

WGP-STANDPUNKT Energieeffizienz, Energieflexibilität und Dekarbonisierung



WGP-Positionspapier »Energieeffizienz, Energieflexibilität und Dekarbonisierung« 2025

Die WGP (Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V.) ist ein Zusammenschluss führender deutscher Professorinnen und Professoren der Produktionswissenschaft. Sie vertritt die Belange von Forschung und Lehre gegenüber Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit. Die WGP vereinigt 64 Professorinnen und Professoren aus knapp 40 Universitäts- und Fraunhofer-Instituten und steht für rund 2.000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Produktionstechnik. Die Mitglieder genießen sowohl in der deutschen Wissenschaftslandschaft als auch international eine hohe Reputation und sind weltweit vernetzt. Die Labore der Mitglieder sind auf einem hohen technischen Stand und erlauben den Professorinnen und Professoren der WGP, in ihren jeweiligen Themenfeldern sowohl Spitzenforschung als auch praxisorientierte Lehre zu betreiben. Die WGP hat sich zum Ziel gesetzt, die Bedeutung der Produktion und der Produktionswissenschaft für die Gesellschaft und für den Standort Deutschland aufzuzeigen. Sie bezieht Stellung zu gesellschaftlich relevanten Themen von Industrie 4.0 über Energieeffizienz bis hin zu 3D-Druck.

Impressum

Herausgeber

WGP Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V.
vertreten durch den Präsidenten Michael F. Zäh,
Technische Universität München

Verantwortliche Autoren

Matthias Weigold, Technische Universität Darmstadt
Christoph Herrmann, Technische Universität Braunschweig
Rüdiger Daub, Christina Reuter, Technische Universität München

Mitwirkende Autoren

Andreas Wächter, Technische Universität Darmstadt
Lukas Siemon, Technische Universität Braunschweig
Markus Wörle, Technische Universität München
Jan Geier, Technische Universität München
Mark Mennenga, Technische Universität Braunschweig
Tobias Koch, Technische Universität Darmstadt
Stefan Seyfried, Technische Universität Darmstadt
Ghada Elserafi, Technische Universität Darmstadt
Borys Ioshchikhes, Technische Universität Darmstadt
Jerome Stock, Technische Universität Darmstadt
Laura Göbel, Technische Universität München
Robar Arafat, Technische Universität Braunschweig
Filomena Löffel, Technische Universität Braunschweig
Marija Lindner, Technische Universität Braunschweig
Markus Weber, Fraunhofer IGCV

Titelbild:

PTW TU Darmstadt | Jan Hosan

ISSN: 2750-4549

Inhalt

1 Management Summary	2
2 Warum dieser WGP Standpunkt?	3
3 Begriffsbestimmungen	4
4 Blick in die Produktionstechnische Forschung	5
4.1 Anpassung von Prozessparametern in der Bauteil-reinigung metallischer Bauteile im Projekt LoTuS	6
4.2 Energetische Untersuchung und Potenziale von Werkzeugmaschinen	6
4.3 Direktnutzung von Windstrom zur Dekarbonisierung energieintensiver Schmelzprozesse in der Gießereibranche im Projekt WindMelt	7
4.4 Energieeffizienz durch die optimierte Bereitstellung von Kühlschmierstoff – Projekt: E-KISS	7
4.5 Kunststoffspritzguss.....	8
4.6 Energieeffiziente Batterieproduktion – Projekt: InZePro-Cluster InMiTro	8
4.7 Anlagenübergreifende Abwärmenutzung auf Fabrikebene	9
4.8 Energieflexibilitätpotenziale in der Lebensmittelindustrie	9
4.9 Energieflexibler Kunststoffspritzguss – Projekt: SynErgie III	10
4.10 Sektorenübergreifende Potenziale am Beispiel von Fabriken und Fahrzeugflotten	10
5 Lern- und Forschungsfabriken in der energiebezogenen Produktionsforschung	11
6 Handlungsempfehlungen	14
6.1 Dekarbonisierung und Maßnahmentransfer.....	14
6.2 KI-assistierte Systeme als Befähiger von Energieeffizienz und Energieflexibilität	14
6.3 Systemische Betrachtung von Energieeffizienz	14
6.4 Systemische Betrachtung von Energieflexibilität und Umgang mit Zielkonflikten	14
6.5 Betrachtung von Energieflexibilität im Kontext wärmebasierter Produktionsprozesse	15
6.6 Automatisierte energieflexible Produktionssteuerung	15
6.7 Standardisierung, Datenschnittstellen für Energieflexibilität	15
6.8 Energieproduktivität vorantreiben.....	15
6.9 Förderung von Kompetenzen, Akzeptanz und Nutzerfreundlichkeit für die Integration von Energieflexibilität in betriebliche Abläufe.....	15
Literatur	17

1 Management Summary

Die industrielle Wertschöpfung ist ein wichtiger Treiber für den Wohlstand in Deutschland. Zugleich verursacht die Produktion von Gütern erhebliche ökologische Auswirkungen, insbesondere durch einen hohen Energieverbrauch und die mit der Produktion verbundenen Treibhausgasemissionen. Im Spannungsfeld zwischen globaler Wettbewerbsfähigkeit und den Anforderungen einer klimaneutralen Zukunft gilt es, die industrielle Wertschöpfung nachhaltig zu gestalten und zugleich zukunftsfähig auszurichten. Die politischen Rahmenbedingungen – von der nationalen Energiewende bis hin zu den Net-Zero-Zielen der Europäischen Union – fordern tiefgreifende strukturelle Veränderungen in der industriellen Energieversorgung und -nutzung. Dabei sind nicht nur neue Technologien, sondern vor allem neue systemische Denkansätze erforderlich: Energieeffizienz, Energieflexibilität und Dekarbonisierung müssen gemeinsam gedacht und gestaltet werden. Für Unternehmen ergeben sich hier vielfältige Chancen in der Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit in Verbindung mit Produkt- und Prozessinnovationen sowie neuen Dienstleistungs- und Geschäftsmodellen. Genau an diesem Punkt setzt der vorliegende Standpunkt der WGP an und zeigt Wege auf, wie die Transformation der Industrie gelingen kann.

Was ist neu?

Nicht einzelne Effizienzmaßnahmen oder die reine Substitution fossiler Energieträger sind der eigentliche Hebel, sondern die systemische Optimierung ganzer Produktionssysteme – von der Maschine über die Prozesskette bis zur vernetzten Fabrik in ihrem industriellen Umfeld. Neu ist auch die Ausweitung der Flexibilitätsbetrachtung auf bisher vernachlässigte Bereiche, insbesondere wärmebasierte Prozesse. Während sich viele bisherige Ansätze auf stromseitige Lastverschiebung konzentrieren, liegt in der Flexibilisierung thermischer Prozesse – etwa durch thermische Speicher, hybride Erzeuger oder Wasserstoffintegration – ein großes, bislang ungenutztes Potenzial.

Was ist der Nutzen?

Die kombinierte Steigerung von Energieeffizienz und -flexibilität auf Systemebene erhöht die Energieproduktivität, reduziert die Emission von Treibhausgasen und schafft ökonomische Vorteile, z. B. durch eine verbesserte Netznutzung und die Anpassung des Energieverbrauchs an die preislichen Rahmenbedingungen im Energiemarkt. Gerade in energieintensiven Produktionsprozessen lassen sich durch differenzierte Prozessführung signifikante Einsparungen bei gleichbleibender Qualität und Liefertreue erzielen. Gleichzeitig können aus der systemischen Betrachtung von Effizienz, Flexibilität und Dekarbonisierung neue Innovationsräume für Unternehmen, sektorübergreifende Energieströme und netzdienliche Fabriken entstehen. Die Forschungseinrichtungen der WGP können hier durch modellhafte Infrastrukturen, wie z. B. die ETA-Fabrik und Lernfabriken der WGP-Initiative, einen essenziellen Beitrag zum Transfer in die Breite der Industrie – insbesondere in den Mittelstand – leisten.

Was bedeutet das für Forschung, Wirtschaft und Politik?

Die WGP (Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V.) plädiert für eine konsequente Verankerung systemischer Denkansätze in Förderprogrammen, Regulierungsrahmen und industrieller Praxis. Darüber hinaus sind Effizienz und Flexibilität nicht per se konfliktfrei – politische Instrumente müssen daher Zielkonflikte adressieren und sowohl die Wirkung für einzelne Akteure als auch die Gesamtwirkung auf das Energiesystem bewerten. Gefragt ist eine innovationsorientierte Industriepolitik, die technologieoffen bleibt, die bestehende Forschungsinfrastruktur nutzt und den industriellen Mittelstand gezielt bei der Transformation unterstützt.

Wie ist dieses Papier strukturiert?

Nach einer einleitenden Darstellung der Relevanz des WGP-Standpunktes folgen die Einordnung und die Definition der wichtigsten Begrifflichkeiten. Anschließend zeigt das Standpunktpaper exemplarisch für den behandelten Themenkomplex bedeutsame Forschungsbeiträge auf, die im Rahmen von Förderprojekten entstanden sind. Darüber hinaus wird auf die bereits beispielhaft vorhandene Forschungsinfrastruktur eingegangen. Den Abschluss bildet die Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen für die Politik. Im Zentrum stehen die Themenfelder systemische Effizienzstrategien, netzdienliche Fabriken, Flexibilität in Wärmeprozessen, Digitalisierung, Standardisierung sowie Kompetenzaufbau.

2 Warum dieser WGP Standpunkt?

Deutschland ist ein führender Produktionsstandort industrieller Erzeugnisse und zugleich im Anlagenbau ein relevanter Ausrüster für die Industrie weltweit. Der Anlagenbau steht gleichermaßen für fortschrittliche und robuste Fertigungstechnologien, Präzision und Innovationskraft. Dieser Status wurde in der Vergangenheit trotz international vergleichsweise hoher Lohnkosten am Standort erreicht und begründet sich neben der Innovationskraft in einem hohen Qualifikationsniveau und früheren Produktivitätssteigerungen.

Aktuell steht der Standort vor der Herausforderung, seine Wettbewerbsfähigkeit trotz steigender Energiekosten und der notwendigen Dekarbonisierung zu erhalten. Mit dieser Herausforderung geht jedoch auch die Chance einer weiteren Produktivitätssteigerung einher, um wie auch zuvor eine wettbewerbsfähige Stellung durch eine hohe Produktivität zu erreichen. Potenziale bestehen beim effizienten Einsatz von Energie und Materialien und bei der Nutzung von Flexibilitäten in der Energienachfrage. Das Heben dieser Potenziale verspricht Kostenvorteile für die industrielle Produktion am Standort Deutschland. Zugleich steigt die Bedeutung von Energieeffizienz, Energieflexibilität und Dekarbonisierung in vielen Exportzielen des hiesigen Maschinen- und Anlagenbaus. Innovationen in der Energieproduktivität und Materialeffizienz adressieren neben eigenen Kostenvorteilen zunehmend nachgefragte Eigenschaften für den Export. Der Ausbau erneuerbarer Erzeuger für elektrische Energie ist ein wesentlicher Baustein für die Dekarbonisierung. Zugleich zeichnen sich viele erneuerbare Erzeugungstechnologien durch geringe Kosten gegenüber fossilen Energieträgern aus. Die wachsende Verbreitung von Photovoltaikanlagen auf den Dächern industrieller Liegenschaften ist nur ein Beispiel, welches das wirtschaftliche Potenzial erneuerbarer Lösungen unterstreicht. Gleichwohl zeigt sich: Eine vollständige Dekarbonisierung der Industrie lässt sich nicht allein durch den Bezug von Strom aus erneuerbaren Quellen erreichen. Zum einen sind auch erneuerbare Stromquellen – trotz deutlicher Vorteile gegenüber fossilen Energieträgern – nicht vollständig treibhausgasneutral. Zum anderen ist die Verfügbarkeit erneuerbar bereitgestellter Energieträger begrenzt durch Erzeugungs- und Netzkapazitäten. Dies gilt umso mehr, wenn der Bedarf an Prozesswärme, der heute noch verbreitet durch fossile Energieträger bereitgestellt wird, durch elektrische Energie substituiert wird. Die Dimension dieser Transformation wird bei der Betrachtung des Energiemixes für die Industrie und anderer Sektoren in Deutschland deutlich (nebenstehende Grafik). Gemessen am Endenergiebedarf in Deutschland entfällt heute über ein Viertel auf die Industrie. Zugleich sind als Energieträger noch in hohem Maße fossile Gase wie Erdgas und Kohle im Einsatz. Diese gilt es in den kommenden Jahren umfassend zu substituieren. Ein effizienter und durchdachter Umgang mit Energieträgern ist daher eine dringende Notwendigkeit für die nachhaltige industrielle Produktion. Durch eine Steigerung der Energieeffizienz und Energieflexibilität stellen sich Unternehmen robuster gegen schwankende und steigende Energiepreise auf und können zugleich einen Beitrag für die Dekarbonisierung der Energieversorgung leisten.

