

**EXPERTENEMPFEHLUNGEN AUS DEN
ARBEITSGRUPPEN FÜR DEN KONSULTATIONSPROZESS
ZUM 7. ENERGIEFORSCHUNGSPROGRAMM**



**Expertenempfehlungen aus dem Forschungsnetzwerk
für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm**

FORSCHUNGSNETZWERK INDUSTRIE UND GEWERBE

Einleitung

Transparenz und Partizipation sind wichtige Ziele der Bundesregierung im 6. Energieforschungsprogramm. Die sieben Forschungsnetzwerke Energie sind somit ein wichtiges Instrument der Energieforschungspolitik des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Sie tragen maßgeblich dazu bei, alle wesentlichen Akteure eines Themenschwerpunkts der Energieforschung zu vernetzen und an Strategieprozessen zu beteiligen. Dazu erarbeiten die Mitglieder der Forschungsnetzwerke Expertenempfehlungen zum künftigen Forschungsbedarf sowie zu möglichen Förderschwerpunkten und -formaten.

Im Dezember 2016 hat das BMWi als federführendes Ministerium für die Energiewende den Konsultationsprozess für ein neues Energieforschungsprogramm gestartet. Dieser Prozess bindet alle relevanten Akteure der Energieforschung und -wirtschaft frühzeitig in die Diskussion zur Weiterentwicklung der Energieforschungsförderpolitik ein und soll bis Ende 2017 abgeschlossen werden. Die Mitglieder des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe haben konkrete Expertenempfehlungen für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm erarbeitet, die in dieser Broschüre vorgestellt werden.

Themen des Forschungsnetzwerks

Die Vielfalt der in der Energieforschung zu Energieeffizienz in Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (EnEff:IGHD) betrachteten Effizienztechnologien ist zusammen mit dem grundsätzlich techno-logieneutralen Ansatz der Forschungsförderung eine der Stärken des Förderbereichs. Er verfügt über eine große Zahl von Forschungsakteuren und kann die Umsetzung der Ergebnisse

auf eine breite Basis stellen. Die Themenvielfalt erfordert aber auch eine schlanke Strukturierung. Um eine gezielte Forschung zu ermöglichen und Fördermaßnahmen effizient zu halten, hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Förderbereich EnEff:IGHD unter dem Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe sogenannte "Forschungsfelder Energie" etabliert. Ihre Struktur erlaubt für ausgewählte Schlüsselthemen von übergeordneter Bedeutung eine schlagkräftige Forschung durch die Konzentration der Maßnahmen. Gleichzeitig sind die Forschungsfelder flexibel genug, um innovative Einzelthemen auch kurzfristig in der Förderung zu berücksichtigen.

Jedes Forschungsfeld ist langfristig angelegt und bündelt alle Forschungsaktivitäten in einem Schlüsselthema. Das ermöglicht für Themen mit besonderer Relevanz eine effektive und effiziente Forschung. Gleichzeitig können Ergebnisse über die Grenzen von Einzelvorhaben hinweg in die Breite der Forschungsfelder weiterentwickelt und transferiert werden. Jedes Forschungsfeld ordnet seine Aktivitäten in eine sinnvolle Reihenfolge, identifiziert Forschungslücken und arbeitet koordiniert und zielgerichtet auf weitere Forschungsergebnisse hin. Die versammelte Expertise der in den Forschungsfeldern handelnden Akteure bildet schließlich einen wichtigen Baustein in der programmatischen Ausgestaltung der Forschungsförderung. Mit den neuen Forschungsfeldern Energie in Industrie und Gewerbe setzt das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) seine Vernetzungsstrategie in der Energieforschung fort. Als Schnittstelle zwischen Politik, Forschung und Wirtschaft werden sie künftig wichtige Synergien schaffen. Die themenspezifischen Forschungsfelder ermöglichen den wissenschaftlichen Austausch, eine langfristige Konzeptionierung von Forschungsk Kooperationen sowie programmatische Weiterentwicklungen.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

Herausgeber
Projektträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Redaktion und verantwortlich für den Inhalt
Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe
Einleitung: Projektträger Jülich (PtJ)

Gestaltung und Produktion
Projektträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Stand
November 2017

INHALT

Gründung und Entwicklung des Forschungsnetzwerks

Das am 10. Juni 2016 gegründete Netzwerk verbindet im Bereich Industrie und Gewerbe Akteure auf wissenschaftlicher und forschungspolitischer Ebene. Sie sind Impulsgeber künftiger Förderstrategien, bündeln Schlüsselthemen und liefern Politik und Forschung mit ihrer breit gefächerten Expertise innovative Konzepte und Ideen für den Erfolg der Energiewende in Deutschland. Neues Element des Forschungsnetzwerks Energie in Industrie und Gewerbe sind themenspezifische Forschungsfelder, die den wissenschaftlichen Austausch, langfristige Forschungsk Kooperationen sowie programmatische Weiterentwicklungen ermöglichen.

Mit dem neu gegründeten Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe ist das Förderkonzept Eneff:IGHD aktualisiert worden. Die Forschungsförderung ruht nun auf zwei gleichberechtigten Säulen: Neben strategische Schlüsselthemen, die in den Forschungsfeldern gebündelt sind, tritt parallel die unabhängige Förderung von nicht zusammenhängenden Einzelthemen. Diese Einzelförderung für innovative Energiethemen im Bereich IGHD ist dort notwendig, wo aufgrund der hohen Diversifizierung und Spezialisierung von Hochtechnologiebereichen eine Aggregation in ein Schlüsselthema unverhältnismäßig wäre.

Expertenempfehlungen für den Konsultationsprozess

Im Rahmen des Forschungsnetzwerks Energie in Industrie und Gewerbe ist das BMWi in mehreren Workshops an die Kuratorien der eingerichteten Forschungsfelder (Chemische Verfahrenstechnik, Fertigungstechnik, Hochtemperatursupraleitung, Tribologie, Abwärmenutzung, Stahl und Eisen)

herangetreten, um den zukünftigen Forschungsbedarf im jeweiligen Forschungsfeld zu eruieren. Ein Bedarf an Forschungsbeiträgen der Künstlichen Intelligenz zu energieeffizienten Produktionstechnologien wurde in einem weiteren Workshop unter den anwesenden Teilnehmerinnen und Teilnehmern erhoben.

Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse dieses Prozesses aufgeführt. Dargestellt sind zunächst Themen, die als zentral für zukünftige Forschung und Entwicklung in dem jeweiligen Bereich identifiziert wurden und durch bisherige Fördermaßnahmen nur teilweise abgedeckt werden. Dabei werden auch Querbezüge zwischen verschiedenen Forschungsfeldern aufgezeigt. In Einzelfällen werden auch weiterführende Aspekte, die nur mittelbar eine Forschungsrelevanz aufweisen und an die Energiepolitik gerichtet sind, von den Experten in die jeweiligen Papiere eingebracht.

Die Beteiligten des Forschungsnetzwerks Energie in Industrie und Gewerbe verstehen ihre hier in Kurzform zusammengetragene Expertise als Beitrag des Forschungsnetzwerks im Konsultationsprozess zu einem nächsten Energieforschungsprogramm. Sie weisen darauf hin, dass eine Befassung mit weiteren Einzelthemen des Forschungsbereichs außerhalb der Forschungsfelder – die im Förderkonzept genannte zweite Säule der Forschungsförderung – aus strukturellen Gründen nicht erfolgen konnte.

Die in diesem Prozess Beteiligten hoffen, dass ihre Beiträge Impulse für die zukünftige Gestaltung der Forschungspolitik geben und darüber hinaus auch Eingang in weitere relevante politische Entscheidungen finden können. Auch für künftige Fragestellungen rund um den Forschungsbereich Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe stehen die Kuratorien gerne mit ihrer Expertise zur Verfügung.

CHEMISCHE VERFAHRENSTECHNIK	2
BEITRÄGE AUS DEM FORSCHUNGSFELD	
TRIBOLOGIE	8
BEITRÄGE AUS DEM FORSCHUNGSFELD	
FERTIGUNGSTECHNIK	12
BEITRÄGE AUS DEM FORSCHUNGSFELD	
ABWÄRMENUTZUNG	20
BEITRÄGE AUS DEM FORSCHUNGSFELD	
HOCHTEMPERATURSUPRALEITUNG	26
BEITRÄGE AUS DEM FORSCHUNGSFELD	
EISEN UND STAHL	28
BEITRÄGE AUS DEM FORSCHUNGSFELD	
KÜNSTLICHE INTELLIGENZ IN DER PRODUKTION	32
BEITRÄGE AUS DEM WORKSHOP	

CHEMISCHE VERFAHRENSTECHNIK BEITRÄGE AUS DEM FORSCHUNGSFELD



■ MOTIVATION

Das BMWi hat im Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe für strategische Schlüsselthemen mehrere Forschungsfelder initiiert. Ziel der Forschungsfelder ist nicht nur der Informationsaustausch von Forschern über die Grenzen einzelner Projekte hinweg. In einem gemeinsamen Verfahren sollen die Forschungsthemen der Zukunft für verschiedene Themengebiete identifiziert werden und dabei die Forscher aus Industrie und Hochschule wesentlichen Input liefern können.

Bereits seit dem Jahr 2014 läuft unter der Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie die Initiative „Energieeffizienz und Prozessbeschleunigung für die Chemische Industrie – ENPRO“ als industrie-übergreifende Forschungsmaßnahme. Der gewählte Ansatz, industrieübergreifend gemeinsam Forschung zu betreiben, ermöglichte eine Bündelung von Kompetenzen und Kapazitäten und eine wesentlich breitere Nutzung der Ergebnisse, indem diese forschungsprojektübergreifend in Arbeiten einfließen konnten und so beispielsweise in gemeinsame Publikationen mündeten.

Aufgrund der ähnlichen Zielstellungen hat das BMWi entschieden, die Initiative ENPRO als Nukleus für das neue Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik zu nutzen. Eine langfristige Vertretung des Forschungsfeldes soll durch ein Kuratorium gebildet werden, welches eine industrieübergreifende Sichtweise besitzt und nicht von kurzfristigen Projektlaufzeiten abhängt.

Das BMWi hat dazu den ProcessNet-Lenkungsausschuss als Kuratorium für das Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik berufen und den Geschäftsführer von ProcessNet, Dr. Andreas Förster, als dessen Kurator.

ProcessNet ist die deutsche Plattform für Verfahrenstechnik, Chemieingenieurwesen und Technische Chemie. Ziel ist es, aktuelle Fragestellungen zu diskutieren, wissenschaftliche Trends zu identifizieren und Fachleuten aus der gesamten Verfahrenstechnik und chemischen Technik eine fachliche Heimat zu bieten. Eine enge Verbindung besteht außerdem zur Biotechnologie.

In den Gremien von ProcessNet sind über 5.000 Mitglieder aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung organisiert. Sie treffen sich regelmäßig zum fachlichen Austausch und organisieren zahlreiche Veranstaltungen zum fach- und branchenübergreifenden Informationsaustausch.

Der ProcessNet-Lenkungsausschuss setzt sich aus den Vorsitzenden der Untergremien zusammen und umfasst derzeit insgesamt 17 Personen aus Industrie und Hochschule. Die Berufung in den Lenkungsausschuss erfolgt automatisch, sobald ein(e) Vorsitzende(r) als solche(r) in einem Untergremium bestätigt wird. Durch die automatische Berufung der Vorsitzenden der Gremien ist sichergestellt, dass alle Themen innerhalb der Verfahrenstechnik und der chemischen Technik im Lenkungskreis vertreten sind.

Am 28. September 2017 fand die erste Sitzung des Kuratoriums im Zuge der regulären Sitzung des ProcessNet-Lenkungskreises im DECHEMA-Haus, in Frankfurt am Main, statt. In der Vorbereitung hierzu wurden alle Teilnehmenden des Gremiums gebeten, für ihre spezifischen Themengebiete potentielle Forschungsthemen zu identifizieren und diese vorzustellen. Im Folgenden sind die Ergebnisse dieser Diskussionen zu finden.

