

**CO<sub>2</sub>-neutrale Fabriken planen**

# Vergleich von Energiesystemplanungsmethoden

F. Schnell, A. Emde, A. Brenner, A. Sauer

**ZUSAMMENFASSUNG** In diesem Beitrag werden unterschiedliche Planungsvorgehen aus verschiedenen Anwendungsfeldern, wie Fabrikplanung, regionale und industrielle Energiesystemplanung sowie Planungsvorgehen für Energieeffizienzmaßnahmen, vorgestellt und miteinander verglichen. Der Fokus liegt dabei auf der Übertragbarkeit von Energiesystemplanungsverfahren auf den Industrieplanungsfall. Zudem werden aus dem Methodenvergleich Planungslücken und damit zukünftige Forschungsfelder im Bereich der industriellen Energiesystemplanung identifiziert.

**Comparison of planning methods for the energy supply of industrial companies**

**ABSTRACT** This paper presents and compares planning methods from different fields of application, such as factory planning, regional and industrial energy system planning, and planning methods for energy efficiency measures. The focus is on the transferability of energy system planning methods to industrial planning cases. In addition, the comparison of methods identifies planning gaps and thus future research areas in the field of industrial energy system planning.

## STICHWÖRTER

Fabrikplanung, Energieeffizienz, Nachhaltigkeit

## 1 Einleitung

Die angestrebte Treibhausgasneutralität Deutschlands bis 2045 macht es notwendig, erneuerbare Energien in die Energieversorgung stärker zu integrieren [1]. Allein die Industrie war 2021 für rund 29 % des Endenergieverbrauchs Deutschlands und damit für einen großen Anteil der Gesamtemissionen verantwortlich [2]. Deswegen steht dieser Sektor vor der Herausforderung, die Energieversorgung CO<sub>2</sub>-frei und zugleich wirtschaftlich zu gestalten. Hierfür ist es wichtig, die industriellen Energieversorgungssysteme sowohl an die individuellen Bedürfnisse als auch an regionale Rahmenbedingungen anzupassen. Damit dies unter Einbindung erneuerbarer Energien gelingen kann, werden methodische Vorgehensweisen benötigt, die den Planungsprozess der industriellen Energieversorgung begleiten. Dabei muss das Vorgehen bei der Energiesystemplanung sowohl für bestehende Fabriken (Brownfield) als auch für Fabrikneuplanungen (Greenfield) anwendbar sein. Dieser Beitrag vergleicht unterschiedliche Planungsmethoden im Kontext der industriellen Energiesystemplanung. Zudem werden innerhalb der Methoden Planungslücken identifiziert, die zukünftig geschlossen werden müssen.

## 2 Ausgangspunkt des Methodenvergleichs

Ausgangspunkt für den Methodenvergleich ist das auf [3, 4] basierende methodische Vorgehen zur Energiesystemplanung (VzE) von Emde *et al.* [5]. Diese Methode plant industrielle Energieversorgungssysteme in fünf Schritten. Zu Beginn werden in einem Kundenworkshop die Ziele des Energiesystems definiert

(1. Schritt) und sogenannte User Stories entwickelt, die beschreiben, welche Ziele mit welchen Energieversorgungstechnologien verfolgt werden sollen (2. Schritt). Dabei wird auch festgelegt, welche Ziele eine übergeordnete Rolle spielen. Ein Beispiel für eine User Story ist es, eine Photovoltaikanlage so auszulegen, dass sie die CO<sub>2</sub>-Emissionen maximal reduziert. Das hat zur Folge, dass die Wirtschaftlichkeit geringer und die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen höher priorisiert wird. [5] Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die fabrikspezifischen Anforderungen an das Energieversorgungssystem erfüllt werden. Daran anschließend wird im 3. Schritt die Datengrundlage geschaffen. Bei der Datenakquise wird in Brown- und Greenfield-Planungsfälle unterschieden und zu beiden Planungsfällen verschiedene Datenbeschaffungsmethoden vorgestellt. Anschließend werden auf Basis der User Stories und der Datengrundlage unterschiedliche Energieversorgungsszenarien erstellt, analysiert, berechnet und simuliert (4. Schritt). Schließlich werden die Energieversorgungsszenarien bewertet und miteinander verglichen, sodass das Energieversorgungsszenario, das die Ziele am besten erfüllt, ausgewählt wird (5. Schritt).

