

Digitalisierung und Energiesystemtransformation – Chancen und Herausforderungen



Fraunhofer ISE
Prof. Dr. Hans-Martin Henning
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

DLR
Prof. Dr. Carsten Agert
carsten.agert@dlr.de

Dr. Thomas Vogt
t.vogt@dlr.de

Fraunhofer IEE
Prof. Dr. Kurt Rohrig
kurt.rohrig@iee.fraunhofer.de

ISFH
Dr. Raphael Niepelt
niepelt@isfh.de

KIT
Prof. Dr. Wolf Fichtner
wolf.fichtner@kit.edu

UFZ
Prof. Dr. Erik Gawel
erik.gawel@ufz.de

WI
Prof. Dr. Manfred Fischedick
manfred.fischedick@wupperinst.org

Welche Rolle spielt die Digitalisierung mit der Vielzahl ihrer Methoden und Anwendungen für die Energiewende – also für die Transformation unseres Energiesystems im Sinne der vereinbarten Klimaschutzziele? Ist sie notwendige Voraussetzung für den Systemumbau und ermöglicht beispielsweise erst den Übergang auf ein nahezu vollständig erneuerbares Energiesystem (Enabler) oder ist sie lediglich ein nützliches, den Umbau beschleunigendes Hilfsmittel (Facilitator)? Welche Veränderungen sind durch die Ziele der Energiewende getrieben und welche durch die Verbreitung von Techniken der Digitalisierung? All dies waren Fragen, die im Rahmen der Jahrestagung 2018 des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien unter dem Titel „Die Energiewende – smart und digital“ behandelt wurden. Dieser einführende Beitrag versucht einige Anhaltspunkte zur Beantwortung dieser Fragen zu liefern und in das Thema einzuführen.

Energiesystemtransformation und resultierende Systemkomplexität

Insbesondere für den Bereich von Stromerzeugung und -nutzung spielt die Digitalisierung eine wichtige Rolle. Nahezu sämtliche Studien, die Klimaschutzkompatible Entwicklungspfade unseres Energiesystems beschreiben, sehen Wind- und Solarenergie als wesentliche Pfeiler der zukünftigen Stromerzeugung.

Zugleich ist auf Grund der wachsenden Nutzung von Strom in Sektoren, die heute überwiegend direkt fossile Energieträger nutzen, ein Steigen des zukünftigen Stromverbrauchs zu erwarten – selbst dann, wenn es gelingt Strom in seinen klassischen Anwendungsbereichen effizienter zu nutzen.

Beispielhaft sollen hier einige Ergebnisse herangezogen werden, die im Rahmen der Arbeitsgruppe „Sektorkopplung“ des BMBF-geförderten Projekts „ESYS – Energiesysteme der Zukunft“ entstanden sind, das von den deutschen Wissenschaftsakademien unter Federführung von acatech durchgeführt wird. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden u. a. Modellrechnungen für unterschiedliche mögliche Ausprägungen des deutschen Energiesystems durchgeführt, für die zentrale Randbedingungen nachfolgend tabellarisch erfasst werden (► **Tabelle 1**).

Die Modellrechnungen basieren auf einer stundengenauen Betrachtung des deutschen Energiesystems einschließlich aller Verbrauchssektoren, Energieträger und Infrastrukturen. Im Modell erfolgt eine kostenoptimierte Bestimmung der Entwicklung der Mengengerüste aller wesentlichen technischen Komponenten bis zum Jahr 2050, unter Berücksichtigung typischer Reinvestitionszyklen auf Basis des heutigen Bestands. Zur detaillierten Darstellung der Annahmen, Vorgehensweisen und Ergebnisse wird auf die Publikationen [1] verwiesen.