THEMEN

1. Die Initiative ENPRO
2. Digitale Chemieanlagen
3. Effizienz inhomogen betriebener Mehrphasenreaktoren
4. Tolerante Prozesse
5. Elektrochemische Synthese
6. Sektorkopplung und industrielle Symbiose
7. Energieeffiziente Wärmeübertrager
8. Effizientes Recycling von strategischen Rohstoffen
9. Additive Fertigung

■ FuE-BEDARF IN DER CHEMISCHEN VERFAHRENSTECHNIK

1. Die Initiative ENPRO

Ziel von ENPRO ist die deutliche Steigerung der Energieeffizienz neuer chemischer Produktionsprozesse durch Schaffung neuer, noch nicht am Markt etablierter Technologien bei gleichzeitiger Verkürzung der Durchlaufzeiten von Innovationsprojekten. Generelles Forschungs- und Entwicklungsziel ist die Demonstration des Energie- und Zeiteinsparpotenzials einer beschleunigten Prozessentwicklung mithilfe wiederverwendbarer Standardmodule für eine kontinuierliche Prozessführung (anstelle von Batchprozessen) und einer verbesserten softwareunterstützten Methodik. Die Module und Komponenten müssen durchgängig und skalenübergreifend verwendbar sein, um eine beschleunigte Modellierung und Prozessauslegung zu ermöglichen. Im Labor wird mit dem Anlagenaufbau schon das Basic-Engineering für die Produktionsanlage ausgeführt. Aus fertig konzipierten Modulen, die das Detail-Engineering in einer Datenbank umfassen, wird die Produktionsanlage zusammengestellt. Die sinnvolle Kombination dieser Komponenten in Modulen sowie die zugehörige durchgängige Informationsmodellierung von der Prozessauslegung bis zur Inbetriebnahme sind wesentliche Querschnittsaktivitäten zur deutlichen Reduzierung der Durchlaufzeiten einerseits und zur energetischen Optimierung andererseits.

Die Arbeiten der Initiative ENPRO seit 2014 konzentrieren sich auf drei Schwerpunkte:

- Batch to Conti, d. h. die verstärkte Nutzung von mathematischen Modellen und skalierbaren Miniplant-Anlagen mit kontinuierlicher Prozessführung sowie Komponenten zur schnelleren Verfahrensentwicklung (Projekte KoPPonA, SMekt)
- Modularisierung, d. h. die Minimierung von Planungs-, Bau- und Inbetriebnahmezeiten durch intelligente Modularisierung (Projekt Modularisierung)
- Datenintegration, d. h. die simultane bzw. stark überlappende Bearbeitung von Entwicklung, Planung

und Anlagenbau durch Nutzung integrierter Informationen (Projekt Datenintegration)

Die Erkenntnisse aus der bisherigen Initiative ENPRO zu neuen Apparaten, Modulen und Datenintegration werden derzeit in der Initiative ENPRO 2.0 hin zu modularen und intelligent vernetzten Gesamtsystemen über den gesamten Lebenszyklus von Anlagen erweitert. Für eine zweite Förderphase sind bereits drei neue Projekte eingereicht, die sich thematisch vor allem mit der Anwendung von intelligenten Apparaten in modularer und orchestrierter Fahrweise beschäftigen (ORCA, SkaMPi, TeiA). Wesentliche Schwerpunkte sind die zunehmende Modulintelligenz, die Nutzung neuartiger Sensorkonzepte, um beispielsweise Daten-Mining-Aktivitäten und Softsensing zu fördern, und die übergeordnete Orchestrierung von Komponenten im Sinne eines sinnvollen Zusammenwirkens als intelligente Systeme.

Forschungsergebnisse aus der ENPRO-Initiative werden zukünftig zunehmend in Demonstrationsvorhaben münden. Alle Projekte agieren unter einer gemeinsamen Präambel.

In das durch ENPRO eröffnete Forschungsfeld lassen sich weitere Projekte und Entwicklungen einbinden, die den Stand der Technik erweitern. Die durch das BMWi geförderten Vorhaben zur Mikroverfahrenstechnik Mi2Pro, EnEIMI 2.0 und Mi2Ads adressieren kontinuierliche Prozesse für kleinskalige Produktionsvolumina und fügen sich damit in die auch durch ENPRO erforschte Prozessentwicklung mit kleinskaligen Apparaten ein. Neue Prozessfenster können damit „geöffnet“ werden und erweitern so die Möglichkeiten in der Prozesstechnik. Integrierte Sensoren sind wichtige Arbeitsschwerpunkte und eröffnen den Bereich Sensorik mit vielen Facetten der Prozessanalytik und erweiterten Messverfahren für Mehrphasenströmungen für das Forschungsfeld. In der Prozessentwicklung und der Produktion fallen viele Daten an, die mithilfe von Methoden der künstlichen Intelligenz zu Informationen aufbereitet (Datenintegration) und für die verbesserte Prozessführung und -steuerung verwendet werden können. Hier wird zunehmend die Analyse großer Datenmengen eine Rolle spielen, um (Teil)Prozesse dynamisch zu simulieren und für modellprädiktive Regelungen zu nutzen.

2. Digitale Chemieanlagen

Die digitale Transformation durchdringt weite Teile der Industrie mit einer zunehmenden Vernetzung und Digitalisierung entlang der Wertschöpfungskette. Basierend auf dem Whitepaper der DECHEMA „Digitalisierung in der Chemieindustrie“ entsteht die Vision eines gläsernen Apparates mit einem zeitlich, räumlich und methodisch dichtem Monitoring der Betriebszustände, das eine daten- und modellbasierte Optimierung transienter oder instationärer Prozesse (An-/Abfahren, Laständerungen etc.) erlaubt. Auch der nicht bestimmungsmäßige Betrieb (Phasenmitriss, Schäumen, Verbacken etc.) wird am Einzelapparat erkannt. Basis ist hier die Implementierung von innovativer Messtechnik und neuartigen Sensoren sowie die Anwendung datengetriebener oder rigoroser Modelle zur Prozesssimulation und -kontrolle.

Ein Betrieb an Stabilitäts- bzw. Kapazitätsgrenzen wird möglich gemacht bei höherem Durchsatz, steigender Effizienz und gleichbleibender Qualität der Produkte. Eine Vernetzung über weitere Branchen (Softwareingenieure, MSR-Technik, Betreiber, Hersteller) ist notwendig und ergänzt die ENPRO-Initiative komplementär, die sich auf modulare Anlagenplanung und -bau und verteilte Intelligenz fokussiert. Der Blick liegt hier auf bereits vorhandenem Anlagenbestand bzw. zukünftig nicht modular gestalteten Produktionsapparaten der chemischen Industrie (Bulk-, Spezial- und Feinchemikalien), sodass in Bezug auf die Verbesserung der Ressourcen- und Energieeffizienz ein wesentlicher Beitrag vorausgesagt werden kann.