## 3 Methodenvergleich

Um die Vor- und Nachteile des VzE zu identifizieren, werden nun alternative Planungsmethoden vorgestellt und mit dem VzE verglichen. Neben industrieller und kommunaler Energiesystemplanungsmethoden (3.1) werden Methoden zur Ableitung von Energieeffizienzmaßnahmen (3.2) und Fabrikplanungsmethoden (3.3) betrachtet. Bei diesen wird analysiert, wie sie auf die

**Tabelle 1.** Energiesystemplanungsmethoden im Vergleich mit dem VzE.

Methoden	1. Schritt	2. Schritt	3. Schritt	4. Schritt	5. Schritt	6. Schritt	7. Schritt	8. Schritt	9. Schritt
<b>Referenzvorgehen:</b>									
Vorgehen zur Energiesystemplanung [5]	Zieldefinition	User Stories	Datenakquise	Analyse/Berechnung/Auslegung	Bewertung und Vergleich				
<b>Energiesystemplanung:</b>									
Integrated Energy System Planning [6]	Inputgrößen	Integrierte Energiesystemplanungs- & Optimierungsprozesse	Betriebs-simulation						
Jordanger [7]	Problem-formulierung	Daten-erfassung	Analyse möglicher Alternativen	Entscheidung treffen					
Installation Energy Plan [8]	Ziel- und Teamfest-legung	Aufstellung der Baseline	Alternative Szenarien analysieren	Entwicklung und Durch-führung von Aktivitäten	Abschluss-dokumentation	Umsetzung und Über-wachung des Modells			
Integrated Energy Planning Process [9]	Ziel- und Teamfest-legung	Aufstellung der Baseline und Zu-kunftsfälle	Energie-effizienz-maßnahmen	Optimierung der Energie-versorgung und -vertei-lung	Erstellung eines integrierten Plans	Umsetzung			
IEA-Annex-51 [10]	Daten-erfassung	Ziel-festlegung	Bewertung der Chancen und Zunfts-szenarien	Entwicklung eines Ener-gieplans und Nachbar-schafts-ener-gieplänen	Richtlinien, Pro-jekte umsetzen, überwachen, bewerten und anpassen				
Energy Master Planning Concept (Greenfield) [11]	Standort- und Ziel-festlegung	Bestimmung Planungs-grundlage, Bedrohungen und Einwirkungen	Bewertung der Baseline-Widerstands-fähigkeit	Entwurf und Analyse der Wider-standsfähigkeit des Base Case	Planung und Analyse alternativer Konzepte	Vergleich der Konzepte	Abnahme und Umset-zung des finalen Konzepts		
Energy Master Planning Concept (Brownfield) [11]	Festlegung von Rahmen-zielen und Beschränkun-gen	Entwicklung kommunen-über-greifender Lastprofile	Bewertung der Baseline Effizienz und Nachhaltig-keit	Entwurf und Analyse der Effizienz / Nachhaltig-keit des Base Case	Planung und Analyse alternative Kon-zepte	Vergleich der Konzepte	Abnahme und Umset-zung des finalen Konzepts		
Energy System Development Plan [12]	Analyse der aktuellen Situation	Festlegen des Entwick-lungsziels	Entwicklung von Szenarien	Entwicklung des Aktions-plans					
Electre III [13]	Daten-erfassung	Bewertungs-kriterien fest-legen	Zusammen-führung der Kriterien	Gewichtung der Kriterien	Indizes der Über-einstimmung	Index der Nichtüber-einstimmung	Flexibilität in der Rangfolge der Kriterien	Auswahl optimaler Technolo-gie	