Tabelle 1
**ausgewählte
Rahmenbedingungen
für verschiedene
Modellrechnungen**

Modellrechnung	CO ₂ -Ziel	wesentliche Charakteristika
keine Restriktionen	Minus 85 % im Jahr 2050 (verglichen mit 1990)	• keine Begrenzung direkter Stromnutzung (z.B. Wärmepumpen, Verkehr)
Wasserstoff		• hoher Wasserstoffanteil im Verkehr (Brennstoffzellen-Antriebe) • hoher Anteil von H ₂ im Gasnetz
Power to-Gas Power-to-Liquid (P2G/P2L)		• hoher Anteil von Methan bzw. flüssigen Kraftstoffen im Autoverkehr • Methannutzung auch noch in Gebäuden • Effizienzgewinne im Bereich der Industrie
Hocheffizienz		• keine Begrenzung direkter Stromnutzung • wesentliche Fortschritte bei der Implementierung von Effizienztechnologien • wesentliche Fortschritte Reduktion Verbrauch

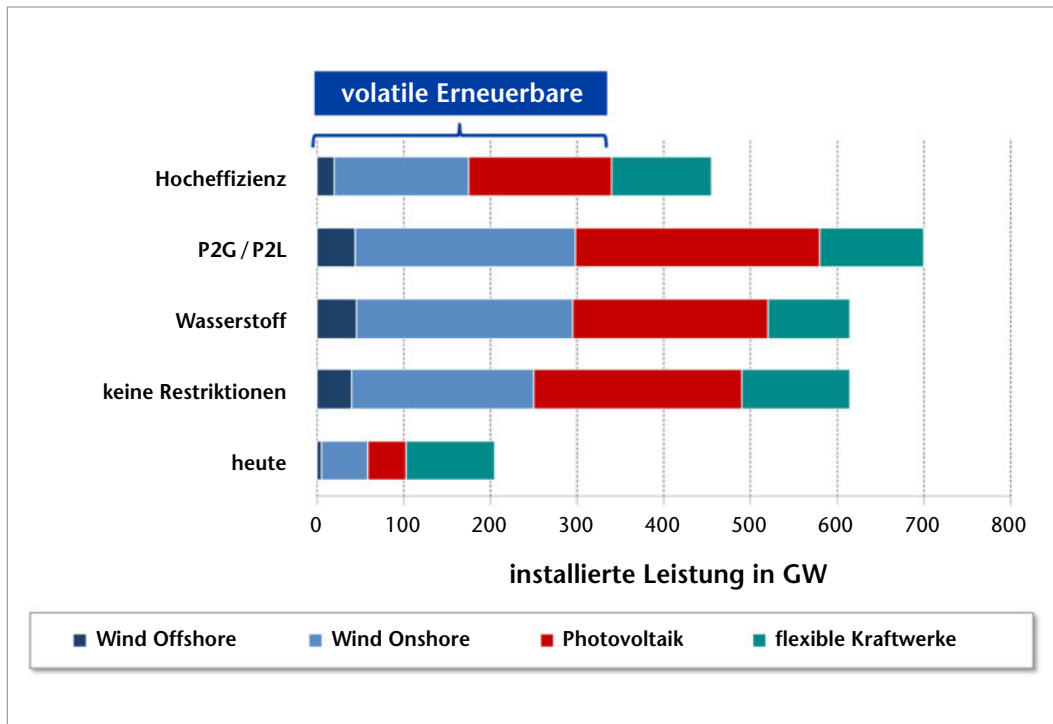


Abbildung 1
installierte Leistung
von Wind- und Photovoltaikanlagen sowie regelbarer Kraftwerke im Jahr 2050 für ausgewählte Modellrechnungen

Abbildung 1 zeigt die installierte Leistung von Wind- und Photovoltaikanlagen sowie regelbarer Kraftwerke zur Stromerzeugung für die ausgewählten Modellrechnungen im Jahr 2050.