3. Effizienz inhomogen betriebener Mehrphasenreaktoren

Etwa 80 % aller chemischen Produkte durchlaufen katalytische Prozesse. Aktuelle Themenstellungen sind neben biotechnologischen Anwendungen zur Wirkstoffproduktion u. a. die Konvertierung von CO₂ mittels H₂ in katalytischen Gas-flüssig-fest Systemen. Während hier im Labormaßstab bereits große Fortschritte erzielt wurden, wird gerade das Scale-up dieser Dreiphasensysteme von Labor- zu Industrieanlagen seitens Betreiber und Hersteller als extrem schwierig bzw. unzulänglich erforscht eingestuft. Es fehlt ein fundamentales Verständnis großräumiger Inhomogenitäten bedingt durch Blasen-Feststoff-Interaktionen und Stoff-, Energie- und Impulstransport. Ein flexibler transienter Betrieb bei wechselnder Last (z. B. H₂-Zufuhr) ist extrem schwierig realisierbar und die Auswirkung auf Upstream- und Downstream-Prozesse kaum voraussag-

bar. Es kommt daher häufig zum Überdesign (Sicherheitszuschläge) von Apparaten und damit verbunden zu einer geringeren Energie- und Rohstoff-effizienz der Apparate und verminderten Qualität der Produkte.

Neue Ansätze zur modellbasierten Prozesskontrolle (in silico Voraussage) mit in-situ Sensorik und Charakterisierung unter „operando“-Bedingungen (d. h. „heiß“ – mit Reaktionen) sollen in einem interdisziplinären Ansatz von Chemieingenieuren, Verfahrenstechnikern und Chemikern neue Lösungswege zur Ressourcenschonung und Energieeffizienz aufzeigen.

4. Tolerante Prozesse

Die Rohstoffbasis und die Energiebereitstellung der Chemischen Industrie verändern sich aufgrund der technischen und ökonomischen Randbedingungen. Durch den verstärkten Einsatz zeitlich fluktuierender Stromerzeuger kommt es zu stark veränderlichen Kosten für die Elektrizität. Die Rohstoffbereitstellung wird beeinflusst durch den Wunsch nach verstärktem Einsatz von alternativen Rohstoffen, im wesentlichen Biomasse und CO₂.

Diese dynamisch ablaufenden Veränderungen sind Indikatoren für den Bedarf nach einer „Prozesstoleranz“ von chemischen und biochemischen Prozessen. „Tolerante Prozesse“ können flexibel auf wechselnde Randbedingungen reagieren. Diese umfassen variable Rohstoffeigenschaften, Energieverfügbarkeit, Standortfaktoren und Nachfragen der Märkte. Ziel der Entwicklung Toleranter Prozesse ist die Herstellung von Qualitätsprodukten trotz der angesprochenen Variabilität von Rohstoffen und Energie bei gleichzeitiger Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit. Als Schlüsseltechnologien für die Erzielung der Prozesstoleranz sind zu nennen:

- Modellbasierter Entwurf von Prozess- und Anlagentechnik unter Berücksichtigung von Unsicherheiten und Variabilität bei den wirtschaftlichen und technischen Randbedingungen
- Robuste und flexible Apparatekonzepte für einen möglichst breiten Betriebsbereich
- Optimierung des Betriebs von Anlagen durch geeignete Methoden, z. B. die Nutzung selbstlernender Algorithmen und Big Data
- Inhärent tolerante Konzepte für Katalysatoren, Prozesseinheiten und Anlagen (Beispiele: Kopplung von Bio- und Chemo-Katalyse)

- Realisierung von hybriden Einträgen von Energie und Rohstoffen in Prozesse
- Integration toleranter Prozesse entlang der Wertschöpfungskette, d. h. ihre Wechselwirkung mit Upstream- und Downstreamprozessen.

5. Elektrochemische Synthese

Eine zukünftige Schlüsseltechnologie der elektrochemischen Synthese stellt die Wasserelektrolyse dar. Alle drei verfügbaren Technologien – alkalische, PEM und Hochtemperaturelektrolyse – haben ihre spezifischen Vorteile und müssen aus Sicht der Chemischen Verfahrenstechnik im Hinblick auf die Materialkosten, den Wirkungsgrad und die Möglichkeit des dynamischen Betriebs mit fluktuierender regenerativer Energie verbessert werden.

Auch Kohlenstoffdioxid kann mittels elektrochemischer Prozesse zu Chemierohstoffen umgewandelt werden. Während bei der Hochtemperatur-Coelektrolyse von CO₂ und H₂O die Produkte Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff (Synthesegas) gebildet werden, kann die Reaktion bei Niedertemperaturelektrolysen auch in Richtung anderer Wertprodukte wie Ethylen oder höherer Kohlenwasserstoffe geführt werden. Neben dem Design von effizienten Elektrolysezellen stehen hier auch Grundlagenuntersuchungen zur Entwicklung aktiver und langzeitstabiler Elektrokatalysatoren und Gasdiffusions-elektroden im Vordergrund.

Mit steigender Verfügbarkeit preiswerter regenerativer elektrischer Energie werden auch elektroorganische Synthesen zunehmend wieder attraktiv. Auch hier kann die Chemische Verfahrenstechnik wichtige Beiträge leisten, beispielsweise bei der Entwicklung neuartiger Elektrolyte und dem Design optimaler Zellen.

6. Sektorkopplung und industrielle Symbiose

Im zukünftigen Energiesystem ist eine stärkere Interdependenz zwischen den verschiedenen Sektoren, d. h. Energieversorger, Prozessindustrien, Verkehrssektor, Haushalt und verarbeitendes Gewerbe zu erwarten. Dies gilt es im Sinne einer Systemeffizienz zu optimieren. Die Chemische Verfahrenstechnik liefert hierzu Schlüsseltechnologien für die Schnittstellen zwischen den Sektoren, z. B.:

- Nutzung industrieller Abwärme aus anderen Sektoren für die chemische Produktion und umgekehrt, entweder durch direkte Nutzung

oder über lokale Wärmespeicherung und/oder Wärmetransformation

- Nutzung von Neben- und Abfallstoffströmen für chemische Umsetzungen, z. B. Kohlenmonoxid aus der Stahlindustrie
- Bereitstellung synthetischer Brenn- und Kraftstoffe mit niedrigerem Carbon Footprint
- Verknüpfung chemisch-industrieller und kommunaler Infrastrukturen, z. B. im Energie- oder Wassermanagement.