Energieeffizienzmaßnahmen:									
Energiewertstrom-methode [14]	IST-Situation bestimmen; Energiewert-stromanalyse	Sollzustand entwickeln; Energiewert-stromdesign	Umsetzung						
Energieaudit [15]	Vorbereitung	Auftaktbe-sprechung	Daten-erfassung	Messplan	Strich-proben-nahmeverfah-ren	Außen-einsatz	Analyse	Bericht	Abschluss-besprechung
Krones Approach [16]	Zieldefinition, Daten-erfassung	Einflussmög-lichkeiten-bestimmung	Ableitung von Maßnahmen	Identifikation von Realisie-rungsinfor-mationen	Überprüfung der Zieleinhaltung und Maßnahmen anpassen				
Fabrikplanung:									
VDI 5200 [17]	Zielfest-legung	Grundlagen-ermittlung	Konzept-planung	Detail-planung	Realisierungs-vorbereitung	Realisie-rungsüber-wachung	Hochlauf-betreuung		
Hopf [18]	Zielfest-legung	Qualitative Modell-bildung	Quantitative Modell-bildung	Analyse und Bewertung	Ableitung von Gestaltungs-an-sätzen				
Dombrowski und Marx [19]	Betriebs-analyse	Grobplanung	Feinplanung	Umsetzung	Betrieb	Stilllegung/ Tuning/ Anpassung			

Energiesystemplanung übertragen werden können. Hierfür sind in **Tabelle 1** die einzelnen Planungsschritte der Methoden den Schritten des VzE zugeordnet. Durch diesen Vergleich werden Planungslücken im VzE herausgearbeitet und so zukünftiger Forschungsbedarf aufgezeigt.

### 3.1 Analyse bestehender Energiesystemplanungsmethoden

Das Integrated Energy System Planning (IESP) ist für Brownfield-Planungsfälle konzipiert. Verglichen mit dem VzE wird der Methodenschritt der Zielerfassung ausgelassen und direkt mit der Datenerfassung gestartet (Lastprofile, Wetterdaten etc.). Anschließend werden ausgewählte Einzelmaßnahmen technisch-wirtschaftlich analysiert (Grobanalyse). Im 3. Schritt werden dann die Einzelmaßnahmen kombiniert und in detaillierten Betriebssimulationen betrachtet (Feinanalyse). Folglich fehlen im IESP gegenüber dem VzE die Methodenschritte „Zielerfassung“, „User Stories“ und „Vergleich der Maßnahmen“. [6]

Die Jordanger-Methode wird für die kommunale Energiesystemplanung genutzt, um in deren Energiesysteme erneuerbare Energien zu integrieren. Wird die Jordanger-Methode mit dem VzE verglichen, so weicht sie im 2. Methodenschritt ab und über-springt den Schritt der User Stories. Stattdessen werden nach der Datenerfassung unterschiedliche Energiesysteme mithilfe von Case Studies (Variation des Strom- und Gaspreises) modelliert und darauf basierend das bestgeeignete Energiesystem ausgewählt. Die Jordanger-Methode wird deshalb meist zur Entscheidungshilfe beziehungsweise zur Konzeptbewertung und nicht zur ganzheitlichen Energiesystemplanung genutzt. [7]

Eine weitere kommunale Energiesystemplanungsmethode ist der Installation Energy Plan (IEP), der, verglichen mit dem VzE, ebenfalls den Methodenschritt der User Stories-Erstellung über-springt. Abgesehen davon weichen die weiteren Schritte nicht voneinander ab. Ergänzend werden jedoch im IEP die Schritte der Abschlussdokumentation (Überprüfung der Zielerreichung) und die Umsetzung der Maßnahmen aufgeführt. [8]