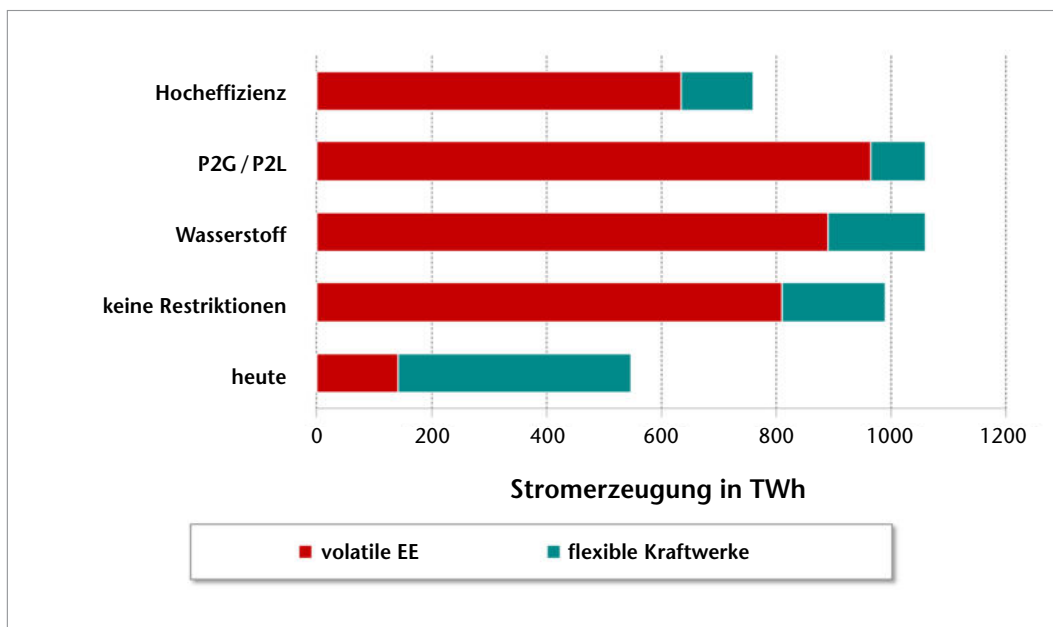


Abbildung 2
Jährliche Stromerzeugung
volatiler erneuerbarer Energien sowie regelbarer Kraftwerke im Jahr 2050 für ausgewählte Modellrechnungen

Abbildung 2 stellt die jährliche Stromerzeugung dar, aufgeteilt nach volatilen erneuerbaren Energien und regelbaren Kraftwerken. Es wird deutlich, dass Wind- und Solarenergie die Stromerzeugung dominieren, dass allerdings für alle betrachteten Randbedingungen auch im Jahr 2050 eine ähnlich hohe Leistung regelbarer Kraftwerke benötigt wird wie heute. Der Strombedarf steigt je nach Randbedingungen um 50% bis 100% im Vergleich zum heutigen Wert; die größte Strommenge wird unter Randbedingungen benötigt, die sich durch eine umfangreiche Nutzung synthetischer Brennstoffe auszeichnet, die auf Basis erneuerbaren Stroms hergestellt werden.