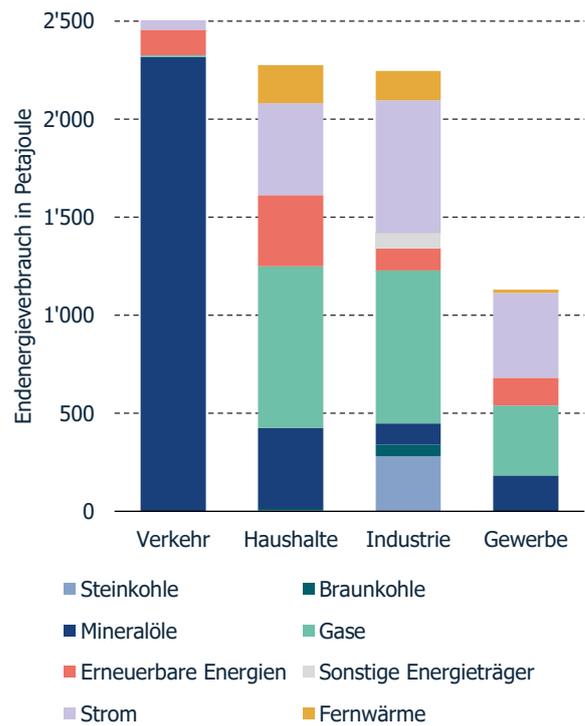


Abbildung 1: Endenergieverbrauch nach Sektoren und Energieträgern in Deutschland im Jahr 2023 (Datengrundlage: AGEBA [1])

An den Instituten der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) wird seit mehr als 20 Jahren zu energiebezogenen Fragestellungen der Produktionstechnik geforscht. Die Expertisen der Institute reichen vom eigentlichen Prozess, über die notwendige Anlagentechnik und ganze Prozessketten bis zur systematischen Betrachtung auf Fabrikebene und der Interaktion und Integration über die Fabrikgrenzen hinaus. Die Forschungsaktivitäten umfassen etablierte Felder, wie beispielsweise die Weiterentwicklung elektrischer Antriebe für Produktionsmaschinen, bis hin zur Wegbereitung neuer Technologien, wie Anwendungen der künstlichen Intelligenz im Energiemanagement. Dieser Standpunkt gibt einen Einblick, in die Fortschritte der produktionstechnischen Forschung, die in dieser Zeit gemacht wurden. Neben Forschungsarbeiten aus einer großen Bandbreite der Produktionstechnik werden Beispiele vorgestellt, die zeigen welches Potential in der Überführung der Forschungsergebnisse in die Industrie steckt. Die vorgestellten Beispiele zeigen auf, welche Expertise an den Instituten aufgebaut wurde und welche Forschungsinfrastruktur als Grundlage für zukünftige Innovationen entstanden ist. Aufbauend auf den umfassenden Erfahrungen, der aufgebauten Expertise und der entstandenen Forschungsinfrastruktur an öffentlichen Einrichtungen werden in diesem Standpunkt Handlungsfelder aufgezeigt, die vielversprechend für zukünftige Innovationen sind.

3 Begriffsbestimmungen

Klimaneutralität

Die Herstellung von Produkten hat verschiedene Umwelteinflüsse zur Folge, darunter auch solche, die einen Einfluss auf das globale Klima haben. Um die Bestrebungen zur Reduktion der Klimawirkung zu charakterisieren, formulieren Unternehmen ihre Ziele häufig in Form von Neutralitätsansprüchen, die zu einem bestimmten Zieldatum erreicht sein sollen [2]. Dabei sind verschiedene Begriffe zu unterscheiden: Klimaneutralität bezeichnet den Zustand, in dem sich anthropogene Einflüsse auf das Klima gegenseitig ausgleichen, so dass die globale Erderwärmung nicht mehr voranschreitet [3]. Dieser Zustand ist in der Praxis kaum erreichbar [3]. Auf Unternehmensebene werden Klimaneutralitätsansprüche davon abweichend häufig durch die Kompensation von Emissionen mittels des Ankaufs von Emissionszertifikaten realisiert, die sich auch auf eine Reduktion außerhalb der Wertschöpfungskette beziehen können [4], [5]. Treibhausgas-Neutralität schränkt den Begriff der Klimaneutralität dahingehend ein, dass sich dieser nur auf Treibhausgas-Emissionen bezieht, nicht aber andere Effekte wie Veränderungen der Albedo berücksichtigt [3]. Net-Zero-Ansätze grenzen sich von Klimaneutralität durch die tatsächliche Entnahme von Treibhausgasen aus der Atmosphäre ab [4], [6]. Sie setzen in der Regel auch eine Reduktion von Emissionen voraus [6].

Dekarbonisierung

Mit der Dekarbonisierung verfolgen Unternehmen das Ziel, ihr Wirtschaften von der Nutzung fossilen Kohlenstoffs (z. B. in Form von Erdgas, Erdöl etc.) zu lösen und damit kohlenstoffbasierte Treibhausgas-Emissionen zu verringern [2], [7]. Dazu stehen Unternehmen verschiedene Maßnahmenkombinationen zur Verfügung. Aus den unterschiedlichen möglichen Maßnahmenkombinationen leiten sich Pfade zur Erreichung des definierten Zielzustands für ein jeweils betrachtetes Unternehmen ab. Viele Unternehmen richten sich hierfür mittlerweile nach den Leitlinien der Science Based Target Initiative, anhand derer sich wissenschaftliche Begründete Klimaziele im Kontext der global notwendigen Emissionsreduktion definieren lassen [8].

Energieeffizienz

Energieeffizienz bezeichnet das Verhältnis zwischen einem erzielten Nutzen – etwa mechanischer Arbeit zum Eindrehen einer Schraube oder benötigter Prozesswärme – und der dafür eingesetzten Energiemenge. Sie ist ein Maß dafür, wie sparsam Energie genutzt wird. Je weniger Energie benötigt wird, um denselben Nutzen zu erzielen, desto höher ist die Energieeffizienz. In der Produktion bedeutet das, dass Maschinen, Prozesse, Bereiche etc. umso energieeffizienter sind, je weniger Energie sie für die Herstellung der geplanten Produkte benötigen [9]. Häufig wird für diese Leistungsgröße auch der Begriff der Energieproduktivität verwendet. In diesem Kontext fokussiert der Begriff Energieeffizienz die Energieproduktivität einer zu untersuchenden Technologie in Referenz zu der Energieproduktivität der besten verfügbaren Technologie dieser Art oder auch dem

thermodynamischen Optimum dieser Technologie [10]. Beide Definitionen sind eng durch die zugrunde liegenden Maßnahmen zur Effizienzsteigerung verbunden und finden somit parallel in Forschung, Entwicklung und Industrie Anwendung.

Elektrifizierung

Der Begriff der Elektrifizierung beschreibt die Umstellung von Prozessen, Maschinen und Anlagen von fossilen Energieträgern (z. B. Erdgas, Kohle, Erdöl) auf den Betrieb mit elektrischem Strom. Die Elektrifizierung kann dabei direkt (unmittelbare Umwandlung von Strom in die gewünschte Nutzenergieform) oder indirekt (mittelbare Umwandlung von Strom in einen anderen Endenergieträger mit einer anschließenden Umwandlung in die gewünschte Nutzenergieform) erfolgen. Das Ziel ist es jeweils, die Energieversorgung mittels Nutzung von Strom aus regenerativen Quellen möglichst umweltfreundlich zu gestalten und einen Beitrag zur Dekarbonisierung zu leisten. Ein großes Potenzial besteht dahingehend vor allem bei der Elektrifizierung der Prozesswärmeversorgung von Produktionssystemen, da diese derzeit überwiegend auf fossilen Energieträgern wie Erdgas basiert [11].

Sektorkopplung

Sektorkopplung bezeichnet die Interaktion von Systemen aus der Perspektive von Sektoren. Hierbei lassen sich die Energiesektoren Strom, Wärme/Kälte, Kraftstoffe und Brennstoffe sowie die Verbrauchssektoren Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Verkehr und Haushalte differenzieren. Sektorkopplung kann sowohl im Kontext der Energiesektoren wie auch der Verbrauchssektoren verwendet werden. Die Kopplung wird durch sogenannte Sektorkopplungstechnologien realisiert, welche in der Lage sind, Energie von einer Form in eine andere zu wandeln oder von einem Verbrauchssektor für einen anderen zur Verfügung zu stellen. Am weitesten verbreitet ist hier die Transformation von Strom in Wärme oder Energieträger in Form von Feststoffen, Flüssigkeiten oder Gasen (vgl. Elektrifizierung). Der englische Begriff Power-to-X fasst diese Technologien zusammen, wobei X durch die gewünschte finale Energieform zu ersetzen ist. So bilden Power-to-Gas, Power-to-Heat und Power-to-Liquid prominente Beispiele der Sektorkopplung. Auch aus Perspektive der Verbrauchssektoren ist das entsprechende Schema bekannt, bspw. als Power-to-Mobility. Bei allen indirekten Power-to-X-Technologien gilt aufgrund der inhärenten Umwandlungsverluste der Grundsatz, dass diese vorrangig dort eingesetzt werden sollten, wo keine direkte Elektrifizierung möglich ist. Die entsprechenden Branchen werden auch als sogenannte Hard-to-abate-Sektoren bezeichnet (zu Deutsch: schwierig zu mindern) [12].

Industrielle Symbiose

Industrielle Symbiose bezeichnet die gewollte Verbindung von traditionell getrennten Sektoren oder industriellen Systemen in einem kollaborativen Ansatz zur Schaffung von Wettbewerbsvorteilen durch den physischen Austausch von Materialien, Energie, Wasser und/oder Nebenprodukten [13]. Der Begriff der industriellen Symbiose ist eng verknüpft mit dem Begriff der Sektorkopplung. Hierbei

kann die industrielle Symbiose als eine Kopplung von mehreren industriellen Systemen unterschiedlicher oder gleicher industrieller Sektoren verstanden werden. Prominente Beispiele finden sich in der gemeinschaftlichen Bereitstellung und/oder Nutzung von Wärme oder Energieträgern. So kann beispielsweise die Abwärme eines Unternehmens die Wärmeversorgung eines anderen Unternehmens darstellen. Gleichmaßen können Abfallströme zur Energiegewinnung genutzt werden. Industrielle Symbiose ist darüber hinaus auch um die Berücksichtigung von nicht-industriellen Systemen zu ergänzen, bspw. im Kontext der Urban-industriellen Symbiose. Die Nutzung von Prozessabwärme für die Versorgung von in der Umgebung befindlichen industriellen Systemen über Nah- und Fernwärmeleitungen ist ein bereits seit Jahrzehnten etabliertes Beispiel.

Energieflexibilität

Unter Energieflexibilität wird die Veränderung von Einspeisung oder Entnahme in Reaktion auf ein externes Signal verstanden. Ein solches Signal kann z.B. ein veränderter Marktpreis oder eine geforderte Leistungsanpassung vom Netzbetreiber sein. Ziel ist es, eine Dienstleistung (beispielsweise Frequenzhaltung) im Energiesystem zu erbringen [14].

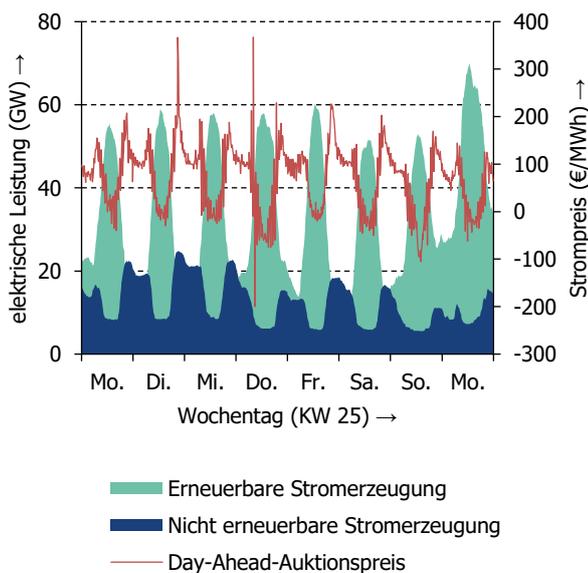


Abbildung 2: Elektrische Stromerzeugungsleistung und Day-Ahead-Strompreise in Deutschland in KW 25 des Jahres 2025 (Datengrundlage: ENTSO-E)

Ein zentraler Teilaspekt von Energieflexibilität ist der Begriff Demand Response. Damit werden laut U.S. Department of Energy „Veränderungen im Stromverbrauch von Endverbrauchern gegenüber ihrem normalen Nutzungsverhalten bezeichnet – als Reaktion auf zeitlich variierende Strompreise oder auf Anreize, die darauf abzielen, den Stromverbrauch zu Zeiten hoher Großhandelspreise oder bei Gefährdung der Systemzuverlässigkeit zu senken“ [15].

Demand Response kann somit als eine operative Ausprägung von Energieflexibilität verstanden werden, die sich auf die Verbrauchsseite im Stromsystem konzentriert. Energieflexibilität im weiteren Sinne ist umfassender: Sie schließt nicht nur den flexiblen Verbrauch ein, sondern auch die Anpassung der Erzeugung, die Nutzung von

Speichern, sektorübergreifende Kopplungen (z. B. Strom-Wärme) sowie übergreifende Maßnahmen zur Systemoptimierung. Flexibles Verhalten im Stromsystem bedeutet konkret, dass Energie – abhängig von der Systemlage – entweder ins Netz eingespeist oder diesem entnommen wird. Ziele sind die Erbringung systemdienlicher Leistungen wie die Sicherstellung der Netzstabilität, das Engpassmanagement, die Bereitstellung von Regelernergie oder ein verbessertes Lastmanagement [16].