Der Integrated Energy Planning Process (IEPP) ist ebenfalls eine kommunale Energiesystemplanungsmethode. Auch der IEPP wird zur Optimierung eines Energiesystems verwendet. Nach den Schritten der Zieldefinition und der Datenerfassung (Ist-Energie-versorgung) leitet der IEPP Energieeffizienzmaßnahmen für die Ist-Energieversorgung ab. Dann werden alternative Energiever-sorgungstechnologien betrachtet und mit der aktuellen Energie-versorgung verglichen. Das Vorgehen endet mit der Umsetzung der Maßnahmen und der Überprüfung der Zielerreichung. Folglich wird gegenüber dem VzE der Planungsschritt der User Stories weggelassen und die Schritte der Effizienzmaßnahmen-bildung sowie die Begleitung bei der Umsetzung ergänzt. [9]

Eine weitere Energiesystemplanungsmethode, die im Forschungsprojekt „Annex 51“ der International Energy Agency (IEA) entstanden ist, tauscht den 1. und 2. Schritt des VzE, sodass mit der Datenerfassung gestartet wird. Außerdem werden Richtlinien und ähnliche Rahmenbedingungen erst im 5. Schritt (bei der Umsetzung der Maßnahmen) berücksichtigt, wohin-gegen das VzE diese Rahmenbedingungen bereits in den User Stories festhält. Die IEA-Annex-51-Methode wird, wie der IEP und der IEPP, für kommunale Brownfield-Planungsfälle einge-setzt. [10]

Das Energy Master Planning Concept (EMPC) ist in der kommunalen Energiesystemplanung neben Brownfield- auch für Greenfield-Planungsfälle ausgelegt. Während für den Brownfield-Planungsfall vorgeschlagen wird, die Datengrundlage durch den Einsatz von Messtechnik zu erfassen, werden für den Greenfield-Planungsfall keine Methoden zur Datenerfassung vorgestellt. Außerdem unterscheidet sich dieses Vorgehen von den zuvor genannten Planungsmethoden dadurch, dass ein sicheres und ein ökologisches Szenario erstellt wird. Abgesehen davon ähnelt das Vorgehen stark dem VzE. Auch beim EMPC werden zuerst die Ziele und Daten erfasst und daraus unterschiedliche Energieversorgungsszenarien erstellt und berechnet. Im Gegensatz zum VzE wird dieser Methodenschritt in drei Einzelschritte untergliedert (Bewertung der Baseline, Analyse der Widerstandsfähigkeit der Baseline & Planung und Analyse alternativer Energieversorgungskonzepte). Abschließend werden bei beiden Methoden die Energieversorgungskonzepte miteinander verglichen, wobei im EMPC das bestgeeignete Konzept mithilfe einer Umsetzungsstrategie umgesetzt wird. [11]

Eine weitere kommunale Energiesystemplanungsmethode ist der Energy System Development Plan (ESDP). Der ESDP wird bei bestehenden Kommunen angewendet und beginnt mit der Datenerhebung. Daran anschließend werden die Ziele des Energiesystems definiert, was der umgekehrten Reihenfolge des VzE entspricht. Im Vergleich zum VzE wird der Schritt der User Stories weggelassen. Auf die Zielfestlegung aufbauend werden unterschiedliche Energieversorgungsszenarien entwickelt sowie bewertet und zuletzt ein Aktionsplan zu deren Umsetzung erstellt. [12]

„Electre III“ ist eine allgemeingültige Methode zur Entscheidungsfindung, die von *Beccali et al.* [13] für die Energiesystemplanung Sardiniens genutzt wird. Im 1. Schritt werden die vorhandenen Daten erfasst. Daran anschließend werden Bewertungskriterien für die Energieversorgung festgelegt (etwa Einsparung Primärenergie, Flächenbedarf) und innerhalb von drei definierten Entscheidungsräumen (umweltorientiertes, wirtschaftlich orientiertes und energetisch orientiertes Szenario) nach ihrer Wichtigkeit geordnet (3. – 5. Schritt). Abschließend werden die Energietechnologien anhand der Bewertungskriterien bewertet (5. – 7. Schritt) und das am besten geeignete Szenario im vorliegenden Entscheidungsräum umgesetzt (8. Schritt). [13]

Neben den vorgestellten Energiesystemplanungsmethoden gibt es weitere Methoden zur Ableitung von Energieeffizienzmaßnahmen. Anschließend werden einige Methoden vorgestellt und gezeigt, wie die Vorgehensweisen auf die industrielle Energiesystemplanung übertragen werden können. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den folgenden Ausführungen lediglich um eine Möglichkeit der Übertragung handelt, was nicht bedeutet, dass andere Übertragungsvarianten unzulässig sind.