Abbildung 3
**Stromverwendung
 im Jahr 2050**
 für ausgewählte
 Modellrechnungen

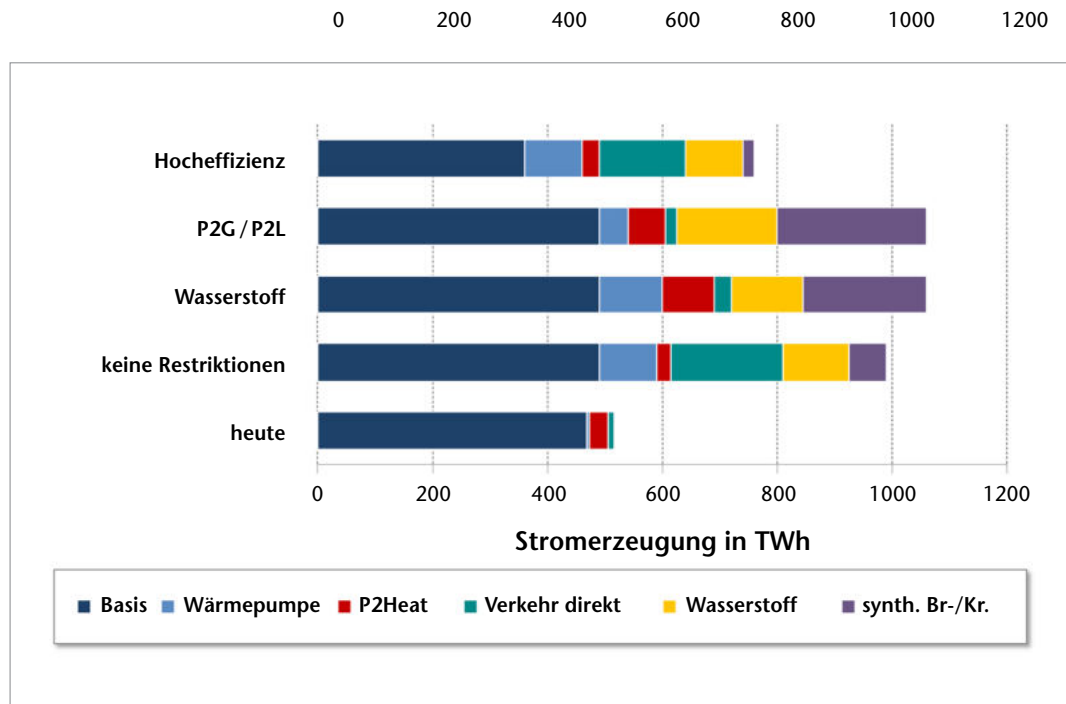
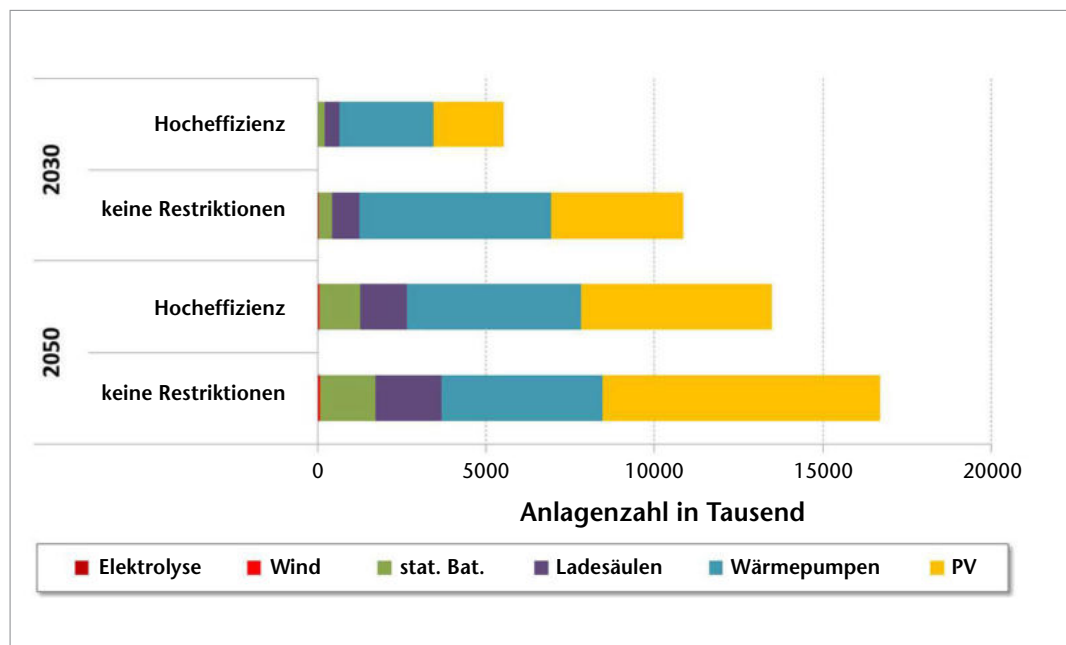


Abbildung 3 macht deutlich, dass vor allem die verstärkte Nutzung von Strom in den Sektoren Wärme und Verkehr wesentlich für einen stark zunehmenden Strombedarf verantwortlich ist. Dies betrifft sowohl die direkte Stromnutzung, z. B. für die Wärmeversorgung mit Wärmepumpen oder Fahrzeuge mit

Elektromotor, als auch die indirekte Stromnutzung in Form von Wasserstoff oder synthetischen Brennstoffen, die auf Basis erneuerbaren Stroms hergestellt werden und in unterschiedlicher Weise für die Energieversorgung, aber auch als Ausgangsprodukt für die Industrie genutzt werden.

Abbildung 4
**Mengengerüste
 wesentlicher Anlagen
 im deutschen Stromnetz**
 (auf unterschiedlichen
 Spannungsniveaus)
 in den Jahren 2030
 und 2050 für zwei
 ausgewählte Modell-
 rechnungen. Hinsichtlich
 der Anlagenzahl
 dominieren diejenigen
 Technologien, bei denen
 viele Anlagen kleiner
 Leistung im kW-Maßstab
 beteiligt sind; hier
 handelt es sich vorrangig
 um Anlagen in oder an
 Gebäuden.