4 Blick in die Produktionstechnische Forschung

In Deutschland besteht eine etablierte Forschungsinfrastruktur an öffentlichen Institutionen, die bereits in der Vergangenheit maßgeblich zur Erschließung erster Elemente eines neuen Innovationsraums Energieeffizienz, Energieflexibilität und Dekarbonisierung beigetragen haben. Diese Einrichtungen verfügen über das Potenzial, künftig eine führende Rolle bei der Entwicklung zukunftsweisender Lösungen einzunehmen und die Weiterentwicklung und Anwendung insbesondere im industriellen Mittelstand zu ermöglichen.

Die produktionstechnische Forschung adressiert energiebezogene Fragestellungen in großer Breite und auf unterschiedlichen Ebenen und kann dabei auf ein breites Fundament an bestehendem Wissen zurückgreifen. Ein zentraler Bestandteil dieser Forschungsarbeit ist die integrierte Betrachtung von Energieeffizienz- und Energieflexibilitätsstrategien, die wesentlich zur nachhaltigen Transformation industrieller Wertschöpfungsprozesse beiträgt.

Im Fokus stehen die zunehmenden Wechselwirkungen zwischen den Betrachtungsebenen *Prozess*, *Prozesskette*, *Produktionssystem*, *Fabrik* und *Umsystem*. Es konnte bereits gezeigt werden, dass die gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere im Bereich der Entwicklung von Methoden und Werkzeugen, größtenteils über verschiedene Industriesektoren transferierbar sind.

Der folgende Abschnitt geht auf ausgewählte Beispiele der WGP-Effizienzinitiative ein und zeigt die wechselseitigen Beziehungen zwischen den Forschungsbereichen und -methoden auf. Abbildung 3 ordnet die beispielhaften Beiträge der WGP-Effizienzinitiative anhand ihres thematischen Forschungsfokus über den Betrachtungsbereich ein.

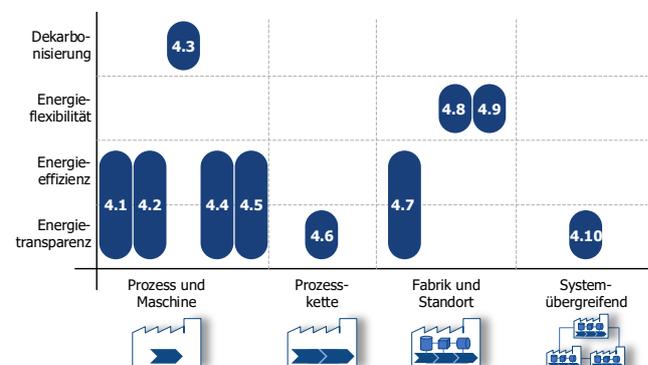


Abbildung 3: Übersicht und Einordnung der Beiträge der WGP-Effizienzinitiative

4.1 Anpassung von Prozessparametern in der Bauteilreinigung metallischer Bauteile im Projekt LoTuS

Im Bereich der Bauteilreinigung, einem elementaren Bestandteil zahlreicher Prozessketten der metallverarbeitenden Industrie, wurden in den letzten Jahren signifikante Fortschritte in der Energieeffizienzforschung erzielt. Im Rahmen von Verbundforschungsprojekten, wie z. B. ETA-Fabrik (03ET1145), LoTuS (03EN2026) und ETA im Bestand (03EN2048) [17], [18], [19], wurden die Reinigungs- und Trocknungsprozesse gemeinsam mit Herstellern und Anwendern von Bauteilreinigungsanlagen untersucht und praxistaugliche Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung entwickelt und validiert. So wurden basierend auf dem Sinner'schen Kreis der Reinigung [20] Wechselwirkungen der vier Faktoren Zeit, Mechanik, Temperatur und Chemie herangezogen, um eine energieeffiziente Prozessführung zu gestalten. Dabei konnte mithilfe der mechanischen Optimierung der Spritzdüsen in der wässrigen Reinigung der energetisch teure Faktor Temperatur durch eine Temperaturabsenkung reduziert werden [17]. Darüber hinaus haben Digitalisierungsmaßnahmen dazu beigetragen, Einblicke in den Trocknungsprozess geben, welcher meistens aufgrund seiner Komplexität iterativ eingestellt werden muss. Diese Transparenzschaffung liefert die Basis für eine bedarfsgerechte Prozessgestaltung. Mithilfe von Methoden der künstlichen Intelligenz und bildgebenden Verfahren wie der Thermografie [21] wurden Lösungen entwickelt, um die Bauteiltrockenheit automatisiert zu bewerten. Dies ist ein wesentlicher Schritt dahin, den Prozess bauteilspezifisch einzustellen, Über- oder Untertrocknung zu vermeiden [18] oder gar einen geschlossenen Regelkreis zu ermöglichen. Ein erprobter Fuzzy-Logic-Ansatz für die Regelung zeigt beispielsweise über 60 % Einsparung des Leistungsbedarfs im Trocknungssystem bei gleichem Trocknungsergebnis und gleicher Prozessdauer [22].

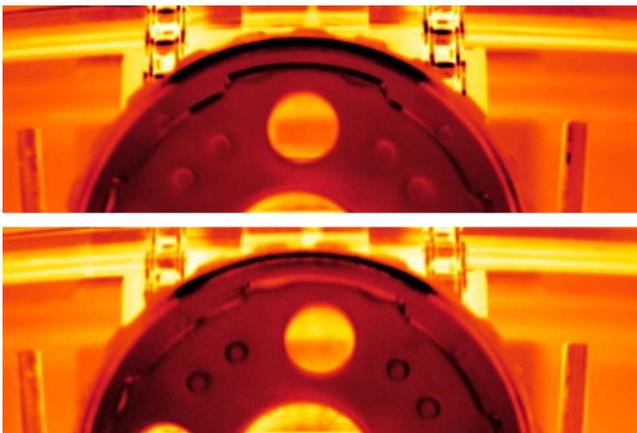


Abbildung 4: Erkennung von Wasserrückständen auf Bauteilen durch Thermografie (Bildquelle: PTW, TU Darmstadt)

Darüber hinaus konnten weitere Maßnahmen an der Anlagentechnik von Durchlauf- sowie Kammerreinigungsanlagen in den Projekten LoTuS und ETA im Bestand entwickelt werden, um weitere Energieeffizienz- und Energieflexibilitätpotenziale zu heben, beispielsweise über anlageninterne und – externe Abwärmenut-

zung [18], [19], [23]. Durch die Nutzung der Abwärme kann der Gesamtleistungsbedarf im betrachteten Fall um 20 % reduziert werden. Der Einsatz alternativer Trocknungstechnologien ermöglicht Einsparungen von 10 – 20 % des Gesamtleistungsbedarfs einer Reinigungsanlage [24].

4.2 Energetische Untersuchung und Potenziale von Werkzeugmaschinen

Werkzeugmaschinen, wie beispielsweise Fräs-, Dreh- und Schleifmaschinen kommen in vielfältigen Bauformen bei der Herstellung industrieller Zwischen- und Endprodukte zum Einsatz. Entsprechend weisen Werkzeugmaschinen eine sehr hohe Verbreitung auf und werden in der produktionstechnischen Forschung seit langem umfassend untersucht. Die Erforschung von Werkzeugmaschinen hinsichtlich energiebezogener Aspekte hat in den zurückliegenden Jahren wesentliche Erkenntnisse gegenüber dem bestehenden Stand der Technik hervorgebracht. Die Untersuchungen mehrerer Institute an verschiedenen Maschinen zeigen, dass ein großer Anteil des Energiebedarfs dieser Maschinen auf die Konditionierung der Maschine zurückzuführen ist – beispielsweise zur Kühlung, für Hydrauliksysteme oder durch den Druckluftbedarf [25]. Weiter wurden in der produktionstechnischen Forschung Maßnahmen untersucht, um die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen zu steigern. Beispielsweise wurde gezeigt, dass durch Leichtbau-Ansätze bei der Gestaltung der Maschinenstruktur der Energiebedarf beim Beschleunigen reduziert werden kann, ohne die notwendige Funktionalität einzubüßen [26]. Weitere untersuchte Maßnahmen zeigen, dass die Maschinenkühlung, die einen relevanten Anteil des Energiebedarfs der Maschinen verursacht, auf unterschiedliche Weise gegenüber den verbreiteten Technologien optimiert werden kann. In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Strategien zur Regelung der Kühlaggregate und verschiedene Kompressoren im Kühlkreislauf untersucht [25]. In einer Praxiserprobung im Rahmen des Forschungsprojekts ETA-Transfer wurde gezeigt, dass mit modernen Aggregaten eine Reduktion des elektrischen Strombedarfs zur Maschinenkühlung von über 50 % möglich ist. Für die Kühlung von Schaltschränken wurde eine Einsparung von 85 % erreicht [27]. Für andere Maschinenfunktionen, wie das Bereitstellen des für den Prozess notwendigen Kühlschmierstoffs, haben durchgeführte Untersuchungen ebenfalls Effizienzpotenziale aufgezeigt. Vorausgegangene Untersuchungen zeigen, dass durch eine simulationsgestützte bedarfsgerechte Anpassung der Kühlschmierstoffversorgung der elektrische Energiebedarf der Kühlschmierstoffpumpe um 81 % gesenkt werden kann, was bezogen auf die betrachtete Werkzeugmaschine eine gesamte Einsparung von 37 % zur Folge hat [28].

Die Untersuchungen an verschiedenen Werkzeugmaschinen zeigen, dass bis zu 10 % des elektrischen Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen auf Hydraulikaggregate entfällt [9]. Im Forschungsprojekt MAXIEM wurde untersucht, wie die Maschinenhydraulik effizienter betrieben werden kann. Hierzu wurde der ohnehin notwendige Pufferspeicher vergrößert und die Systemparameter angepasst. In einer Teststellung konnte so die Pumpe von 4,1 kW auf 2,8 kW Nennleistung verkleinert und seltener betrieben werden. Durch den Einsatz

anderer Ventile im Hydrauliksystem in Kombination mit dem angepassten Speicher konnte die Leistungsaufnahme eines Hydrauliksystems von durchschnittlich 826 W auf 5 W im Stand-by-Betrieb reduziert werden [29].

Neben Effizienzgewinnen hat die produktionstechnische Forschung ebenso Flexibilitätspotenziale an Produktionsanlagen wie Werkzeugmaschinen aufgezeigt. Beispielsweise wurde im Projekt SynErgie (Förderkennzeichen: 03SFK3A0-2) für den Betrieb einer Schleifmaschine demonstriert, dass Energiekosten der gesamten Maschine um 6,6 % bzw. 1,9 % pro Werkstück reduziert werden können, wenn die Planung der Aufträge optimiert durchgeführt wird [30]. In diesem Vorhaben wurde ein Energieflexibilitätsdatenmodell für ein Schleifbearbeitungszentrum erstellt. Dieses ermöglicht eine kostenoptimierte Steuerung der Produktionsaufträge angepasst an tatsächliche Preise am Strommarkt.

4.3 Direktnutzung von Windstrom zur Dekarbonisierung energieintensiver Schmelzprozesse in der Gießereibranche im Projekt WindMelt

Die Gießereiindustrie verursacht jährliche Treibhausgasemissionen in Höhe von ca 1,9 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente in Deutschland [31]. Ein wesentlicher Anteil des Energieverbrauchs entfällt auf den Schmelzbetrieb, der rund 40 bis 45 Prozent des Gesamtenergiebedarfs eines typischen Gießereistandorts ausmacht. Der Anteil der Energiekosten an der Bruttowertschöpfung von Gießereien beträgt insgesamt rund 25 Prozent [32]. Im Rahmen des Forschungsvorhabens WindMelt (Laufzeit 01.07.21 bis 31.12.21) wurde die Direktnutzung von Windstrom zur Aluminiumverflüssigung untersucht, mit dem Ziel, den ökologischen Fußabdruck der Branche signifikant zu reduzieren und gleichzeitig neue betriebswirtschaftliche Potenziale zu erschließen [33]. Kernidee des Ansatzes war die räumliche Verlagerung des energieintensiven Prozessschritts des Aufschmelzens von Aluminium an die Standorte regenerativer Energieerzeugung. Durch den Einsatz elektrisch betriebener Induktionsschmelzöfen in unmittelbarer Nähe zu Windkraftanlagen kann Strom, der andernfalls im Rahmen des Einspeisemanagements abgeregelt werden würde, direkt genutzt werden. Im Jahr 2020 verursachten Netzengpässe Entschädigungszahlungen in Höhe von über 760 Millionen Euro, wovon rund 67,4 % auf Onshore-Windkraftwerke entfielen [34].

Zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen wurde ein simulationsgestütztes Modell entwickelt, das die Betriebszustände von Schmelzöfen auf Stundenbasis abbildet. Das Modell berücksichtigt neben der Windstromverfügbarkeit auch Aufheiz- und Warmhaltephasen sowie Transportprozesse. Für die ökologische Bewertung wurde auf eine externe Ökobilanz-Software zurückgegriffen. Als Referenz wurden wöchentliche Schmelzmengen von 120 Tonnen Aluminium unter Einsatz von drei Schmelzöfen mit je 3 Megawatt elektrischer Anschlussleistung simuliert. Zur Bestimmung des Bruttoenergieaufwands pro Tonne wurde zwischen Schmelzdurchgängen jeweils bewertet, ob ein energieintensiveres Aufheizen mit 600 kW über vier Stunden oder ein durchgängiger Warmhaltetrieb mit

100 kW wirtschaftlich vorteilhafter ist. Die zugehörige Logistik erfolgt über Flüssigmetallbehälter mit angepasster Kapazität und festen Umlaufzeiten.

Die Projektergebnisse zeigen, dass durch die gezielte Nutzung von Windstrom spezifische Schmelzkosten zwischen 42,20 und 74,30 Euro pro Tonne erzielt werden können, sofern eine reduzierte EEG-Umlage berücksichtigt wird. Zum Vergleich: Bei ausschließlicher Nutzung von Netzstrom im dezentralen Schmelzbetrieb liegen die Kosten zwischen 86,20 und 171,80 Euro pro Tonne [35], [36]. Auch aus ökologischer Sicht ist der Ansatz vorteilhaft. Bei vollständiger Nutzung regenerativ erzeugter Energie kann das Treibhauspotenzial gegenüber konventionellen erdgasbasierten Verfahren um bis zu 97 Prozent gesenkt werden [36]. Gleichzeitig zeigt die Analyse technische und organisatorische Herausforderungen auf. Dazu zählen die begrenzte Verfügbarkeit von Transportbehältern, die zeitlich fluktuierende Windstromerzeugung sowie infrastrukturelle Restriktionen. Die Projektergebnisse zeigen außerdem, dass sich der LKW-Transport der Schmelze zu den Gießereien über Entfernungen bis 200 Kilometer wirtschaftlich darstellen lässt. Die Flexibilisierung der Gießereiprozesse und eine gezielte Erweiterung der dezentralen Infrastruktur stellen zentrale Hebel dar, um die Effizienz der Direktnutzung regenerativer Energie weiter zu steigern [36].

4.4 Energieeffizienz durch die optimierte Bereitstellung von Kühlschmierstoff – Projekt: E-KISS

Im Kontext moderner Werkzeugmaschinen und insbesondere bei Zerspan- und Umformprozessen gelten Kühlschmierstoffe (KSS) nach wie vor als unverzichtbar. Sie übernehmen zentrale Funktionen wie Kühlung, Schmierung und Spanabfuhr und ermöglichen so technisch-wirtschaftlich erfolgreiche Fertigungsprozesse. Darüber hinaus besitzen sie ein häufig unterschätztes Potenzial zur Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz, sowohl innerhalb der Maschine als auch auf Ebene der gesamten KSS-Peripherie. Im Bereich der Ressourceneffizienz kommen in diesem Kontext vermehrt biobasierte Fluide zum Einsatz. Im Kontext der Energieeffizienz ergeben sich verschiedene Ansatzpunkte: von der Optimierung der KSS-Zufuhr im Prozess über die intelligente Regelung der Peripheriesysteme bis hin zur Umstellung auf alternative Strategien wie die Minimalmengenschmierung (MMS).

Bereits einfache konstruktive Maßnahmen können im Bereich der KSS-Versorgung zu erheblichen Einsparungen führen. So kann beispielsweise durch eine intelligente Konfiguration der Düsen und eine gezielte Steuerung des Volumenstroms die Energieeffizienz erheblich verbessert werden. Die gezielte, auf den Prozess abgestimmte Zufuhr des KSS verringert die Reibung und verbessert die Wärmeabfuhr.

Eine Fallstudie zeigt exemplarisch ein Einsparpotenzial von bis zu 23,5 % an Energie durch eine geeignete Düsenkonfiguration bei gleichbleibender technischer Performance [37]. Ein oftmals unbeachteter, aber besonders wirkungsvoller Ansatz zur Energieeffizienzsteigerung liegt außerdem im Bereich der KSS-Peripherie. Systeme zur Aufbereitung und Rückführung, wie Hochdruckpumpen, Filter-

systeme oder Absauganlagen, laufen in der Praxis häufig, unabhängig von der tatsächlichen Auslastung, im Dauerbetrieb. Frequenzgezielte Pumpen sowie geregelte Absaugsysteme ermöglichen eine signifikante Reduktion des Energieverbrauchs, ohne die technische Leistungsfähigkeit durch eine weiterhin ausreichende Versorgung mit KSS zu beeinträchtigen. Einen systematischen Ansatz zur Realisierung solcher Einsparpotenziale verfolgte das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig mit dem Forschungsprojekt E-KISS. Ziel des Projekts war die Entwicklung intelligenter Steuerungskonzepte und einer adaptiven Auslegung der KSS-Peripherie, um die Energieeffizienz in Werkzeugmaschinen messbar zu steigern. Einsparungen von bis zu 25 % konnten durch den Einsatz eines cyber-physischen Produktionssystems zur bedarfsgerechten Regelung erzielt werden [38], [39]. Ein weiteres erhebliches Effizienzpotenzial ergibt sich in der Reduktion des zugeführten KSS-Volumenstroms. Einen besonders wirkungsvollen Ansatz stellt in diesem Zusammenhang der Einsatz der MMS dar. Anstelle großer Mengen umlaufender KSS werden bei der MMS lediglich wenige Milliliter Schmierstoff pro Stunde gezielt und direkt an die Wirkstelle appliziert. Eine Rückführung des Mediums ist nicht erforderlich. Dieses Prinzip führt nicht nur zu einer signifikanten Reduzierung des Ressourcenverbrauchs, sondern ermöglicht auch den Verzicht auf große Teile der konventionellen KSS-Peripherie. Insbesondere Verbraucher mit hohem Energiebedarf wie Hochdruckpumpen und Filtrieranlagen können dadurch eingespart werden. Im direkten Vergleich weist das konventionelle KSS-System einen 27-fach höheren Energiebedarf als die MMS auf [40].

4.5 Kunststoffspritzguss

Der Kunststoffspritzguss zählt zu den wichtigsten Verfahren der Kunststoffformung [41]. Im Jahr 2017 entfielen 21 % der Produktionswerte der Gummi- und Kunststoffmaschinen auf Spritzgießmaschinen. Das Verfahren ermöglicht eine wiederholgenaue Herstellung großvolumiger Bauteile mit komplexen Geometrien in kurzen Zykluszeiten und kommt insbesondere im medizinischen Sektor, in der Spielzeug- oder der Automobilbranche zum Einsatz [42].

Spritzgussanlagen werden überwiegend elektrisch betrieben. Dabei bieten vollelektrische Antriebe für Pumpen und Trockner gegenüber hydraulischen Varianten erhebliche Vorteile in der Energieeffizienz [43].

Ein zentraler Indikator zur Bewertung der Energieeffizienz ist der spezifische Energiebedarf, gemessen in Kilojoule Energieeintrag pro Kilogramm Produkt. Je nach verwendeter Maschine, Prozessparametern und Durchsatz variiert dieser zwischen drei und 30 Kilojoule je Kilogramm Produkt [41]. Nach dieser Definition kann der massenspezifische Energiebedarf durch einen höheren Durchsatz erreicht werden. Projekte des IWF zur Entwicklung geeigneter energetischer Leistungsindikatoren im Kunststoffspritzguss (EU FP7, Grant Agreement No. 247831) konnten zu einer differenzierteren Bewertung des Prozesses führen. Hierbei wird neben dem Materialdurchsatz auch die Produktmasse und die Durchlaufzeit berücksichtigt. Somit finden auch verschiedene Materialgruppen, wie PLLA, CA, PLA, PP, Bio-PE Berücksichtigung. Mittels Regression kann der Energiebedarf ge-

planter Prozesse vorab vorhergesagt werden, was eine Grundvoraussetzung für unter anderem eine energieflexible Prozessfahrweise bietet [44].

Der Durchsatz und damit der spezifische Energiebedarf ist maßgeblich abhängig von dem Gewicht der gespritzten Teile, der Einspritzzeit und der Kühldauer. Handlungsspielräume zur Optimierung dieser drei Größen werden bereits durch die Materialauswahl beschränkt, da sich mit ihrer spezifischen Charakteristiken, wie die Dichte, die Schmelztemperatur und mögliche Flussraten, entscheiden. Während des Produktdesigns kann durch die Minimierung des Produktvolumens und der Bauteildicke eine energieoptimierte Produktion Anwendung finden. Auch die energetische Optimierung in der Prozesssteuerung ist unter Berücksichtigung der resultierenden Produktqualität möglich.

Weiterhin eröffnen sich während des Entwurfs der Spritzgussformen Handlungsspielräume zur Optimierung der Energieeffizienz. Der Spritzzyklus kann durch ein an die Produktform angepasstes Kühlungssystem verkürzt werden [41]. Die Anzahl der Produktkavitäten je Spritzgussform ist außerdem proportional zum Durchsatz und damit während des Designs der Spritzgussformen zu berücksichtigen. Angesichts verkürzter Produktlebenszyklen, wachsender Variantenvielfalt und dem zunehmenden Einsatz von Rezyklaten muss der Spritzgussprozess künftig flexibler gestaltet werden. Dies betrifft sowohl die Materialhandhabung als auch die Integration von erneuerbaren Energien in die Prozesssteuerung. Auf Fabrikebene sollte die Flexibilisierung des Kunststoffspritzgusses im Kontext schwankender Stromverfügbarkeiten als Schlüssel zur nachhaltigen Produktion verstanden und gefördert werden.

Im Verbundprojekt DIAZI wird aktuell am IWF zu vorausschauenden digitalen Produktionssystemen mit Fokus auf den Kunststoffspritzguss geforscht. Hierbei wird ein Fokus auf den Energiebedarf der Anlagen an der Schnittstelle zu flexiblen Produktionsplanungsstrategien gelegt. Echtzeitfähige und KI-basierte Surrogatmodelle befinden sich aktuell in Entwicklung und sollen effizient in die Industrie transferiert werden, um relevante Stakeholder in der Produktion zu unterstützen.

4.6 Energieeffiziente Batterieproduktion – Projekt: InZePro-Cluster InMiTro

Im Rahmen des Forschungsprojekts InMiTro hat das Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der TU München den Zusammenhang zwischen Lagerbedingungen von Kathodenaktivmaterialien (KAM) und deren elektrochemischen Eigenschaften untersucht. Im Fokus standen die Materialien NMC622, NCA und NMC811, da diese als industriell relevant gelten und insbesondere NCA und NMC811 aufgrund ihres hohen Nickelanteils als feuchtigkeitssensitiv bekannt sind. Dahingehend wurde die aktuell in der Industrie gängige Praxis kritisch hinterfragt: Da die Feuchteempfindlichkeit bekannt ist, werden die KAM standardmäßig in einer trockenen Umgebung mit einem Taupunkt zwischen -40 und -60 °C gelagert, was große Mengen an Energie erfordert. Die Trockenräume machen zwischen 30 und 50 % des Gesamtenergieverbrauchs der Batterieproduktion aus [45], [46].

Für die Durchführung der Versuche wurde ein spezielles Pulverhandhabungssystem auf Glovebox-Basis entwickelt. Dieses ermöglichte die Lagerung, Verarbeitung und Zellfertigung unter definierten atmosphärischen Bedingungen. Die Lagerung der KAM erfolgte über unterschiedliche Zeiträume (10 Minuten bis 30 Tage) in Umgebungsluft, geregelter Trocknungsluft (z. B. Taupunkt von -40 °C) sowie in Inertgas (Argon, $< 1\text{ ppm H}_2\text{O}$). Nach der Lagerung wurden die Pulver unter Schutzgasbedingungen zu Elektroden verarbeitet und zu Knopfzellen (CR2032-Format) assembliert. Dadurch konnte ausgeschlossen werden, dass während der Zellfertigung zusätzlicher Feuchteintrag erfolgt. Anschließend wurden die elektrochemischen Eigenschaften – insbesondere die spezifische Entladekapazität – bei der Formierung und über mehrere Lade-/Entladezyklen hinweg analysiert.