### **3.2 Übertragung von Methoden zur Ableitung von Energieeffizienzmaßnahmen auf die industrielle Energiesystemplanung**

Die Energiewertstrommethode (EWM) [14] ist eine Methode zur ganzheitlichen Erfassung, Bewertung und Optimierung des produktionsbezogenen Energieverbrauchs, indem geeignete Energieeffizienzmaßnahmen identifiziert werden. Daher ist sie auf Brownfield-Planungsfälle beschränkt und könnte wie folgt auf die industrielle Energiesystemplanung übertragen werden. Im 1. Schritt, der Bestimmung der Ist-Situation, wird analog zum

3. Schritt des VzE die Datengrundlage der Fabrik erfasst. Darauf basierend wird das ideale Energieversorgungssystem als Art Zielfestlegung erstellt (1. Schritt des VzE) und ausgehend davon alternative, realisierbare Energieversorgungsszenarien gebildet, wobei die User Stories nicht abgedeckt werden. Im 3. und letzten Schritt wird das bestgeeignete, realisierbare Energieversorgungszenario umgesetzt.

Das Energieaudit nach DIN EN 2016247-1 [15] zählt ebenfalls zu den Methoden der Ableitung von Energieeffizienzmaßnahmen, das bei Brownfield-Planungsfällen genutzt wird. In den ersten beiden Schritten können die Ziele des Energiesystems festgelegt werden. Daran anschließend ist die Datengrundlage des Standorts zu erfassen (3. – 6. Schritt), bevor im 7. Schritt die Analyse/Berechnung/Auslegung der Energieszenarien erfolgt. Die letzten beiden Schritte „Bericht“ und die „Abschlussbesprechung“ sind keinen Schritten des VzE zuordenbar.

Das „Krones Approach“ [16] ist, wie die EWM, eine Methode zur Ableitung von Energieeffizienzmaßnahmen, die bei Brownfield-Planungsfällen Anwendung findet. Die Schritte dieser Methode sind nahezu analog zum VzE auf die industrielle Energieversorgung übertragbar. Im 1. Schritt werden die Ziele definiert und die Datengrundlage erfasst. Der 2. Schritt des VzE (User Stories) wird übersprungen und stattdessen, auf der Zieldefinition aufbauend, mögliche Maßnahmen identifiziert, berechnet und bewertet. Zuletzt werden die Maßnahmen miteinander verglichen und ergänzend Realisierungsinformationen erfasst.

Die bisher vorgestellten Methoden lassen sich zwar auf die industrielle Energiesystemplanung übertragen, jedoch ist einzig das EMPC auf Brown- und Greenfield-Planungsfälle anwendbar. Aus diesem Grund werden im Folgenden Fabrikplanungsmethoden vorgestellt, die nicht aus dem Kontext der Energiesystemplanung stammen. Neben ihrer Vorstellung wird gezeigt, wie sie auf die industrielle Energiesystemplanung übertragen werden können.

### **3.3 Übertragung von Fabrikplanungsmethoden auf die industrielle Energiesystemplanung**

Da keine der anschließend vorgestellten Fabrikplanungsmethoden die Planung des Energieversorgungssystems berücksichtigt, wird gezeigt, wie sich die einzelnen Fabrikplanungsmethoden auf die Energiesystemplanung übertragen lassen. Bei der Übertragung werden die Schritte der Fabrikplanung ersetzt, sprich, das eigentliche Ziel der Fabrikplanung nicht weiterverfolgt.