7. Energieeffiziente Wärmeübertrager

Heizen und Kühlen mittels Wärmeübertrager ist allgegenwärtig. Der Markt hat ein stetiges Wachstum von ca. 8 %. Das gravierendste Problem bei Design und Betrieb der Apparate ist allerdings die Belagbildung durch die Prozessmedien (Kühlwasserfouling bei Flüssen, Belagbildung bei der Milchverarbeitung, Versottung von Abgasrückkühlern bei Kfz, Ablagerung bei Abhitze-gewinnung in Kraftwerken, Kristalllagen bei Verdampfern etc.). Der wirtschaftliche Schaden durch Überdimensionierung von Apparaten, den Einsatz von Reinigungssystemen, Produktionsausfall bei reinigungsbedingtem Stillstand sowie Entsorgung der Reinigungs- und Spülflüssigkeiten wird auf ca. 0,3 % des BNP geschätzt. Für Deutschland entspricht dies 2016 ca. 9,4 Milliarden Euro an Schaden durch Fouling.

Damit ergibt sich ein erhebliches Potential für die Erforschung von Maßnahmen zur Foulingminderung bzw. effizienteren Reinigung. Dazu gehören stoffliche Maßnahmen, wie der Einsatz von Additiven als Inhibitoren und Stabilisatoren, apparative Maßnahmen, wie haftmindernde Oberflächen und Materialien oder hocheffektive Apparate, die mit kleineren Temperaturdifferenzen arbeiten können, sowie betriebstechnische Maßnahmen, wie pulsierende Strömung oder Mikroluftblasenjets. Insbesondere bei wässrigen Systemen sind 75 % der Foulingprobleme auf Kristallisations-, Bio- und Korrosionsfouling zurückzuführen, was einen interdisziplinären Lösungsansatz unter Einbeziehung von Verfahrenstechnikern, Chemieingenieuren und Materialwissenschaftlern zur Erhöhung der Energieeffizienz verlangt.

8. Effizientes Recycling von strategischen Rohstoffen

Für eine nachhaltige Entwicklung von Spitzen- und Zukunftstechnologien ist die begrenzte Verfügbarkeit strategischer Rohstoffe ein immer größer werdendes Problem. Zur Lösung müssen Verfahren und Technologien entwickelt werden, mit denen eine effiziente Rückgewinnung und Verarbeitung von Sekundärwertstoffen zu hochwertigen Produkten möglich wird. Die Herausforderung besteht dabei in der Schaffung neuer Wertstoffkreisläufe auf Basis innovativer Recyclingverfahren, mit denen Composite und Bauteile ohne hohen Energie- und Chemikalieneinsatz in die einzelnen Wertstofffraktionen aufgetrennt werden können. Die Rückgewinnung und direkte Wiederverwendung hochwertiger Werkstoffe statt deren Desintegration in die einzelnen Elemente ermöglicht zusätzlich eine verbesserte Energieeffizienz bei der Produktherstellung, da aufwendige Werkstoffsynthesen eingespart werden können. Zu den Anwendungsbereichen zählen Batterien, Elektromotoren, Solarzellen, Elektronikkomponenten und Verbundbauteile.

9. Additive Fertigung

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen die Herstellung hochspezialisierter dreidimensionaler Strukturen nahezu beliebiger geometrischer Komplexität. Zudem können zusätzliche Funktionalitäten (z. B. zur Dosierung, Phasenkontaktierung, Heizen/Kühlen, katalytische Aktivität, in-line Messtechniken zur Reaktionsverfolgung) direkt in das Bauteil integriert werden. Auf diese Weise ist die technische Realisierung einer neuen Generation maßgeschneiderter Reaktoren und Prozesskomponenten mit signifikant erhöhter Effizienz möglich.

Additive Fertigungsverfahren werden bereits erfolgreich in industriellen Anwendungen eingesetzt, z. B. im Bereich der Medizintechnik sowie im Automobil- und Luftfahrtsektor. Vor der Erschließung eines breiten Anwendungsfeldes in der chemischen Verfahrenstechnik besteht dagegen noch signifikanter Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Dieser betrifft sowohl theoretische Methoden und Modelle (z. B. Korrelationen und Auslegungsregeln) als auch Demonstrationsprojekte in technischen Fallstudien unter industrienahen Bedingungen.

Der Forschungsbedarf betrifft die Herstellung der Strukturen an sich (z. B. die Erschließung einer breiten Materialbasis), die Oberflächenfunktionalisierung, die Charakterisierung der Strukturen hinsichtlich Wärme-

und Stofftransporteigenschaften sowie Konzepte für die technische Implementierung im Prozess. Durch eine Verzahnung der rechnergestützten Auslegung von Prozessen und Komponenten mit der additiven Fertigung ergeben sich neue Möglichkeiten, chemische Prozesse effizienter zu gestalten und diese schneller in die Produktion zu überführen. Weiterhin sind bei drucktragenden Bauteilen Fragen nach der Zulassung und Bauprüfung gemäß Druckgeräterichtlinie sowie der wiederkehrenden Prüfungen während der Nutzung zu klären.

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen auch die Herstellung optischer Strukturen, die die Ein- und Auskopplung von Licht verbessern und damit die Energieeffizienz von Solarzellen, LEDs oder Displays erhöhen. Innovative Ansätze der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik werden damit realisierbar. Bei 3D-Druck-Verfahren, bei denen die Strukturen schichtweise aufgebaut und gehärtet werden, kann es zu Abweichungen im optischen Verhalten kommen. Innovative Ansätze für die Polymertechnik und Prozessierung können es möglich machen, hochpräzise Optiken im sub- μm -Bereich zu drucken.

TRIBOLOGIE BEITRÄGE AUS DEM FORSCHUNGSFELD



■ MOTIVATION

In Verknüpfung mit der Abschlussveranstaltung des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Verbundprojekts PEGASUS II organisierte der Projektträger Jülich (PtJ) am 16. März 2017 einen Workshop zu den Zukunftsthemen im Forschungsfeld Tribologie aus Sicht der Energieforschung. Vertreterinnen und Vertreter aus Industrie, Wissenschaft und Forschung berieten sich dabei über die Potenziale einer weiteren Steigerung der Energieeffizienz durch tribologische Maßnahmen in verschiedensten Anwendungen sowie den Forschungsbedarf für ein grundlegendes Verständnis tribologischer Vorgänge in diesen Anwendungen. In der Diskussion wurde ein Konzept dazu erarbeitet, welche Schwerpunkte in der weiteren Tribologieforschung in einem zukünftigen Energieforschungsprogramm gesetzt werden sollten. Die Vorschläge in diesem Konzept reichen von Einzelmaßnahmen bis hin zu umfassenden Lösungsansätzen. Die Auswertung des Workshops und der anschließenden Diskussionsphase wird im Folgenden zusammengefasst.