Aus den Modellrechnungen lassen sich Mengengerüste für wesentliche Anlagen zur Stromerzeugung und -nutzung ableiten. Dies ist für Ergebnisse zweier ausgewählter Modellrechnungen für die Jahre 2030 und 2050 in *Abbildung 4* dargestellt. Es wird deutlich, dass insbesondere Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen, stationäre Batteriespeicher und Ladesäulen

für Elektrofahrzeuge – also technische Anlagen, bei denen viele auch im Bereich sehr kleiner Leistungen installiert sind – die Gesamtzahl dominieren. Insgesamt ist bei den hier beispielhaft unterstellten Randbedingungen damit zu rechnen, dass im Jahr 2030 rund sechs bis zehn Millionen Einzelanlagen innerhalb des deutschen Stromnetzes betrieben

werden und im Jahre 2050 mit rund zwölf bis siebzehn Millionen noch einmal mit einer deutlich höheren Zahl zu rechnen ist. Dies korrespondiert mit rund 500 GW bis 800 GW installierter Leistung für Leistungselektronik-Komponenten im Netz für Erzeuger, als Speicher und Anlagen bei den Verbrauchern (ohne Anlagen der Netztechnik wie Transformatoren und ohne Anlagen heutiger Einsatzbereiche von Leistungselektronik wie Frequenzwandler an Elektromotoren).

Die resultierende große Anzahl an Anlagen im Stromnetz an sich wäre noch kein notwendiger Grund für eine datenbasierte Vernetzung all dieser Anlagen. Der große Beitrag volatiler, nicht regelbarer erneuerbarer Energien für die Stromerzeugung bedingt jedoch einen Paradigmenwechsel des heute immer noch stark auf zentralen Kraftwerken basierenden Versorgungsmodells. Die bedarfsgerechte Energiebereitstellung durch Großkraftwerke in der Vergangenheit wird zukünftig zunehmend ersetzt durch ein System, in dem fortwährend ein Ausgleich zwischen (volatiler) Bereitstellung und (notwendigerweise flexiblerer) Nutzung erfolgt.

Hieraus entsteht ein komplexes Zusammenspiel aus zeitlich angepasster Energienutzung, der stärkeren Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr, dem temporären Einsatz flexibler Erzeugungsanlagen und von Speichern verschiedener Bauformen. Die Einbeziehung moderner Prognosemethoden für Erzeugung und Verbrauch ergänzt Organisation und Management dieses komplexer werdenden Systems. Der effiziente Betrieb dieses komplexen Systems, an dem derart viele Einzelanlagen beteiligt sind, die je nach Stromangebot ihr Verhalten ausrichten, ist

schwer vorstellbar ohne die umfangreiche Nutzung von Techniken und Methoden der Digitalisierung.

Die Komplexität des Gesamtsystems steigt im Übrigen noch an, wenn die Regulierungsebene berücksichtigt wird: Einerseits muss Regulierung auf technische Komplexitäten angemessen reagieren, andererseits erhöhen die Eigendynamiken auf der politischen Ebene – etwa die Heterogenität der Regulierung in der EU – selbst wieder die Systemkomplexität [2]. Insofern erweist sich die Digitalisierung als ein Enabler für das zukünftige Energiesystem, da sie eine effiziente und intelligente Organisation erst ermöglicht – wie auch immer diese im Detail ausgestaltet sein wird.

Digitalisierung im Kontext der Energiesystemtransformation

Betrachtet man genauer, welche Nutzungsmöglichkeiten moderner Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) für die zukünftige Energieversorgung möglich erscheinen, so ergibt sich ein unübersichtliches Bild, da zur Zeit eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden in ganz unterschiedlichen Anwendungskontexten diskutiert werden. In *Abbildung 5* wird der Versuch unternommen, die vielfältigen Dimensionen der Nutzungsmöglichkeiten von Techniken der Digitalisierung im Kontext der Energieversorgung zu systematisieren.

Anwendungsfelder finden sich in allen Bereichen der Energiewirtschaft, von der Erzeugung über Transport und Verteilung, Vertrieb und Handel bis hin zur Speicherung und der Verbrauchsseite.