Als erste Fabrikplanungsmethode ist das Vorgehen nach VDI 5200 [17] zu nennen, die bei Brown- und Greenfield-Planungsfällen genutzt werden kann. Auch die Fabrikplanung der VDI 5200 beginnt mit der Zielfestlegung, die analog zum VzE auf die Energiesystemplanung übertragen wird. Daran anschließend werden die User Stories übersprungen und die Datengrundlage erfasst. Im 3. Schritt (Konzeptplanung) werden einzelne Energieversorgungsmaßnahmen (Photovoltaik, Windkraft etc.) dimensioniert und bewertet, aus denen in der Detailplanung Energieversorgungsszenarien entwickelt werden (Berücksichtigung des Zusammenspiels der Technologien). Das bedeutet, dass der 4. Schritt des VzE in zwei Einzelschritte aufgeteilt wird. Abschließend wird in den weiteren Planungsschritten die Umsetzung geplant und durchgeführt.

Eine weitere Vorgehensweise zur Fabrikplanung schlägt *Hopf* [18] vor. Auch hier wird der 1. Schritt auf die Zielerfassung des

**Tabelle 2.** Gruppierung der Planungsmethoden nach deren Planungsfällen.

Brownfield	Brown- und Greenfield	Greenfield
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integrated Energy System Planning</li> <li>- Jordanger</li> <li>- Installation Energy Plan</li> <li>- Integrated Energy Planning Process</li> <li>- IEA Annex 51</li> <li>- Energy System Development Plan</li> <li>- Electre III</li> <li>- Energiewertstrommethode</li> <li>- Energieaudit</li> <li>- Krones Approach</li> <li>- Fabrikplanung nach <i>Dombrowski und Marx</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vorgehen zur Energiesystemplanung</li> <li>- Energy Master Planning Concept</li> <li>- VDI 5200</li> <li>- Fabrikplanung nach <i>Hopf</i></li> </ul>	-

Energiesystems übertragen, wohingegen der 2. und 3. Schritt des VzE, die User Stories und die Datenerfassung, übersprungen werden. Stattdessen schließt die qualitative und quantitative Modellbildung an die Zielerfassung an, was als Methode der Datenerfassung verstanden werden kann. Der 4. Methodenschritt fasst mit der Analyse und Bewertung den 4. und 5. Schritt des VzE zusammen. Zudem ergänzt *Hopf* die Planung der Umsetzung in einem 5. Schritt.

Als letzte Fabrikplanungsmethode wird das Vorgehen nach *Dombrowski und Marx* [19] vorgestellt. Bei dieser Methode wird das Ziel nicht festgelegt, sondern es werden, ausgehend von im Betrieb erfassten Daten, Grob- und Feinplanungsschritte durchgeführt. Diese könnten, wie schon bei der Übertragung der VDI 5200 auf die Energiesystemplanung, in die Einzelmaßnahmenbewertung und die Energieversorgungsszenarien-Analyse übertragen werden. Die letzten drei Schritte Umsetzung, Betrieb und Anpassung/Stillegung/Tuning werden hingegen im VzE nicht berücksichtigt.

## 4 Fazit

In **Tabelle 2** sind die zuvor vorgestellten Planungsmethoden nach ihren Planungsfällen gruppiert. Auffällig ist, dass viele Methoden zur Brownfield-Energiesystemplanung genutzt werden können, wohingegen keine Methode für den reinen Greenfield-Planungsfall existiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Fabrikneuplanungen (Greenfield-Planungsfall) meist keine Datengrundlage verfügbar ist. Anders als bei der Brownfield-Fabrikplanung ist unklar, wie die Lastbedarfe der zukünftigen Fabrik konkret aussehen werden. Insbesondere für die thermische Lastprofilgenerierung von Fabriken existieren bisher kaum Vorgehensweisen. Dies erschwert die industrielle Energiesystemplanung erheblich. Folglich müssen industrielle Energiesystem-

planungsvorgehen neben den Methoden für die Brownfield-Datenerfassung auch Methoden für den Greenfield-Planungsfall enthalten.