FuE-Bedarf zur Tribologie

Tribologische Vorgänge sind komplexer Natur und kommen in den unterschiedlichsten Anwendungen vor. Oft sind die Begleiterscheinungen unerwünscht, so gibt es Energieverluste durch Reibungswärme oder Bauteile verschleifen und limitieren damit Maschinenlaufzeiten und die Materialeffizienz. Tiefgehende Kenntnisse aus Physik, Chemie sowie verschiedensten Ingenieurwissenschaften sind nötig, um die Vielfalt der Phänomene rund um die Vorgänge Reibung, Verschleiß und Schmierung zu verstehen und damit umfassend optimieren zu können. Daher ist bei einem grundlegenden Ansatz zur Lösung tribologischer Probleme aus Sicht der Energieeffizienz zunächst folgende Herangehensweise nötig:

- Systematisierung tribologischer Zustände unterschiedlichster Anwendungen

Aus der allgemeinen Betrachtung ergeben sich bestimmte Gemeinsamkeiten der beobachteten Reibungs- und Verschleißphänomene. Oftmals lassen sich die bestimmenden Faktoren von Werkstoff und Schmierstoff eingrenzen und eine gezielte Verbesserung und ein Verständnis grundlegender Zusammenhänge gelingt über die

- Lösung spezieller tribologischer Probleme

Es zeigt sich immer wieder, dass mit tribologischen Einzellösungen oftmals Erfolge erzielt werden, jedoch in vielen Fällen – z. B. in komplexen Maschinen und Anlagen – Einzelmaßnahmen kaum Effekte, im schlimmsten Fall sogar antagonistische Effekte, hervorrufen. An dieser Stelle muss die Tribologieforschung neue Wege gehen

- Globale Lösungsansätze zur Optimierung komplexer tribologischer Systeme

Dies schließt in zunehmendem Maße neue Technologien zur Datenerfassung, Digitalisierung und Nutzung modernster Methoden der Datenauswertung zum Verständnis tribologischer Daten mit ein

Die Tribologie ist eine ausgesprochen interdisziplinäre Forschungsrichtung und betrifft die unterschiedlichsten Anwendungen. Daher ist eine

- Vernetzung mit anderen Forschungsschwerpunkten

essentiell für ein erfolgreiches Verständnis tribologischer Vorgänge und damit für die Ableitung von effektiven Maßnahmen zur Reibungsminderung

1. Systematisierung tribologischer Zustände unterschiedlichster Anwendungen

Den größten Einfluss auf einen tribologischen Kontakt hat eine Schmierung, sei es gezielt durch das Applizieren

THEMEN

1. Systematisierung tribologischer Zustände unterschiedlichster Anwendungen
2. Lösung spezieller tribologischer Probleme
3. Globale Lösungsansätze zur Optimierung komplexer tribologischer Systeme
4. Vernetzung mit anderen Forschungsschwerpunkten

eines Schmierstoffs oder das Vorhandensein eines Mediums in der Kontaktzone der Reibpartner. So unterschiedlich die tribologischen Zustände hinsichtlich der Art und Höhe der Kraftübertragung, der Materialien und sonstiger Einflüsse auch sein mögen, ist eine Unterscheidung von tribologischen Zuständen unterschiedlichster Anwendungen nach dem Vorliegen eines Schmiermediums sinnvoll. Dahingehend gibt es bereits intensive Vorarbeiten in den Projekten PEGASUS (Motor- und Getriebeölbasierte Systeme) sowie POSEIDON (Medien-, d. h. Meerwassergeschmierte Systeme).

Eine weitere Systematik ergibt sich mit Blick auf den Reibungszustand, der nach der sogenannten Stribeck-Kurve in die Bereiche Trocken-, Grenz-, Mischreibung und Hydrodynamik eingeteilt wird. Die Zustände können in verschiedensten Systemen wie Kolben-/Zylinder-Paarungen, Lagern, Dichtungen und Ketten auftreten. Im Projekt CHEOPS3 werden beispielhaft trocken laufende bzw. minimalmengengeschmierte Systeme in den Bereichen Trocken- und Grenzreibung untersucht, um möglichst universelle Lösungen zu finden.

Der Ansatz der Systematisierung hat sich als sehr sinnvoll erwiesen, da im Umkehrschluss die gefundenen Lösungen für bestimmte tribologische Zustände gänzlich neuer Anwendungen genutzt werden können. Hier gilt es, in Zukunft weitere Problemstellungen unterschiedlichster Anwendungen nach der zu Grunde liegenden Art der tribologischen Problemstellungen zusammenzufassen und grundlegende Lösungen dafür zu erarbeiten. Damit schafft man eine Art Baukasten für tribologische Problemlösungen unterschiedlichster Standardanwendungen.

2. Lösung spezieller tribologischer Probleme

Komplementär zu den Arbeiten in 2.1 ist die systematische Untersuchung einzelner Phänomene von Reibungs- und Verschleißvorgängen ein elementarer Bestandteil der Tribologieforschung, um damit direkte Zusammenhänge zu erforschen. So werden z. B. neue Werkstoffe bzw. Beschichtungsmaterialien entwickelt und in Screeningtests mit Tribometern systematisch auf ihre Eignung untersucht. Hier sind beispielsweise die sogenannten selbstschmierenden Schichten, basierend auf diamantartigem Kohlenstoff, oder hochverschleißfeste

Hartstoffe für Hochtemperaturanwendungen zu nennen. Auch die Oberflächenstrukturierung bis hin zur Laser-Mikrostrukturierung deutet z. T. ein großes Potenzial zur Reibungsminderung an. Ein weiteres Feld bildet die Optimierung von Schmierstoffen, angefangen von der Zusammensetzung des Grund-Öls und dessen Additiven bis hin zu neuartigen wasserbasierten Schmierstoffen.