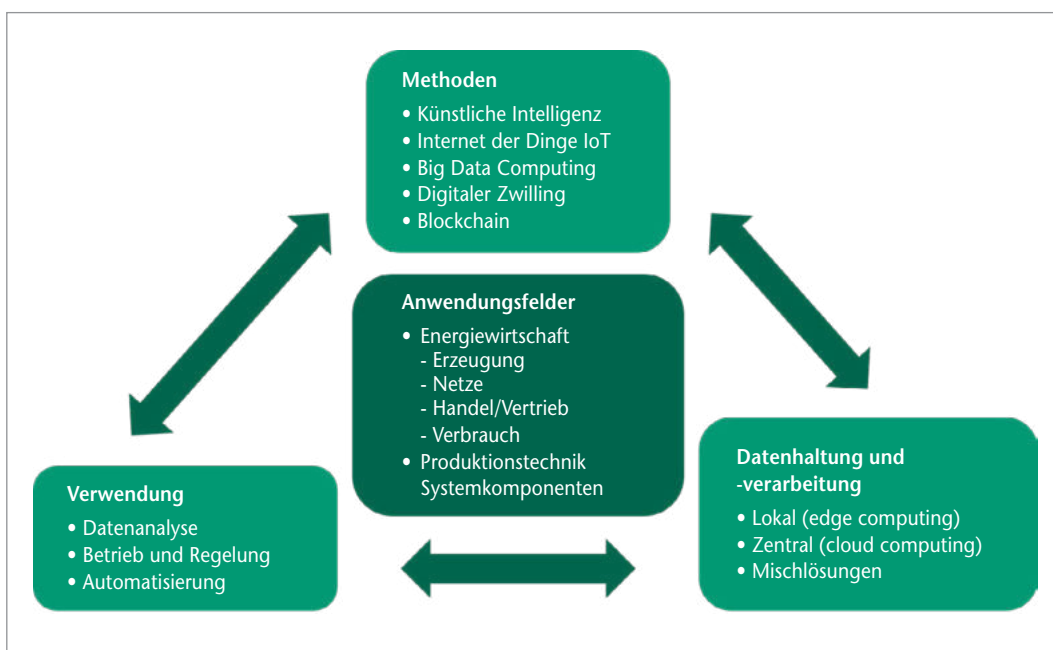


Abbildung 5
Dimensionierung der Digitalisierung im Kontext des Energiesystems

Außerdem wird auch die Produktionstechnik zur Herstellung von technischen Komponenten durch die Digitalisierung beeinflusst.

Für die Anwendung im Energiebereich kommen sämtliche bekannte Methoden der Digitalisierung in Betracht, von denen hier nur einige genannt werden:

• **Künstliche Intelligenz/machine learning**

Durch die Möglichkeit der massenhaften Erfassung und Speicherung von Betriebsdaten und zugehörigen Informationen (Wetter, Nutzer) ergeben sich neue Möglichkeiten, das Verhalten der Erzeuger, Speicher, Netze und Verbraucher besser zu analysieren und neue (bisher nicht erkannte) Zusammenhänge zu erkennen, z. B. für eine vorausschauende Betriebsführung.

• **Internet of Things (IoT, Internet der Dinge)**

Die massive Vernetzung aller relevanten Komponenten mit Unterstützung der IoT-Methodik bietet die Chance einer weitgehenden bis vollständigen Automatisierung der Energieversorgung. Der vollautomatisierte Einsatz der Komponenten und damit deren Rolle in Prozessabläufen sowie die schnelle Information von deren Umgebung, Beschaffenheit, Sicherheit und Aktualisierbarkeit stellen damit einen disruptiven Entwicklungsschritt dar, der die zukünftige Energieversorgung grundlegend verändern wird.

• **Big Data Computing**

Die Dezentralisierung der Energieversorgung bedeutet einen exponentiellen Zuwachs an zu verarbeitenden Daten. Die Datenquellen und Datenmengen sind mit herkömmlichen Methoden nicht mehr zu bewältigen und erfordern High Performance Computing und eine zuverlässige und sichere Verarbeitung (Übertragung, Analyse, Speicherung).