Aus dem vorangegangenen Methodenvergleich wird neben den unterschiedlichen Planungsfällen deutlich, dass bei den vorgestellten Planungsmethoden, selbst innerhalb gleicher Anwendungsbereiche, die Abfolge und der Nutzen einzelner Methodenschritte variiert. Aus diesem Grund wird aus den betrachteten Planungsmethoden, ausgehend vom VzE, ein konsolidiertes Vorgehen zur industriellen Energiesystemplanung vorgeschlagen (**Bild**). Zunächst wird der 1. Schritt des VzE (Zielerfassung) unverändert übernommen, da neun der 15 betrachteten Methoden mit der Zielerfassung beginnen. Der 2. Schritt, die „User Stories“, wird hingegen in keinem anderen Planungsverfahren explizit durchgeführt, sondern mit der Zielerfassung bereits miterfüllt. Deshalb wird er mit der Zielerfassung im 1. Schritt zusammengefasst und direkt zum 3. Schritt, der Datenerfassung übergegangen. Der anschließende 4. Schritt des VzE „Analyse/Berechnung/Auslegung“ wird in zwei Einzelschritte, die Einzelmaßnahmenbewertung (Grobanalyse) und die Szenarienanalyse (Feinanalyse) unterteilt, wie es im IESP, der VDI 5200 und der Fabrikplanung nach *Dombrowski und Marx* praktiziert wird. Dadurch ist es möglich, die betrachteten Maßnahmen (Technologien wie etwa Photovoltaik) im 3. Schritt zunächst einzeln zu bewerten und anschließend, im 4. Schritt, das Zusammenspiel der Maßnahmen zu simulieren und zu bewerten. Auf diese Weise wird die Bewertung und der Vergleich in beide Schritte direkt integriert. Abschließend werden zwei zusätzliche Schritte „Begleitung bei der Umsetzung“ und „Optimierung im Betrieb“ ergänzt (übernommen von IEP, IEPP, IEA Annex 51, EMPC, EWM, Krones Approach, der VDI 5200 und der Fabrikplanung nach *Dombrowski und Marx*). Darin wird das Projekt während der Umsetzung betreut und kontrolliert, ob die Ziele erfüllt sind, sodass gegebenenfalls weitere Optimierungen im Betrieb durchgeführt werden.

Der Fokus des hier vorgeschlagenen Vorgehens liegt auf der reinen Energiesystemplanung der Fabrik. Werden ergänzend die betrachteten Planungsmethoden anhand deren Anwendungsfeldern gruppiert, so wird deutlich, dass kein Vorgehen zur integrierten Planung von Fabriken mit deren Energiesystemen existiert (**Tabelle 3**). Hier müssen zukünftig Planungsmethoden entwickelt werden, die die Fabrikplanung mit der zugehörigen Energiesystemplanung kombinieren.

## 5 Ausblick

Die einzelnen Methodenschritte des hier vorgeschlagenen Vorgehens zur industriellen Energiesystemplanung müssen zukünftig weiter ausdetailliert werden. Während eine übergeordnete Planungsmethode zur Energiesystemplanung gefunden wurde, ist die konkrete inhaltliche Ausgestaltung der Schritte noch offen. Insbesondere für den Schritt der Datenerfassung für Greenfield-Planungsfälle werden umfassendere Methoden zur Lastprofil-

**Bild.** Vorgeschlagenes Vorgehen zur industriellen Energiesystemplanung. *Grafik: Fraunhofer IPA*

**Tabelle 3.** Gruppierung der Planungsmethoden nach deren Anwendungsfeldern.

Fabrikplanung	Energiesystemplanung		Energieeffizienzmaßnahmen
	Industriell	Kommunal	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– VDI 5200</li> <li>– Fabrikplanung nach Hopf</li> <li>– Fabrikplanung nach Dombrowski und Marx</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Vorgehen zur Energiesystemplanung</li> <li>– Integrated Energy System Planning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Jordanger</li> <li>– Installation Energy Plan</li> <li>– Integrated Energy Planning Process</li> <li>– IEA Annex 51</li> <li>– Energy Master Planning Concept</li> <li>– Energy System Development Plan</li> <li>– Electre III</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Energiewertstrommethode</li> <li>– Energieaudit</li> <li>– Krones Approach</li> </ul>