Auch die Methodik der Tribometrie sollte weiterhin einen Forschungsgegenstand darstellen, ist sie doch essentiell für die Bestimmung und Optimierung von tribologischen Kennwerten. Hier wird es immer wichtiger, möglichst variable und realitätsnahe Belastungs- und Umgebungsparameter in Modelltribometern abzubilden. Damit sollen bisher nicht verstandene Phänomene reproduzierbar messbar und damit besser beobachtbar werden. Neben den experimentellen Methoden rückt auch die Modellierung tribologischer Prozesse immer stärker in den Fokus, z. B. um mittels atomistischer Simulation tribologische Phänomene auf der atomaren Skala nachvollziehen zu können.

3. Globale Lösungsansätze zur Optimierung komplexer tribologischer Systeme

Die Tribologieforschung hat des Öfteren gezeigt, dass die Optimierung einzelner tribologischer Probleme an Grenzen stößt, wenn ein komplexes System wie z. B. eine Maschine mit unterschiedlichen Reibpaarungen vorliegt. So ist das Effizienzoptimum solch einer Maschine in der Regel nicht zu erreichen, indem man die Tribopaarungen jede für sich einzeln optimiert. Hier ist ein globaler Lösungsansatz unter Berücksichtigung des Gesamtsystems mit seiner Schmierstoffversorgung und den Betriebsbedingungen zu wählen. Auch Systeme mit wechselnden tribologischen Zuständen (z. T. in Grenzreibung, z. T. in Hydrodynamik, im Extremfall sogar Trockenreibung durch Start-Stopp-Intervalle) erfordern einen globalen Ansatz bei der tribologischen Optimierung.

Dieser Ansatz gelingt zum einen über eine systemische Betrachtung unter Einbeziehung von Simulationstools und zum anderen mit der Entwicklung von multifunktionalen Werkstoffen bzw. Schichten mit einer entspre-

chenden Robustheit, z. B. durch den Einbau triboaktiver Elemente.

Unter diese Kategorie fallen auch Tribologiekonzepte mit unkonventionellen Fluiden (z. B. Kühlmedien) als Schmierstoff begleitet von der Werkstoff- und Schichtentwicklung mit einer kombinierten Verschleiß- und Korrosionsschutzwirkung. Wichtig für diesen Ansatz ist die Betrachtung von Oberfläche, Beschichtung und Schmierstoff als „Konstruktionselemente“.

Es werden in den nächsten Jahren immer größere und detailliertere Datenmengen aus Tribometermessungen und Komponententests anfallen. Zunehmend bedeutsam für die Tribologieforschung werden daher digitale Methoden der Versuchsplanung und -auswertung bis hin zur Einbeziehung der Künstliche-Intelligenz-Methoden. Dies soll zum einen helfen aus der unscharfen Datelage und den komplexen Zusammenhängen mit vielen Freiheitsgraden eindeutigere Schlüsse zu ziehen. Zum anderen bieten diese Methoden Chancen für eine energieeffizientere Auslegung von Maschinen und Prozessen unter Einbeziehung umfangreicher tribologischer Daten.

4. Vernetzung mit anderen Forschungsschwerpunkten

Ausgehend von maschinenbaulichen Fragestellungen und der Schmierstoffentwicklung einerseits und der Entwicklung neuartiger Werkstoffe und Beschichtungen andererseits, begleitet von physikalischen Grundlagenuntersuchungen bis hin zur Nanotribologie, bildete sich in den letzten Jahren ein neues, umfassendes Wissensgebiet der Tribologie hinaus. Die ausgeprägte Interdisziplinarität von physikalisch/chemischer Grundlagenforschung auf der einen Seite und der stark anwendungsgetriebenen Entwicklung von Werk- und Schmierstoffen auf der anderen Seite birgt zwar Schwierigkeiten, bietet aber auch enorme Chancen für weitere große Fortschritte der Tribologieforschung und die breite Umsetzung von Maßnahmen für reibungsoptimierte Maschinen und Anlagen.

Tribologische Phänomene finden sich in allen mechanisch bewegten Bauteilen, z.B. in Motoren, Pumpen, Hydrauliksystemen, Führungen und Betätigungssystemen u.a. in den Bereichen Verkehr, Luft- und Raumfahrt, Maschinenbau, Energie und Medizin. Tribologische Fragestellungen tauchen daher in den unterschiedlichsten Forschungsbereichen auf. Eine Beantwortung solcher Fragestellungen und die entsprechende Lösung tribologischer Probleme gelingt nur über eine Zusammenarbeit der verschiedenen Bereiche. Beispielgebend ist die Zusam-

menarbeit der Tribologieforschung mit dem Bereich Verkehr, insbesondere im PKW-Sektor. Bedingt durch den Massencharakter dieser Branche gelingt hier eine relativ schnelle Umsetzung tribologischer Maßnahmen im Markt. Es wird angestrebt, dass sich die Vernetzung mit anderen Forschungsbereichen ebenso gut entwickelt.

FERTIGUNGSTECHNIK BEITRÄGE AUS DEM FORSCHUNGSFELD



ZUSAMMENFASSUNG

Mit den insgesamt sieben Forschungsnetzwerken Energie wurde durch das BMWi ein Instrument geschaffen, um die wichtigsten Stakeholder bei der Gestaltung zukünftiger FuE-Schwerpunktprogramme im Kontext der Energiewende einzubinden. Unter dem Dach des Forschungsnetzwerks Energie – Industrie und Gewerbe werden die Akteure der daraus abgeleiteten Forschungsfelder vernetzt und entfalten so eine Wirkung in die Breite der Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen. Das Netzwerk und die enthaltenen Forschungsfelder richten sich hierbei an Wissenschaft, Industrie und Gewerbe in Deutschland.

Das Forschungsfeld Fertigungstechnik als eines der insgesamt sieben Forschungsfelder des Forschungsnetzwerks Energie – Industrie und Gewerbe hat zum Ziel, die entscheidenden Innovationen zu erkennen und zu vernetzen. Hierbei werden sowohl Innovationen im Forschungsfeld betrachtet wie auch Innovationen außerhalb des Forschungsfeldes, welche das Forschungsfeld wesentlich beeinflussen können.

Die Fertigung ist das Rückgrat der deutschen Volkswirtschaft. Hunderttausende Arbeitsplätze in der Industrie sind in Deutschland direkt in der Fertigung oder mit dem Umfeld der Fertigung verbunden. Auf Unternehmen der Fertigungstechnik entfällt ein bedeutender Anteil des Endenergiebedarfs im verarbeitenden Gewerbe. Dieser liegt je nach Methodik der Bilanzierung bei 15 bis 25 Prozent.