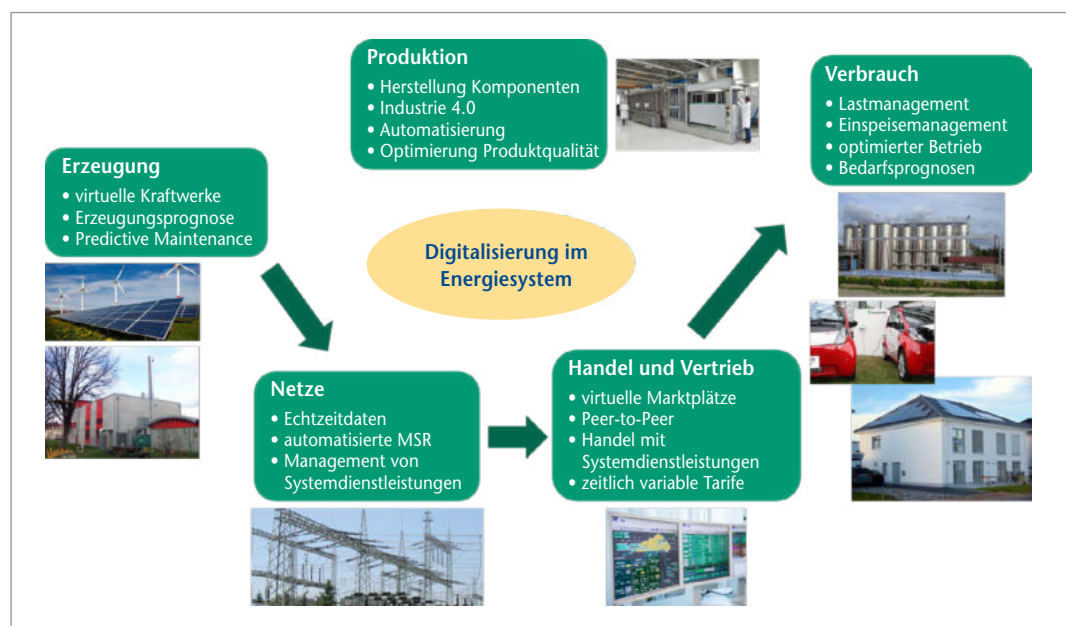
Die **Verwendung** reicht – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – von Datenanalysen, die zu einer höheren Transparenz oder dem Verständnis von Prozessverhalten führen, über Eingriffe in Betrieb und Regelung von Anlagen bis hin zu Konzepten der vollständigen Automatisierung.

Eine wichtige weitere Dimension betrifft die Frage des Ortes der **Datenhaltung und -verarbeitung**, die ausschließlich lokal (Edge Computing), vollständig zentral (Cloud Computing) oder in Mischformen erfolgen kann.

Abbildung 6 zeigt Beispiele für Anwendungen in den zuvor genannten Anwendungsfeldern. Viele dieser Anwendungen haben einen engen Bezug zu den zuvor dargestellten Anforderungen an den Betrieb und das Management der Stromnetze. Insbesondere im Bereich der Produktion von technischen Komponenten, aber auch auf der Verbrauchsseite, ergeben sich jedoch für Digitalisierungstechniken neue Einsatzbereiche, auch losgelöst vom übergeordneten Energiesystem. Automatisierung und Industrie-4.0-Ansätze können beispielsweise die zukünftige Herstellung von Photovoltaikzellen oder Batteriezellen maßgeblich beeinflussen und in der Folge zu sinkenden Herstellungskosten, aber auch einer höheren Produktqualität führen [3].

Auch in Gebäuden kann eine Betriebsoptimierung lokal erfolgen und wesentliche Energie- und Kosteneinsparungen bewirken, ohne dass ein Bezug zur übergeordneten Energieversorgung gegeben sein muss. Konzepte werden hier unter dem Begriff des Building Information Modelling (BIM) zusammengefasst, dessen Anwendungen weit über den Bereich der Energiethemen hinausgehen.

Abbildung 6
Anwendungsbeispiele für Digitalisierung in verschiedenen Anwendungsfeldern



Fazit – Herausforderungen und Chancen

Die Entwicklung insbesondere der elektrischen Energieversorgung ist charakterisiert durch eine stark wachsende Zahl beteiligter Anlagen – und somit beteiligter Akteure – auf allen Netzebenen, insbesondere aber im Verteilnetz. Um einen sicheren und effizienten Betrieb dieser vielen Millionen Erzeugungsanlagen und Verbraucher in allen Verbrauchssektoren zu gewährleisten, bedarf es eines fortwährenden Ausgleichs zwischen Bereitstellung und Nutzung durch ein komplexes Zusammenspiel aus zeitlich angepasster Energienutzung (Laststeuerung), sowie dem Einsatz von unterschiedlichen Speichern und flexibel regelbaren, residualen Erzeugungsanlagen. Ohne Einsatz von Digitalisierungstechniken, also datenbasierter Vernetzung ist ein (versorgungs-)sicherer, effizienter und effektiver Betrieb nur schwer vorstellbar. Die Ausschöpfung der heutigen Möglichkeiten der Digitalisierung ist damit eine wesentliche Voraussetzung für den notwendigen Systemumbau. Zugleich drängen neue Ansätze und Anwendungsmöglichkeiten von Digitalisierungstechniken auch in den Energiemarkt und wirken als zusätzliche Treiber und Beschleuniger.