generierung benötigt. Darüber hinaus werden bei Brownfield-Planungsfällen Methoden benötigt, um fehlerhafte Daten zu erkennen und zu korrigieren. Zudem wurde gezeigt, dass es derzeit kein integriertes Vorgehen zur Fabrik- und Energiesystemplanung gibt. Hier sind ebenfalls Planungsmethoden zu entwickeln, die die Fabrikplanung mit der zugehörigen Energiesystemplanung vereinen.

#### L i t e r a t u r

- [1] Bundesregierung: Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). Stand: 04.07.2023. Internet: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672?view=renderNewsletter-rHTML>. Zugriff am 04.07.2023
- [2] Umweltbundesamt: Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. Stand: 17.03.2023. Internet: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energieverbrauch-nach-energietaegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren>. Zugriff am 04.07.2023
- [3] Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T. et al.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin, Heidelberg: Springer 2009
- [4] Emde, A.; Ritter, M.; Sauer, A.: Methode zur Auslegung von energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeichern. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 116 (2021) 9, S. 613–618
- [5] Emde, A.; Schnell, F.; Sauer, A.: Methodisches Vorgehen zur Energiesystemplanung/Methodological approach to energy system planning. wt Werkstattstechnik online 113 (2023) 01–02, S. 13–17
- [6] Zhao, J.; Chen, L.; Wang, Y. et al.: A review of system modeling, assessment and operational optimization for integrated energy systems. Science China Information Sciences 64 (2021) 9
- [7] 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, Italy, 2005, v5–73-v5–73
- [8] Office of the assistant Secretary of Defense: Signed Installation Energy Plan (2016)
- [9] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; ASHRAE Winter Conference: ASHRAE winter conference. January 18–22, 2014, New York, New York ; [technical papers]. Atlanta, Ga.: ASHRAE 2014
- [10] Case Studies and Guidelines for Energy Efficient Communities. A Guidebook on Successful Urban Energy Planning. Bonn: Fraunhofer IRB 2013
- [11] Zhivov, A.: Energy Master Planning toward Net Zero Energy Resilient Public Communities Guide. Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer 2022
- [12] Energietechnische Gesellschaft: Proceedings of International ETG Congress 2015. Die Energiewende – blueprints for the new energy age: date: 17–18 Nov. 2015. Piscataway, NJ: IEEE 2015
- [13] 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, S. 2063–2087
- [14] Erlach, K.: Energiewertstrom. Der Weg zur energieeffizienten Fabrik. Stuttgart: Fraunhofer 2009
- [15] Deutsche Norm: Energieaudits – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- [16] Krones, M.: A Method to Identify Energy Efficiency Measures for Factory Systems Based on Qualitative Modeling. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2017
- [17] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 5200 – Blatt 1. Fabrikplanung Planungsvorgehen. Berlin: Beuth Verlag 2011
- [18] Hopf, H.: Methodik zur Fabrikssystemmodellierung im Kontext von Energie- und Ressourceneffizienz. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2016
- [19] Dombrowski, U.; Marx, S.: Klimalng – Planung klimagerechter Fabriken. Berlin, Heidelberg: Springer 2018

F e l i x   S c h n e l l ,   M . S c .

D r . - I n g .   A l e x a n d e r   E m d e

P r o f .   D r . - I n g .   D i p l . - K f m .  
A l e x a n d e r   S a u e r

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
Tel. +49 711 / 970-3893  
felix.schnell@ipa.fraunhofer.de  
[www.ipa.fraunhofer.de](http://www.ipa.fraunhofer.de)

A n n a   B r e n n e r ,   B . S c .

P r o f .   D r . - I n g .   D i p l . - K f m .  
A l e x a n d e r   S a u e r

Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP)  
Universität Stuttgart  
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
[www.eep.uni-stuttgart.de](http://www.eep.uni-stuttgart.de)

#### L I Z E N Z



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