Abbildung 5: Experimentelle Beschichtungs- und Trocknungsanlage von Elektroden unter Argon-Atmosphäre (Bildquelle: TUM / Andreas Heddergott)

Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Materialien. Während NMC622 weitgehend stabil blieb, reagierten NMC811 und insbesondere NCA empfindlich auf Lagerung in feuchter Umgebung. So ließ sich bei NCA nach 2-wöchiger Lagerung in Umgebungsluft eine Reduktion der spezifischen Entladekapazität um bis zu 10 % feststellen, bei NMC811 lag die Einbuße bei etwa 5 %. Lagerungen unter trockenen Bedingungen (Taupunkt von -40 °C) hingegen zeigten keine signifikanten Leistungsverlechterungen. Eine weitere Analyse ergab, dass kurzzeitige Expositionen (z. B. unter 5 Stunden) auch in Umgebungsluft keine negativen Effekte verursachen. Diese Differenzierung ermöglichte es, materialspezifische Schwellenwerte hinsichtlich Lagerdauer und Luftfeuchte zu definieren.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein dreistufiges Lagerkonzept entwickelt, das die technischen Anforderungen mit ökonomischen und energetischen Aspekten in Einklang bringt. Szenario 1 beschreibt kurzfristige Expositionen wie Probenentnahme oder internen Transport (< 10 Minuten), bei denen eine Lagerung in Umgebungsluft im Reinraum (ISO 7–8) als unkritisch gilt. Szenario 2 umfasst typische Prozesszeiten (< 5 Stunden), für die ebenfalls keine sehr trockene Umgebung notwendig ist. Erst im Szenario 3 – Lagerung über mehrere Tage oder Wochen – ist eine Atmosphäre

mit Taupunkt $\leq -40\text{ °C}$ erforderlich, um die elektrochemischen Eigenschaften zu erhalten. Dieses differenzierte Konzept ermöglicht eine gezielte, bedarfsgerechte Steuerung des Energieeinsatzes.

Der energietechnische Nutzen dieser Erkenntnisse liegt insbesondere in der Vermeidung überdimensionierter Trockenräume, die bislang flächendeckend im Einsatz sind. Die Differenzierung zwischen kurz-, mittel- und langfristiger Lagerung erlaubt es, energieintensive Trocknungsbedingungen gezielt nur dort einzusetzen, wo sie tatsächlich notwendig sind. Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse tragen somit wesentlich zur Entwicklung einer energieeffizienten und gleichzeitig qualitätsgesicherten Zellfertigung bei.

4.7 Anlagenübergreifende Abwärmenutzung auf Fabrikebene

Neben Maßnahmen zur Energieeinsparung auf Anlagenebene bietet die Betrachtung des Zusammenwirkens zwischen Anlagen und Systemen wesentliche Potenziale.

In den meisten Anwendungen tritt Abwärme durch Umwandlung anderer Energieträger wie Strom oder als überschüssige Prozesswärme am Ende eines Produktionsdurchlaufs auf. Diese Wärme wird oftmals an die Hallenluft oder außerhalb des Fabrikgebäudes an die Umgebungsluft abgeführt, wobei ein weiterer energetischer Aufwand zum Betrieb der Kühlanlagen entsteht. Zugleich benötigen Maschinen Wärmeenergie zur Prozessführung, beispielsweise bei der Bauteilreinigung. Dass der Einsatz von elektrischem Strom oder Erdgas als Energieträger zur Beheizung von Reinigungsbädern fast vollständig durch ungenutzte Abwärme anderer Prozesse ersetzt werden kann, wurde vom PTW der TU Darmstadt in den Projekten ETA-Fabrik und ETA-Transfer demonstriert. In einem ersten Projekt wurde in der Forschungsfabrik ETA-Fabrik an der TU Darmstadt unter anderem ein Abgaswärmetauscher an einem Härteofen installiert. Die aus dem heißen Abgasstrom zurückgewonnene Wärmeenergie wurde genutzt, das Reinigungsbad einer Bauteilreinigungsanlage zu erwärmen, sodass die eigentliche Beheizung durch elektrischen Strom zurückgefahren werden konnte [17]. In einem nachfolgenden Projekt wurde die Industrietauglichkeit der Lösung gezeigt. Zusammen mit der Bosch Rexroth AG wurden drei Wärmebehandlungsöfen an einem Standort des Unternehmens mit entsprechenden Wärmetauschern im Abgasstrom nachgerüstet und die Abwärme über Wärmetauscher in die Reinigungsbäder mehrerer Reinigungsmaschinen geleitet. Die zuvor verbauten elektrischen Heizungen der Reinigungsanlagen wurden nicht zurückgebaut, sodass die Verfügbarkeit der Reinigungsanlagen auch unabhängig vom Betrieb der Öfen erhalten blieb. Durch diesen Aufbau konnte die elektrische Beheizung der Bäder um 95 % durch zuvor ungenutzte Abwärme ersetzt werden. Hierdurch ergibt sich eine jährliche Einsparung von 420.000 kWh elektrischem Strom [47]. Der Ansatz lässt sich zudem auf weitere Wärmebehandlungsöfen ausweiten.

4.8 Energieflexibilitätpotenziale in der Lebensmittelindustrie

Neben Anwendungen in der metall- und kunststoffverarbeitenden Industrie hat die produktionstechnische Forschung auch Lösungen

für weitere Branchen betrachtet. Beispielsweise wurden in der Lebensmittelindustrie im Rahmen des Projekts SynErgie (Förderkennzeichen: 03SFK3A0-2) vielversprechende Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz entwickelt. Bei der Verarbeitung und Herstellung von Milchprodukten entfallen erhebliche Teile der Betriebskosten auf den Energiebedarf – insbesondere für die Bereitstellung von Wärme, Prozesskälte und die Aufrechterhaltung der Kühlkette [48].

An einem Molkerei-Standort wurde der Betrieb der Kälteanlagen auf Energieflexibilitätspotenziale untersucht und eine entsprechende Strategie gestaltet. Die Kälteanlagen im betrachteten Fall weisen eine Anschlussleistung von 600 kW und durchschnittlich 5000 Betriebsstunden im Jahr auf. Durch die gezielte Nutzung inhärenter Speicherkapazitäten – etwa in Käselagern oder Salzwasserbecken – ist es möglich Kühlleistung zu Zeiten erneuerbarer Stromerzeugung und geringerer Strompreise bereitzustellen. So konnten die Bruttoenergiekosten im untersuchten Fall um rund 10 % gesenkt werden [49].

In einem weiteren Beispiel der Lebensmittel- und Getränkeindustrie innerhalb des Forschungsprojekts SynErgie konnte die im Brauprozess benötigte Bereitstellung von Prozesskälte flexibilisiert und Energiekosten durch den optimierten Anlagenbetrieb gesenkt werden. Im betrachteten Prozess entfallen etwa 45 % des Kältebedarfs der Produktion auf die Kühlung von Lagertanks für Bier. Untersuchungen des Prozesses zeigen, dass diese Tanks eine inhärente Speicherkapazität darstellen, die eine zeitliche Verschiebung der Kühlleistung von bis zu 96 Stunden ermöglichen. Dieses Flexibilitätspotenzial erlaubt es, die Kühlaggregate gezielt in Zeiten niedriger Strompreise oder hoher Verfügbarkeit erneuerbarer Energien zu betreiben – mit einer daraus resultierenden Kosteneinsparung von rund 9 % [50].

4.9 Energieflexibler Kunststoffspritzguss – Projekt: SynErgie III

Im Rahmen des Forschungsprojektes SynErgie III hat sich das *ivw* der TU München unter anderem mit der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen auf der Fabrikebene auseinandergesetzt. Für einen beispielhaften Anwendungsfall eines KMU aus dem Bereich der variantenreichen Kunststoffverarbeitung wurden Methoden und Ansätze entwickelt, um den bestehenden Maschinenpark energieflexibel zu steuern und den Energieverbrauch als wesentliche Entscheidungsgröße in die Produktionsplanung zu integrieren.

Eine energieorientierte Planung der Produktion stellt insbesondere für Unternehmen mit einem hohen Energieverbrauch einen großen ökonomischen Hebel dar, da die Energiekosten dort einen signifikanten Kostenanteil darstellen, den es zu reduzieren gilt [29]. Nichtsdestotrotz können auch Unternehmen mit einem geringeren Energieverbrauch von einer solchen Planung profitieren, z. B., indem ihre Lastspitzen geglättet werden, wodurch sich die Leistungskosten reduzieren [51].

Um entsprechende Einsparungen zu ermöglichen, wurde in einem ersten Schritt der Zusammenhang zwischen den Produktionsaufträgen und den Energieverbräuchen der vorhandenen Spritzgießmaschinen untersucht. Das Unternehmen verfügt dahingehend über eine umfangreiche digitale Datenbasis, die für die Analyse genutzt

wurde. Bei der regressionsbasierten Auswertung konnten die Ergebnisse aus dem zuvor genannten Projekt im Bereich Kunststoffspritzguss, dass der Massendurchsatz und der Gesamtenergieverbrauch einer Spritzgießmaschine korrelieren, bestätigt werden. Da der Massendurchsatz bereits vor dem Produktionsstart berechnet werden kann, ist eine Prognose der maschinen- bzw. der auftragspezifischen Energieverbräuche möglich.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein energieorientierter Planungsalgorithmus entwickelt, der eine bestehende Auftragsreihenfolge so umplanen kann, dass die auftretenden Lastspitzen minimiert werden. Eine prototypische Implementierung für ausgewählte Maschinen und ein anschließender Vergleich mit dem Produktionsplan, der die schnellste Auftragsabarbeitung abbildet, haben gezeigt, dass die maximal auftretenden Lastspitzen von ca. 300 kW auf 200 kW reduziert werden können. Die Glättung geht allerdings zulasten der Produktionsdauer, die im Falle der niedrigeren Lastspitzen um ca. 1,5 Tage länger war als im Referenzfall. Eine Erweiterung der energieorientierten Planung auf den gesamten Maschinenpark kann dennoch zu einer Reduzierung der Leistungskosten und somit zu einer Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens beitragen [9].

4.10 Sektorenübergreifende Potenziale am Beispiel von Fabriken und Fahrzeugflotten

Fabrikgebäude und Industrieparks bestehen häufig aus einer Vielzahl organisatorisch oder technisch getrennt operierender Einheiten mit jeweils eigenen Zielsetzungen – gleichzeitig sind sie über zentrale hybride Energienetze, etwa für Strom oder Wärme, miteinander verbunden. Diese strukturelle Trennung bei gleichzeitiger energetischer Vernetzung führt häufig zu Ineffizienzen in Betrieb und Steuerung der Energiesysteme. Im Projekt KI4ETA (Förderkennzeichen: 03EN2053 A–L) wurden daher Ansätze zur Integration des Fabrik-systems mit externen Energiesystemen wie Stromnetz und Elektromobilität untersucht. Ein Schwerpunkt war die Einbindung von Elektrofahrzeugen in das elektrische Versorgungssystem der Forschungsfabrik „ETA-Fabrik“ der TU Darmstadt. Im Rahmen dieser Sektorenkopplung von Industrie, Stromnetz und Verkehr wurde eine bidirektionale Ladeinfrastruktur aufgebaut, die es ermöglicht, Elektrofahrzeuge als mobile Speicher in das Fabriknetz einzubinden. Ergänzend zur bestehenden unidirektionalen AC-Ladesäule (Typ 2, 22 kW) wurde eine DC-basierte Ladeeinrichtung installiert, die über den DC-Zwischenkreis des bestehenden hybriden Energiespeichersystems versorgt wird.



Abbildung 6: Versuchsfahrzeug und Ladesäule neben der ETA-Forschungsfabrik (Bildquelle: PTW, TU Darmstadt)

Durch das bidirektionale Laden kann überschüssige Energie aus dem Fabrikssystem im Fahrzeug zwischengespeichert und bei Bedarf wieder eingespeist werden. Dies verbessert den Energiefluss, erhöht die Flexibilität und unterstützt eine effizientere Nutzung erneuerbarer Energien. Im Projekt konnte der technische Nutzen und die Machbarkeit des Vehicle-to-Grid-Konzepts nachgewiesen werden. Das entwickelte Gesamtkonzept aus bidirektionaler Ladeinfrastruktur und hybriden Energiespeichersystem wurde in einer wissenschaftlichen Publikation [52] veröffentlicht.

An der Schnittstelle der Sektoren Industrie, Gewerbe, Mobilität und Haushalte haben sich das IWF und elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme der TU Braunschweig im Rahmen des Forschungsprojekts *flexess* (Förderkennzeichen: 03EI4005 - 03EI4005G) der intelligenten Aggregation verbraucherseitiger Energieflexibilitätpotenziale gewidmet. Anhand von Flexibilitätssfahrplänen wurden im Verbundprojekt Flexibilitätpotenziale für den laufenden Tag (Intra-Day) sowie den folgenden Tag (Day Ahead) anhand von Simulationen prognostiziert und über eine zentrale Instanz mit Netzengpassprognosen synchronisiert. Folglich wurden einzelne, netzdienliche Fahrpläne an die anbietenden Akteure zurückgemeldet. Industrieseitig konnte anhand des Trockenraums der BatteryLab Factory Braunschweig, sowie der Prozesse Beschichtung, Trocknung und Kalandrieren aufgezeigt werden, wie Flexibilitätssfahrpläne generiert, kommuniziert und umgesetzt werden könnten. Auch über den Sektor Industrie hinaus hat sich das IWF an der Analyse, Simulation und Bewertung von Flexibilitätssstrategien von Kälteanlagen im Gewerbesektor beschäftigt. Die Projektergebnisse zeigen, dass auch das Denken über Sektorgrenzen hinweg notwendig für eine erfolgreiche verbraucherseitige Flexibilisierung und somit der Realisierung höherer Anteile fluktuierender, regenerativer Energien im Energiesystem ist [53].