Es ergibt sich eine Vielzahl an Chancen durch den Einsatz von Digitalisierungstechniken in der Energieversorgung wie u. a. die Folgenden:

- effiziente Nutzung der bestehenden Infrastruktur [4]
- erhöhte Versorgungssicherheit in Systemen mit fluktuierenden Erzeugern
- effizientere Integration von erneuerbaren Energien und Flexibilisierung der Nachfrage
- Schaffung neuer Geschäftsmodelle
- Verlegung von mehr Verantwortung in Verbraucherhand
- verursachergerechtere Abrechnung
- erhebliches Einsparpotenzial (sowohl für Endkunden als auch im Gesamtsystem) im Vergleich zum Einsatz von Standardlösungen

Diesen Chancen stehen Herausforderungen gegenüber, deren Bearbeitung Gegenstand zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sein muss und die teilweise – z. B. im Bereich der Sicherheitsfragen – eine entscheidende Rolle für den Erfolg des Einsatzes von Digitalisierung in der Energieversorgung haben werden:

- Systemstabilität und technische Resilienz (auch gegenüber kriminellen Angriffen)
- Privacy und Datensouveränität [5]
- Berücksichtigung der Nutzerakzeptanz
- Anpassung politischer Rahmenbedingungen
- Nachhaltigkeit, Ressourcen, Energieverbrauch und Rebound-Effekte [6]

Bei der Umsetzung der Digitalisierung handelt es sich, wie bei der Transformation des Energiesystems insgesamt, um eine komplexe Gestaltungsaufgabe. Klare Nutzenorientierung und ganzheitliche Bewertung der Anwendungsmöglichkeiten sind dabei ein zentrales Gebot. Digitalisierung ist kein Selbstzweck, bietet aber eine entscheidende Grundlage für den Umbau zu einem nachhaltigen Energiesystem.

Quellenangaben

- [1] Publikationen entstanden im Rahmen der Arbeitsgruppe „Sektorkopplung“ (Leitung Eberhard Umbach und Hans-Martin Henning) des Projekts „ESYS – Energiesysteme der Zukunft“:
Stellungnahme „Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende“, ISBN: 978-3-8047-3672-6, November 2017 und Ausfelder et al.,
Analyse „»Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems“, ISBN: 978-3-9817048-9-1, November 2017
- [2] Zur dynamischen Entwicklung der Förderung für erneuerbare Energien in der EU siehe z. B.: Strunz, S., Gawel, E., Lehmann, P., Söderholm, P. (2018). Policy convergence as a multi-faceted concept: The case of renewable energy policies in the EU. *Journal of Public Policy* 38(3): 361-387.
- [3] siehe hierzu: Ralf Preu, Jürgen Fleischer: Digitalisierung bei der Produktion von PV-Modulen und Batteriezellen. Jahrestagung des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien (FVEE) 2018. Beitrag im gleichen Tagungsband.
- [4] siehe z. B.: Heinrichs, H., Jochem, P. (2016), Long-term impacts of battery electric vehicles on the German electricity system, *European Physical Journal Special Topics* 225, 583-593, doi: 10.1140/epjst/e2005-50115-x
- [5] siehe z. B.: Buchmann, E.; Kessler, S.; Jochem, P.; Böhm, K. (2013): The Costs of Privacy in Local Energy Markets, *IEEE Conference on Business Informatics (CBI)*, Vienna, Austria.
- [6] siehe hierzu: Paul Weigel, Manfred Fishedick, André Brosowski: Digitalisierung aus Nachhaltigkeitssicht – Beispiel Energiesektor, Jahrestagung des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien (FVEE) 2018. Nachfolgender Beitrag im gleichen Tagungsband.