 1–23
- [22] Jordanger, E.; Bakken, B. H.; Holen, A. T. et al.: Energy distribution system planning – methodologies and tools for multi-criteria decision analysis. 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2005). Turin/Italien, doi.org/10.1049/cp:20051355
- [23] Office of the Assistant Secretary of Defense for Energy, Installations and Environment: Subject: Installation Energy Plans. Stand: 2016. Internet: www.acq.osd.mil/eie/ero/ier/docs/ieps/Signed-Installation-Energy-Plan.pdf. Zugriff am 30.01.2026
- [24] ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers: 2014 ASHRAE Winter Conference – Technical Program. Stand: 2014. Internet: www.ashrae.org/file%20library/conferences/conference%20resources/past%20ashrae%20conferences/2014-ashrae-winter-conference-technical-program-new-york--new-york--january-18--24--2014.pdf. Zugriff am 30.01.2026
- [25] International Energy Agency: *Energy Efficient Communities: Case Studies and Strategic Guidance for Urban Decision Makers (Annex*

- 51). Stand: 2014. Internet: iea-ebc.org/Data/publications/EBC_PSR_Anex51.pdf. Zugriff am 30.01.2026
- [26] Zhivov, A.: Energy Master Planning toward Net Zero Energy Resilient Public Communities Guide. Cham, Schweiz: Springer International Publishing 2022
- [27] Power Engineering Society (ETG) des VDE: International ETG Congress 2015 – Die Energiewende: Blueprints for the New Energy Age. International ETG Congress 2015. Bonn/Deutschland. Stand: 2015. Internet: ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7388453. Zugriff am 30.01.2026
- [28] Beccali, M.; Cellura, M.; Mistretta, M.: Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy* 28 (2003) 13, pp. 2063–2087
- [29] Erlach, K.; Sheehan, E.: Die CO₂ – Wertstrom-Methode zur Steigerung von Energie- und Materialeffizienz in der Produktion. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109 (2014) 9, pp. 655–658

Felix Schnell, M.Sc. 


felix.schnell@ipa.fraunhofer.de

Grecia Solis Castillo, M.Sc., MBA 


Dr. Klaus Erlach 

Vincent Bezold, M.Sc. 

Christian Kaucher, M.Sc. 

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl 

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer 

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA 
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)