5 Lern- und Forschungsfabriken in der energiebezogenen Produktionsforschung

Neben der fachlichen Expertise zu energiebezogenen Fragestellungen der produktionstechnischen Forschung ist in den vergangenen zehn Jahren hierzulande eine leistungsstarke Forschungsinfrastruktur an den Instituten entstanden. Beispiele hierfür sind Lern- und Forschungsfabriken, die als realitätsnahe Experimentierumgebungen dienen und die Anlagen und Systeme ganzer Fabriken aufweisen. In diesen Forschungsfabriken können neue Ansätze erprobt und systemische Betrachtungen und ganzheitliche Zusammenhänge nachgestellt und experimentell untersucht werden. Lernfabriken erweitern diese Strukturen didaktische Konzepte neben den realen Anlagen und Prozessen und schaffen so eine realitätsnahe und problemorientierte Umgebung für den Wissenstransfer [54].

Beispiele für Forschungsinfrastruktur dieser Art stellen die *ETA-Fabrik* in Darmstadt, die *Lernfabrik der Technischen Universität Braunschweig* und die *Green Factory in Augsburg* dar.

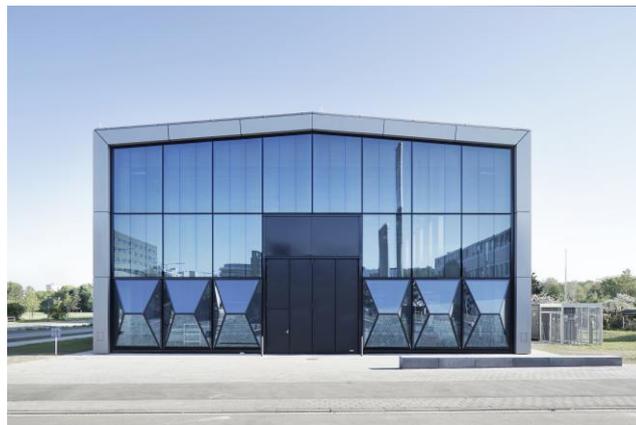


Abbildung 7: ETA-Fabrik Darmstadt (Bildquelle: PTW, TU Darmstadt / Eibe Sönnecken)

Die ETA-Fabrik (Energietechnologien und Anwendungen in der Produktion) beinhaltet zwei Produktionslinien für Forschung und Lehre, die typische Prozesse der metallverarbeitenden Industrie beinhalten. Beispielsweise Zerspanung, Bauteilreinigung, Wärmebehandlung, Roboterhandlung und Montage. Für Lehrzwecke können in einer der Linien gezielt verbreitete Arten der Energieverschwendung nachgestellt und deren Identifikation und Bewertung trainiert werden. Darüber hinaus sind vielfältige Energieeffizienz und Energieflexibilitätsmaßnahmen greifbar umgesetzt. Über die Anlagen hinaus verfügt die ETA-Fabrik über ein komplexes versorgungstechnisches System, das es erlaubt, die Wärme- und Kälteversorgung einer metallverarbeitenden Fertigung sowie Systeme der Prozessindustrie abzubilden und experimentell zu untersuchen. Dabei wird ein systemischer Gedanke verfolgt, der darauf abzielt, Energie innerhalb der Fabrik oder gesamtheitlich effizient einzusetzen und beispielsweise Abwärme einer Maschine auch zeitversetzt für andere Prozesse zu nutzen. Außerdem werden Maßnahmen umgesetzt, die Fabrik an eine volatile Energieversorgung und schwankende Energiemärkte anzupassen. Die Produktionslinie wird schon heute regelmäßig von einem Team

aus Studierenden und wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern betrieben, wobei tagesaktuelle Energiemarktdaten in der Produktionsplanung berücksichtigt werden.



Abbildung 8: Blick auf die Produktionslinien in der ETA-Fabrik (Bildquelle: PTW / Eibe Sönnecken)

Die Lernfabrik der Technischen Universität Braunschweig begleitet Unternehmen aus allen Branchen mit einem Fokus auf produzierende Unternehmen und adressiert die Schwerpunkte der Energie- und Ressourceneffizienz, Digitalisierung und Urbane Produktion. Nach einer umfassenden Modernisierung werden in der neu geschaffenen Lernfabrik für die „Zirkuläre Batteriezellproduktion“ kleinskalierte, modulare Lernstationen, jeweils einzelne Prozess-



Abbildung 9: Infrastruktur zur Eigenstromversorgung mittels Windkraftanlage und Photovoltaikanlage für die Lernfabrik am IWF der TU Braunschweig (Bildquelle: IWF TU Braunschweig)

schritte der Batteriezellproduktion abbilden und flexibel zu Prozessketten kombinierbar gestalten. Diese werden ergänzt durch periphere Anlagen sowie Anlagen zur Abbildung der technischen Gebäudeausrüstung (TGA). Wie in Abbildung 9 gezeigt, integriert sich in diesem Sinne auch die Eigenerzeugung erneuerbarer Energie mittels Windkraft- und Photovoltaikanlage, welche in Kombination mit einem Batteriespeichersystem Lehr- und Forschungsaktivitäten zum Thema der optimierten Eigenstromnutzung durch Energieflexibilität ermöglicht.

Die physischen Lernstationen und Anlagen sind eingebettet in eine virtuelle Umgebung (cyber-physisches System), welche es erlaubt, einzelne Stationen durch virtuelle Lernstationen zu emulieren. Dadurch kann die Lehr- und Lernumgebung schnell an unterschiedliche Fragestellungen und an zukünftige Trends angepasst werden.

Die Integration der vorwärts- und rückwärtsgerichteten Prozessketten zu einer zirkulären Batteriezellproduktion ermöglicht u.a. die Vermittlung von Fach- und Methodenkompetenzen in den Bereichen:

- Energie- und ressourceneffiziente Verfahrens- und Fertigungstechniken zur Herstellung und zum Recycling von Traktionsbatterien als Basis für geschlossene Stoffkreisläufe,
- Implementierung von Technologien der Industrie 4.0 zur intelligenten Gestaltung von Prozessen sowie von Material- und Stoffkreisläufen,
- Zirkuläre Produktgestaltung und Materialauswahl sowie deren Charakterisierung als Grundlage für geschlossene Kreisläufe,
- Quantitative Nachhaltigkeitsbewertung und ein darauf basierendes Life Cycle Engineering.

Die Lernfabrik „Zirkuläre Batteriezellproduktion“ erweitert die apparative Ausstattung der Technischen Universität Braunschweig und stellt eine Infrastruktur gezielt für die Aus- und Weiterbildung von wissenschaftlichen Nachwuchskräften bereit. Sie bettet sich hierbei ein in das in Abbildung 10 gezeigte umfassende Forschungsnetzwerk bestehend aus weiteren Einrichtungen der Batteriezellproduktion und des Batterierecyclings der Braunschweig BatteryLabFactories and More (BLB+) am Forschungsflughafen in Braunschweig sowie des gemeinsam mit der Fraunhofer Gesellschaft und weiteren industriellen Akteuren betriebenen Wasserstoffcampus in Salzgitter.



Abbildung 10: Forschungsnetzwerk und -infrastruktur and der TU Braunschweig mit Bezug zur Lernfabrik (Bildquellen: TU Braunschweig / Braunschweig Labfactories for Batteries and more / Fraunhofer ZESS / HDR GmbH)

Ein tiefgehendes Verständnis über geschlossene (zyklische) Material- und Stoffkreisläufe ist dabei ein zentraler Grundpfeiler für die Ausbildung und Förderung von Fachkräften der nächsten Generation von Energiespeichern und Voraussetzung für eine intelligente und effiziente Produktion nachhaltiger Speichertechnologien am Wirtschaftsstandort Deutschland. Die Lernfabrik orientiert sich dabei am Prinzip des forschenden Lernens. Die Qualifizierungsmaßnahmen sind an den aktuellen Erkenntnissen aus der Forschung und Bedarfen der Industrie ausgerichtet. Neue Technologien und Methoden für eine zirkuläre Batteriezellproduktion können frühzeitig in die Testumgebung integriert und für die Qualifizierung von Fachkräften sowie insbesondere des wissenschaftlichen Nachwuchses zugänglich gemacht werden.

Ein weiteres Beispiel ist die Zukunftsfabrik des iwB (siehe Abbildung 11) an der TU München, die Synergien aus der

interdisziplinären Zusammenarbeit über alle Ebenen der Wertschöpfung hinweg freisetzt. Die Produktionsumgebung basiert auf einer modularen Infrastruktur, die flexibel aus unterschiedlichen Fertigungsschritten der Batterieproduktion zusammengesetzt werden kann.



Abbildung 11: iwb-Halle (Bildquelle: TUM / Andreas Heddergott)

Dabei entsteht eine reale Demonstrations- und Forschungsumgebung, in der neue Technologien unter praxisnahen Bedingungen getestet und weiterentwickelt werden. Die Umgebung ist sowohl physisch als auch digital zugänglich und erlaubt dadurch hybride Experimente und Analysen. So können zukunftsweisende Trends frühzeitig erkannt, integriert und wissenschaftlich fundiert bewertet werden.

Seit Februar 2020 läuft am zweiten Standort des Fraunhofer IGCV im Augsburger Innovationspark der Forschungsbetrieb in der Green Factory (siehe Abbildung 12). Dort werden produzierende Unternehmen bei der Reduktion von Energie- und Ressourceneinsatz unterstützt. Dies spiegelt sich sowohl im innovativen Gebäudekonzept als auch im laufenden Forschungs- und Demonstrationsbetrieb wider. Das Energiekonzept der Green Factory besteht unter anderem aus Photovoltaik, Wärmepumpe, Fernwärmeanschluss, Kältemaschine mit Abwärmenutzung und Betonkern-aktivierung. Ein digitales Energiemonitoring stellt in Echtzeit relevante Kennzahlen zum Energieverbrauch und zur Nachhaltigkeit der Produktionsanlagen bereit, welche auf einem Monitor im Eingangsbereich dargestellt werden. Im kontinuierlichen Energiemanagement werden Effizienzmaßnahmen, wie beispielsweise die Nachtabsenkung der Raumluftechnik, bewertet und umgesetzt. Der modulare Aufbau des Gebäudes ermöglicht eine flexible Anpassung der technischen Infrastruktur an unterschiedliche Forschungs- und Anwendungsbedarfe. Im Mittelpunkt stehen praxisnahe Forschungsarbeiten aus den Feldern additive Fertigung, Automatisierung, Energiespeicher, nachhaltige Fabrikplanung und -betrieb sowie Digitalisierung und künstliche Intelligenz. Produktionsprozesse werden durch eine Betrachtung und Bewertung der Material- und Energieflüsse ressourcen- und energieeffizient gestaltet. Die Green Factory dient als Demonstrationsplattform für nachhaltige Produktionssysteme, unterstützt den Technologietransfer zu kleinen und mittleren Unternehmen und fördert die praxisnahe Qualifizierung zukünftiger Fachkräfte.



Abbildung 12: Green Factory des Fraunhofer IGCV in Augsburg mit Auszug Energiemonitoring (Bildquelle: Fraunhofer IGCV / Johannes Huismann)

Als Einrichtungen an den jeweiligen Technischen Universitäten sind die Fabriken in die Ausbildung des ingenieurwissenschaftlichen Nachwuchses integriert und tragen dazu bei, aktuelle Forschungsthemen unmittelbar und praxisnah zu vermitteln. Neben der Wissensvermittlung in der akademischen Ausbildung finden regelmäßig Weiterbildungsveranstaltungen für Personal aus der Industrie statt.



Abbildung 13 Studierende beim Betrieb von Montagearbeitsplätzen in der Produktionslinie zur energiebezogenen Aus- und Fortbildung in der ETA-Fabrik (Bildquelle: PTW, TU Darmstadt)

Um die Standorte sind Netzwerke aus Unternehmen entstanden, durch die ein enger Austausch zwischen Industrie und universitärer Forschung stattfindet. Durch diesen Schulterschluss werden zum einen Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis übernommen und zum anderen Bedarfe und zukünftige Forschungsfragen an die Institute zurückgespiegelt.

Die vorgestellten Beispiele stehen stellvertretend für Strukturen und Kompetenzzentren, die deutschlandweit an Forschungseinrichtungen bestehen und an einer energieeffizienten, energieflexiblen und dekarbonisierten Industrie von morgen arbeiten. Weitere Beispiele sind unter anderem in Chemnitz und zu Stuttgart zu finden.

6 Handlungsempfehlungen

In den Handlungsfeldern Energieeffizienz, Energieflexibilität und Dekarbonisierung sind innerhalb der WGP Fachwissen und Erfahrungen in der vollen Breite produktionstechnischer Anwendungen vorhanden. Zusammen mit dieser besteht entwickelte Forschungsinfrastruktur, als Grundlage für zukünftige Forschungsfragen um das Energiesystem industrieller Anwendungen. Der Lösungsraum möglicher Innovationen ist jedoch bei weitem noch nicht ausgeschöpft und bietet Potentiale für neue Wettbewerbsfähigkeit. Die vorhandene Forschungslandschaft bietet hierzu eine gute Ausgangsposition, die genutzt werden sollte. Die im folgenden aufgeführten Handlungsfelder stellen einige solcher Potentiale dar, die Chancen für die zukünftige Entwicklung des Industriestandortes Deutschland bieten.

6.1 Dekarbonisierung und Maßnahmentransfer

Um mit Dekarbonisierungsbestrebungen in der Fertigungsindustrie das Ziel einer Net-Zero-Produktion als Beitrag zum übergeordneten politisch verankerten Ziel der Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen, bedarf es einer ganzheitlichen Betrachtung der Umsetzungsmöglichkeiten von der Zielformulierung bis hin zur Implementierung einzelner Maßnahmen. Während heute bereits viele Unternehmen ein langfristiges Klimaziel formuliert haben, bleibt der Weg dorthin in Form einer konkreten Roadmap technischer Maßnahmen häufig noch unklar. Vielfach werden Ziele über die bloße Kompensation von Emissionen statt tatsächlicher Reduktion verfolgt. Daher bedarf es weiterer Forschung, die ausgehend von formulierten langfristigen Klimazielen eines Unternehmens unterschiedliche Transformationspfade zur Erreichung dieser Ziele aufzeigt, quantitativ bewertet und damit zu objektivierten Entscheidungen beiträgt. Viele der dafür notwendigen Technologien sind heute bereits verfügbar. Dennoch findet sich in der Praxis eine Lücke zwischen langfristigen Klimazielen und der Umsetzung konkreter zusammenwirkender Maßnahmen in einem komplexen System. Hier setzt Forschung zur Überwindung von Transformationshürden an. Es ist zu untersuchen, wie einerseits technische Lösungen von der Forschung in die industrielle Anwendung überführt und andererseits die Kompetenzen zum Verständnis komplexer industrieller Energiesysteme vermittelt werden können. Wichtige Instrumente dafür sind Modell- und Lernfabriken, die im industriellen Maßstab als Best-Practice-Fabriken den Zustand einer Net-Zero-Produktion realitätsnah demonstrieren und Kompetenzen in praxisnahen Schulungen an Unternehmen und zusätzliche bereits an Studierende vermitteln.

6.2 KI-assistierte Systeme als Befähiger von Energieeffizienz und Energieflexibilität

Der Einsatz von KI-basierten Assistenzsystemen in der Industrie ermöglicht ein gezieltes Energielastmanagement und befähigt Unternehmen, verschiedene Maßnahmen zur Energieflexibilisierung umzusetzen. So lassen sich Energieverluste durch intelligente Prozessoptimierung wirksam verringern. Darüber hinaus ermöglichen

Vorhersagen von Energieverbräuchen, Lastspitzen frühzeitig zu erkennen und gezielt gegenzusteuern. Gleichzeitig trägt die vorausschauende Wartung dazu bei, ineffiziente und energieintensive Maschinenzustände rechtzeitig zu identifizieren und zu beheben. Damit solche Systeme auch in der Breite wirksam eingesetzt werden können, ist eine intensive Forschung notwendig, insbesondere im Hinblick auf eine resiliente und kostengünstige Implementierung in kleinen und mittelständischen Unternehmen. Ergänzend dazu gilt es, bereits entwickelte Demonstratoren in höhere Technologiegrade (TRL) zu überführen und die langfristige Instandhaltung solcher digitaler KI-assistierter Systeme sicherzustellen.

6.3 Systemische Betrachtung von Energieeffizienz

Energieeffizienz ist konsequent als systemisches Optimierungsziel zu verstehen und politisch entsprechend zu unterstützen. Isolierte Maßnahmen auf Maschinenebene greifen zu kurz, wenn Potentiale auf höherer Ebene – etwa durch intelligente Prozesskettensteuerung, ganzheitliches Energiemanagement in der Fabrik oder sektorübergreifende Vernetzung – ungenutzt bleiben. Politische Förderinstrumente sollten daher verstärkt auf integrative Ansätze abzielen, die Effizienzsteigerungen auf mehreren Ebenen gleichzeitig anstreben: von der Komponente über den Produktionsprozess bis hin zur Fabrikstruktur und ihrem energiewirtschaftlichen Umfeld. Reallabore und Lernfabriken können hierbei als Katalysatoren dienen, um komplexe Systemzusammenhänge erforschbar und anwendbar zu machen.

6.4 Systemische Betrachtung von Energieflexibilität und Umgang mit Zielkonflikten

Energieflexibilität ist – ebenso wie Energieeffizienz – systemisch über alle Ebenen der industriellen Wertschöpfung hinweg zu betrachten. Flexibilitätspotentiale ergeben sich nicht nur durch technische Anpassungen auf der Maschinenebene, sondern vor allem durch eine intelligente Prozessplanung, die organisatorische Anpassung betrieblicher Abläufe sowie durch die Kopplung von Produktionssystemen mit Energiespeichern und übergeordneten Energiemanagementsystemen. Diese systemische Perspektive eröffnet neue Spielräume, bringt jedoch auch Zielkonflikte mit sich: Maßnahmen zur Flexibilisierung können in bestimmten Fällen der Energieeffizienz einzelner Prozesse entgegenstehen, beispielsweise wenn bewusst ineffizientere Fahrweisen zugunsten netzdienlicher Flexibilität gewählt werden müssen. Politische Rahmenbedingungen und Fördermechanismen sollten diesen Zielkonflikt anerkennen und nicht ausschließlich auf maximale Effizienz einzelner Teilsysteme, sondern auch auf Resilienz und Systemdienstleistungen ausgerichtet sein. Die Rahmenbedingungen sollten daher so gestaltet werden, dass sie die Abwägung zwischen Effizienz und Flexibilität explizit berücksichtigen – etwa durch technologieoffene Bewertungskriterien oder die gleichwertige Berücksichtigung systemdienlicher Flexibilität neben Effizienz Kennzahlen.

6.5 Betrachtung von Energieflexibilität im Kontext wärmebasierter Produktionsprozesse

Bisher wurde industrielle Energieflexibilität vor allem im Kontext elektrischer Verbraucher betrachtet. Wärmebasierte Prozesse – die oft schwerer zu flexibilisieren, aber aus ökonomischer und ökologischer Perspektive besonders relevant sind – blieben dabei weitgehend unberücksichtigt. Gerade in Bezug auf energieintensive und skalierbare Prozesse wie die Trocknung und die Konditionierung bei der Batteriezellproduktion, bestehen jedoch bedeutende Flexibilitätspotentiale, die z. B. durch den Einsatz thermischer Speicher, die Umstellung auf hybride Wärmeerzeuger oder den gezielten Einsatz alternativer Energieträger gehoben werden können. An den WGP-Instituten wurden über Jahre hinweg exzellente Forschungsinfrastrukturen aufgebaut, mit denen solche Konzepte unter realitätsnahen Bedingungen untersucht und gemeinsam mit Partnern aus der Industrie – insbesondere dem Mittelstand – in die Anwendung gebracht werden können. Diese vorhandene Expertise und die etablierten Transferstrukturen gilt es gezielt weiterzuentwickeln. Eine stärkere politische Förderung von Demonstrationsvorhaben im Bereich wärmebasierter Energieflexibilität – auch jenseits großer industrieller Leuchtturmprojekte – ist entscheidend, um diesen bislang unterrepräsentierten Bereich wirksam in die Transformation des Energiesystems einzubinden.

6.6 Automatisierte energieflexible Produktionssteuerung

Erste Untersuchungen zeigen, dass sich durch die Integration von Energiekennzahlen in die Produktionsplanung signifikante Kostenvorteile gegenüber der klassischen Planung – etwa basierend auf Fertigungs- und Durchlaufzeiten – erzielen lassen. Diese Verknüpfung eröffnet neue Potentiale für eine energieadaptive Produktionssteuerung, die sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile bietet. Zugleich adressieren automatisierte Systeme die Herausforderung für produzierende Betriebe, qualifiziertes Personal zu finden und Fachwissen zu skalieren. Somit stellen Innovationen, die zu einem höheren Automatisierungsgrad in der Produktionsplanung beitragen, einen wesentlichen Entwicklungsschritt hin zu einem zukunftsfähigen Industriestandort dar.

Die zunehmende Automatisierung erfordert eine stärkere Vernetzung von Produktionsmaschinen sowie die durchgängige Integration von Daten zum Energieverbrauch in bestehende IT-Systeme. Eine energiebewusste Produktionsplanung kann dann wesentlich zur Reduktion der Energiekosten beitragen.

Dieser Fortschritt kann von politischer Seite unterstützt werden, indem geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden. Ein Wegfall der Benutzungsstundenregel könnte zum Abbau von Fehlanreizen für die Einführung von Flexibilitätsmaßnahmen beitragen. Zugleich entstehen hierdurch wirtschaftliche Anreize, Energieflexibilitätspotentiale in der Planung zu berücksichtigen und durch eine automatisierte Auftragsführung auszunutzen.

6.7 Standardisierung, Datenschnittstellen für Energieflexibilität

Für die erfolgreiche Umsetzung sektorübergreifender Flexibilitätslösungen besteht weiterer Forschungsbedarf in den Bereichen Standardisierung, Interoperabilität und offene Systemarchitekturen. Erforderlich ist insbesondere die Entwicklung einheitlicher Schnittstellen, um Anlagen und IT-Systeme unternehmens- und sektorenübergreifend sicher, einfach und effizient zu vernetzen. Offener, interoperabler Datenaustausch muss dabei sowohl technischen als auch regulatorischen Anforderungen gerecht werden und hohe Standards bei Datenschutz und IT-Sicherheit erfüllen. Künftige Entwicklungen sollten sich dabei stärker an europäischen Vorgaben wie dem Network Code on Demand Response orientieren, um langfristige Anschlussfähigkeit sicherzustellen. Dabei braucht es dezentrale, Open-Source-basierte Flexibilitätsmanagementplattformen mit hohem Reifegrad, die Modularität ermöglichen und Lock-in-Effekte vermeiden. Zudem gab es in den letzten Jahren beachtliche Fortschritte der privaten Anbieter von Energiemanagementsystemen, welche zunehmend flexible Verbraucher wie Wärmepumpen, Batteriespeicher, E-Autos und Smart-Home-Komponenten integrieren. Ein weiterer Schwerpunkt künftiger Forschung sollte die Übertragung und Verknüpfung der im Gebäudebereich entwickelten Lösung auf die Industrie sein, um eine sektorübergreifendes Flexibilitätsmanagement zu erreichen.

6.8 Energieproduktivität vorantreiben

Die in diesem Standpunkt beschriebenen Beispiele zeigen: Der aktuell verbreitete Stand der Technik weist erhebliche Potentiale zur Steigerung der Energieproduktivität – also der wirtschaftlichen Leistung pro eingesetzter Energieeinheit – auf. Für mehrere weit verbreitete Fertigungstechnologien – beispielsweise in der Zerspanung, beim Spritzgießen oder der Bauteilreinigung – konnten Fortschritte aufgezeigt werden. Hier gilt es auf die erarbeitete Expertise aufzubauen und weitere Effizienzgewinne zu realisieren. Insbesondere die ganzheitliche Betrachtung von Energie-, Material- und Betriebsmittelströmen sowie neue, effiziente Querschnittstechnologien versprechen einen Produktivitätssprung. Ähnliches gilt für weitere Technologiefelder, wie der Wärmebehandlung sowie dem Ur- und Umformen. Insbesondere sind weiterführende Innovationen zur Bereitstellung von Prozesswärme und der Nutzung von Abwärme innerhalb von Prozessen und über Prozessgrenzen hinaus von großer Bedeutung für die Dekarbonisierung.

6.9 Förderung von Kompetenzen, Akzeptanz und Nutzerfreundlichkeit für die Integration von Energieflexibilität in betriebliche Abläufe

Die Integration von Energieflexibilitätsmaßnahmen in betriebliche Abläufe ist komplex und bringt eine Reihe an Herausforderungen mit sich. Zwar gibt es bereits erste Ansätze – etwa zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung von Flexibilitätspotentialen, zur Befähigung der Systeme und praktischen Umsetzung. Trotz vorhandener Pilotprojekte und technischer Werkzeuge zeigt sich in vielen Unter-

nehmen eine gewisse Zurückhaltung gegenüber solchen Veränderungen. Um Energieflexibilität erfolgreich im Betriebsalltag zu verankern, benötigt es deshalb nicht nur funktionierende Technologien, sondern auch klare politische Rahmenbedingungen und Regulatorik. Eine Weiterentwicklung der Netzentgeltregulierung zur Stärkung der Nachfrageflexibilität ist hierbei ein wesentlicher Ansatzpunkt. Hierdurch würden ökonomische Anreize gestärkt und eine Anpassung operativer Unternehmensabläufe motiviert.

Auf Seite der Unternehmen ist hierzu eine Förderung von Kompetenzen, Akzeptanz und Nutzerfreundlichkeit angepasster Abläufe nötig – etwa durch praxisorientierte Qualifizierungsangebote, transparente Kommunikation wissenschaftlicher Erkenntnisse und der wirtschaftlichen Vorteile und eine personalfreundliche Umsetzung. Die komplementäre Förderung grundlegender Forschung zusammen mit Transferanstrengungen sind hierbei ein wesentlicher Stellhebel.

Literatur

- [1] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. „Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland: Daten für die Jahre von 1990 bis 2023.“ Zugriff am: 20. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/11/awt_2023_d.pdf
- [2] S. Seyfried, *Reifegradorientierte Gestaltung von Klimastrategien für kleine und mittlere Unternehmen der Fertigungsindustrie* (Dissertation) (Innovation Fertigungstechnik). Darmstadt: Shaker, 2025.
- [3] M. Honegger, S. Schäfer, P. Poralla und Michaelowa, „dena-Analyse: Klimaneutralität – ein Konzept mit weitreichenden Implikationen,“ Perspectives Climate Research gGmbH, Freiburg i. B, 2020.
- [4] J. Christensen, J. Kessler, M. Krey und M. A. Marr, „Klimaneutralität von Unternehmen: Bestehende Standards, Initiativen und Label sowie Einordnung der Rolle von Treibhausgas-Kompensation,“ Berlin, 2022. Zugriff am: 7. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/analyse-klimaneutralitaet-von-unternehmen/>
- [5] *Management des Klimawandels - Übergang zu Netto-Null - Teil 1: Treibhausgasneutralität*, ISO 14068-1:2023-11, International Organization for Standardization.
- [6] Science Based Targets Initiative, „SBTi Corporate Net-Zero Standard,“ 2023. Zugriff am: 05. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/Net-Zero-Standard.pdf>
- [7] IPCC, Hg. *Global Warming of 1.5°C*. Cambridge University Press, 2022.
- [8] J. Poligkeit, T. Fugger und C. Herrmann, „Decarbonization in the Automotive Sector: A Holistic Status Quo Analysis of Original Equipment Manufacturer Strategies and Carbon Management Activities,“ *Sustainability*, Jg. 15, Nr. 22, S. 15753, 2023.
- [9] J. Sossenheimer *et al.*, „14 Energieeffizienz und Energieflexibilität in der Fertigung,“ in *Handbuch Nachhaltige Produktion*, M. F. Zäh, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2024, S. 369–396.
- [10] OECD Organisation for Economic Co-operation and Development, *Measuring Productivity: OECD Manual: Measurement of Aggregate and Industry-Level Productivity Growth*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2001. Zugriff am: 05. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2001/07/measuring-productivity-oecd-manual_g1gh2484/9789264194519-en.pdf
- [11] M. Wörle, J. Schulz und M. F. Zäh, „13 Regenerative Energieversorgung von Produktionssystemen,“ in *Handbuch Nachhaltige Produktion*, M. F. Zäh, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2024, S. 345–368.
- [12] M. Wietschel *et al.*, „Sektorkopplung - Definition, Chancen und Herausforderungen: Working Paper Sustainability and Innovation No. S 01/2018,“ 2018. Zugriff am: 05. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2018/WP01-2018_Sektorkopplung_Wietschel.pdf
- [13] M. R. Chertow, „Industrial Symbiosis: Literature and Taxonomy,“ *Annu. Rev. Energy. Environ.*, Jg. 25, Nr. 1, S. 313–337, 2000.
- [14] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Hg., „Flexibilität im Stromversorgungssystem: Bestandsaufnahme, Hemmnisse und Ansätze zur verbesserten Erschließung von Flexibilität,“ Apr. 2017. Zugriff am: 05. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/VerteilerNetz/Flexibilitaet/BNetzA_Flexibilitaet-spapier.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [15] U.S. Department of Energy, „Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them,“ 2006.
- [16] *VDI 5207 Energieflexible Fabrik. Blatt 1: Grundlagen*, 5207-1, VDI - Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Jul. 2020. Zugriff am: 05. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-5207-blatt-1-energieflexible-fabrik-grundlagen>
- [17] E. Abele *et al.*, „Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt ETA-Fabrik: Energieeffiziente Fabrik für interdisziplinäre Technologie- und Anwendungsforschung,“ *Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt ETA-Fabrik*.
- [18] M. Weigold, „LoTuS - Leistungsoptimierte Trocknung und Sauberkeit: gemeinsamer Schlussbericht: Fachbereich: Energieeffizienz für Industrie und Gewerbe (ESN 2) : Projektklaufzeit: 01.12.2019-31.05.2023.
- [19] M. Weigold *et al.*, „Abschlussbericht ETA im Bestand: ETA im Bestand - Technologie- und Methodenbaukasten zur Energieeffizienzsteigerung im Bestand der metallverarbeitenden Industrie,“ Förderkennzeichen 03EN2048A, Verbundvorhaben 01213651/1, 2023.
- [20] H. Sinner, *Über das Waschen mit Haushaltswaschmaschinen: In welchem Umfange erleichtern Haushaltswaschmaschinen und -geraete das Waeschehaben im Haushalt*. Haus + Heim Verlag, 1960.
- [21] G. Elserafi, B. Ioshchikhes, J. Magin und M. Weigold, „Process monitoring for energy assessment of parts drying processes,“ *Procedia CIRP*, Jg. 120, S. 392–397, 2023.
- [22] G. Elserafi, „Needs-based and energy efficient parts drying using process monitoring and control,“ UNSPECIFIED, 2025.
- [23] G. Elserafi, F. Borst, A. von Hayn, S. Schmitt und M. Weigold, „Energieeffiziente Bauteiltrocknung durch Abwärmenutzung/Energy efficient parts drying through waste heat utilization – Integrated thermal planning of a throughput cleaning machine for internal waste heat utilization,“ *wt*, Jg. 111, 01-02, S. 25–30, 2021.
- [24] J. Magin, G. Elserafi, A. von Hayn, K. Stellmacher und M. Weigold, „Einsparpotenzial alternativer Trocknungstechnologien,“ *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 119, Nr. 3, S. 162–165, 2024.
- [25] B. Denkena, E. Abele, C. Brecher, M.-A. Dittrich, S. Kara und M. Mori, „Energy efficient machine tools,“ *CIRP Annals*, Jg. 69, Nr. 2, S. 646–667, 2020.
- [26] H.-C. Möhring, C. Brecher, E. Abele, J. Fleischer und F. Bleicher, „Materials in machine tool structures,“ *CIRP Annals*, Jg. 64, Nr. 2, S. 725–748, 2015.
- [27] M. Helfert, T. Kohne, L. Petruschke, M. Burkhardt und E. Abele, „Energieeffiziente Kühlung durch Einsatz innovativer Aggregate,“ *WB Werkstatt+Betrieb*, Nr. 9, S. 218–220, 2018.
- [28] B. Denkena, P. Helmecke und L. Hülsemeyer, „Energy Efficient Machining with Optimized Coolant Lubrication Flow Rates,“ *Procedia CIRP*, Jg. 24, S. 25–31, 2014.

- [29] E. Abele, T. Sielaff und M. Beck, „Schlussbericht zum Projekt Maxiem - Maximierung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen,“ Technische Universität Darmstadt, 2013. Zugriff am: 05. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://edocs.tib.eu/files/e01fb14/782530303.pdf>
- [30] M. Lindner, B. Grosch, G. Elserafi, B. Dietrich und M. Weigold, „Holistic Approach for an Energy-Flexible Operation of a Machine Tool with Cooling Supply,“ *Energies*, Jg. 16, Nr. 9, S. 3943, 2023.
- [31] Statistisches Bundesamt. „Treibhausgasemissionen der deutschen Gießereiindustrie in den Jahren 2000 bis 2022.“ Zugriff am: 21. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/476842/umfrage/treibhausgasemissionen-der-deutschen-giessereiindustrie/>
- [32] R. Maresch. „Neue Technologie für Gießereien senkt Energiekosten und CO₂-Emissionen erheblich.“ Zugriff am: 20. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/presse-medien/Pressemappen/2019/hannover-messe/hannover-messe-2019-iff-neue-technologie-fuer-giessereien-senkt-energiekosten-und-co2-emissionen.pdf>
- [33] Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV. „WindMelt | Schmelzen mit Wind: Klimafreundliche Gießerei durch Windkraft.“ Zugriff am: 20. August 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.igcv.fraunhofer.de/de/forschung/referenzprojekte/windmelt_giesserei_windkraft_schmelze.html
- [34] Bundesnetzagentur (BNetzA). „Quartalsbericht Netz- und Systemsicherheit - Gesamtes Jahr 2020.“ Zugriff am: 20. August 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Quartalszahlen_Gesamtjahr_2020.pdf
- [35] Bundesnetzagentur (BNetzA). „Quartalsbericht Netz- und Systemsicherheit - Gesamtes Jahr 2019.“ Zugriff am: 20. August 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Quartalszahlen_Gesamtjahr_2019.pdf
- [36] V. Kalchschmid *et al.*, „WindMelt,“ *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 116, Nr. 12, S. 922–930, 2021.
- [37] N. Madanchi, M. Winter, S. Thiede und C. Herrmann, „Energy Efficient Cutting Fluid Supply: The Impact of Nozzle Design,“ *Procedia CIRP*, Jg. 61, S. 564–569, 2017.
- [38] C. Rogall. „Bis zu 25% Energie sparen dank bedarfsorientierter Kühlschmierstoffsysteme.“ Zugriff am: 05. September 2025. [Online.] Verfügbar: <https://wgp.de/de/bis-zu-25-energie-sparen-dank-bedarfsorientierter-kuehlschmierstoffsysteme/>
- [39] C. Rogall, R. Arafat, T. Abraham und C. Herrmann, „Application of sustainability-oriented cyber physical production systems to grinding processes,“ *Procedia CIRP*, Jg. 120, S. 553–558, 2023.
- [40] R. Arafat, N. Madanchi, S. Thiede, C. Herrmann und S. J. Skerlos, „Supercritical carbon dioxide and minimum quantity lubrication in pendular surface grinding – A feasibility study,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 296, S. 126560, 2021.
- [41] W. Li, S. Kara und F. Qureshi, „Characterising energy and eco-efficiency of injection moulding processes,“ *International Journal of Sustainable Engineering*, Jg. 8, Nr. 1, S. 55–65, 2015.
- [42] H.-J. Endres, M. Mudersbach, H. Behnsen und S. Spierling, *Biokunststoffe unter dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit und Kommunikation*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [43] H. Sundmaeker, T. Spiering, S. Kohlitz und C. Herrmann, „Injection Mould Design: Impact on Energy Efficiency in Manufacturing,“ in *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, A. Y. C. Nee, B. Song und S.-K. Ong, Hg., Singapore: Springer Singapore, 2013, S. 269–274.
- [44] T. Spiering, S. Kohlitz, H. Sundmaeker und C. Herrmann, „Energy efficiency benchmarking for injection moulding processes,“ *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Jg. 36, S. 45–59, 2015.
- [45] Y. Liu, R. Zhang, J. Wang und Y. Wang, „Current and future lithium-ion battery manufacturing,“ *iScience*, Early Access.
- [46] A. Jinasena, O. S. Burheim und A. H. Strømman, „A Flexible Model for Benchmarking the Energy Usage of Automotive Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing,“ *Batteries*, Jg. 7, Nr. 1, S. 14, 2021.
- [47] M. Weigold, M. Burkhardt, L. Petruschke, T. Kohne, B. Grosch und A. Wächter, „Abschlussbericht des Projekts ETA-Transfer: Leuchtturmprojekte zur Verbreitung innovativer Energiekonzepte in der Industrie,“ Technische Universität Darmstadt, 2022.
- [48] A. Bachmann *et al.*, „Energieflexibel in die Zukunft – Wie Fabriken zum Gelingen der Energiewende beitragen können: VDI-Handlungsempfehlungen, Oktober 2021,“, 2021. Zugriff am: 21. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/b5362587-fa75-451f-9cc0-de9d2e869c9f/details>
- [49] A. Sauer, H. U. Buhl, A. Mitsos und M. Weigold, *Energieflexibilität in der deutschen Industrie: Band 2: Markt- und Stromsystem, Managementsysteme und Technologien energieflexibler Fabriken*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2022. Zugriff am: 05. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/9b694efd-bcd2-4441-b5f6-8c365d434493/details>
- [50] A. von Hayn, J. Moske, P. Aselmann und M. Weigold, „Demand side management in the cooling supply of brewing processes,“
- [51] H. U. Buhl, G. Fridgen, E.-M. Ländner und M. Schöpf, „Einschränkungen durch Regulatorik,“ in *Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt: Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie)* (Energieflexibilität in der deutschen Industrie), A. Sauer, E. Abele und H. U. Buhl, Hg., Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2019, S. 167–176.
- [52] T. Franzelin, S. Schwarz und S. Rinderknecht, „Smart Charging and V2G: Enhancing a Hybrid Energy Storage System with Intelligent and Bidirectional EV Charging,“ *WEVJ*, Jg. 16, Nr. 3, S. 121, 2025.
- [53] C. Reinhold *et al.*, „flexess - Entwicklung von Strategien und Lösungen zur Ausschöpfung zukünftiger Flexibilitätspotentiale vollektrischer Haushalte, Gewerbe, Industrien und Elektromobilität: Schlussbericht,“ 2024.
- [54] International Association of Learning Factories. „Definition of “learning factory”.“ Zugriff am: 30. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: <https://ialf-online.net/>