Wichtigste Treiber der Energieforschung sind hierzu aktuell die Themenkomplexe Energieeffizienz und Energieflexibilität. Entscheidend ist, die Fertigungstechnik nicht isoliert zu betrachten, sondern als wesentlichen Bestandteil eines Energiesystems, mit dem die Fertigung interagiert (Stromnetz, Gebäude,

Fertigungsprozesse etc.). Aus diesen wechselseitigen Beziehungen aus den vielfältigen Herausforderungen der Energieeffizienz und -flexibilitätszielstellungen sowie aus der Vielzahl der technischen Entwicklungen ist ein hochkomplexes Themenfeld entstanden.

Daraus ergibt sich die Herausforderung für die zukünftige Forschung, die Komplexität des Forschungsfeldes zu bewältigen und darüber hinaus neue Entwicklungen voranzutreiben. Die Forschungsausrichtung soll dabei den Leitlinien

- energieoptimiert und energieflexibel und
- themenübergreifend/disziplinnetzend bei gleichzeitiger Fokussierung auf
- neue Geschäftsmodelle

im Themenfeld folgen. Zu diesem Zweck wurden folgende fünf Schwerpunkte für die zukünftige Forschung identifiziert:

1. Neue Fertigungsverfahren
2. Effiziente Technologien für die Fertigung (Komponenten) und effiziente Fertigungsprozessgestaltung
3. (Energie- und Prozess-) Datenverfügbarkeit und Datenintegration
4. Komplexitätsreduktion interagierender Systeme
5. Befähigung

1. BEDEUTUNG DER ENERGIEFORSCHUNG IN DER FERTIGUNGSTECHNIK

1.1 Abgrenzung der Fertigungstechnik

Zum Forschungsfeld Fertigungstechnik zählt die energetische Optimierung von Maschinen und Anlagen in sämtlichen Fertigungsverfahren, die für die

THEMEN

1. Neue Fertigungsverfahren
2. Effiziente Technologien für die Fertigung (Komponenten) und effiziente Fertigungsprozessgestaltung
3. (Energie- und Prozess-) Datenverfügbarkeit und Datenintegration
4. Komplexitätsreduktion interagierender Systeme
5. Befähigung

Bearbeitung von Werkstoffen und zur Herstellung von Erzeugnissen eingesetzt werden. Die Fertigungstechnik ist hierbei ein Teilbereich der Produktionstechnik und wird gemäß der DIN 8580 in sechs Hauptgruppen unterteilt:

1. Urformen
2. Umformen
3. Trennen
4. Fügen
5. Beschichten
6. Stoffeigenschaften ändern

Gemäß der Klassifikation der Wirtschaftszweige, welche vom Statistischen Bundesamt verwendet wird, ist die Fertigungstechnik kein eigener Produktionsbereich, sodass Produktionsbereiche mit starkem Bezug zur Fertigungstechnik identifiziert werden müssen. Die mit der Fertigungstechnik vom Kuratorium des Forschungsfeldes assoziierten Bereiche können Abbildung 2 1 entnommen werden.

Produktionsbereiche mit starkem Bezug zur Fertigungstechnik

- 16 Holz, Holz-, Kork, Flecht- u. Korbwaren (ohne Möbel)
- 22 Gummi und Kunststoffwaren
- 25 Metallerzeugnisse
- 26 DV-Geräte, elektronische und optische Erzeugnisse
- 27 Elektrische Ausrüstung
- 28 Maschinen
- 29 Kraftwagen u. Kraftwagenteile
- 30 Sonstige Fahrzeuge
- 33 Rep., Installation v. Maschinen und Ausrüstung

Abbildung 2 1: Zuordnung einzelner Produktionsbereiche zur Fertigungstechnik

1.2 Fertigungstechnik in Deutschland

In Deutschland waren im Jahr 2015 im verarbeitenden Gewerbe 7,25 Millionen Beschäftigte tätig. Allein auf die Automobilindustrie und den Maschinenbau entfallen hierbei ca. 1,4 Millionen Personen, während 7-8% der gesamten deutschen Bruttowertschöpfung in diesen Branchen entsteht. Die Fertigungstechnik inklusive der weiteren in Abbildung 2 1 aufgelisteten ist somit ein wesentlicher Motor für die wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland.

Die Energieforschung trägt in diesem wichtigen Forschungsfeld zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Fertigung am Standort Deutschland bei. Energieeffiziente Produkte (Maschinen, Anlagen, Komponenten etc.) der Fertigungstechnik bieten darüber hinaus Wettbewerbsvorteile im globalen Wettbewerb.

Gemäß der vorab in Kapitel 2.1 dargestellten Abgrenzung kann der Anteil der Fertigungstechnik am Primärenergiebedarf dargestellt werden (Abbildung 2 2). Es ist ersichtlich, dass die Fertigungstechnik einen erheblichen Anteil des Gesamtenergiebedarfs des verarbeitenden Gewerbes beansprucht. Weiterhin werden

Tabelle 3.2.2: Verwendung von Energie nach Produktionsbereichen (Inländerkonzept)⁷⁾ Terajoule

Lfd. Nr.	CPA ⁶⁾	Produktionsbereiche u. private Haushalte	2000	2005	2010	2014
1	A	Erzeugnisse der Land-, Forstwirtschaft u. Fischerei	170 203	145 905	181 039	179
2	01	Erzeugnisse der Landwirtschaft, Jagd u. DL	142 211	137 419	173 545	170
3	02	Forstwirtschaftliche Erzeugnisse u. DL	5 826	4 336	5 810	3
4	03	Fische, Fischerei- u. Aquakulturerzeugnisse	2 164	1 754	1 683	3
5	B	Bergbauerzeugnisse, Steine u. Erden	90 337	90 303	82 878	101
6	05	Kohle	43 988	51 946	51 353	72
7	06	Erdöl und Erdgas	23 472	17 080	11 290	10
8	07-09	Erze, Steine u. Erden, sonst. Bergbauerzeugnisse u. DL	22 877	21 256	20 234	17
9	C	Herstellung Nahrungsmittel, Getränke, Tabakerzeugnisse	9 759 056	10 208 714	9 248 959	9 245
10-12		Nahrungsmittel, Getränke, Tabakerzeugnisse	222 120	221 154	227 894	223
11	13-15	Textilien, Bekleidung, Leder u. Lederwaren	30 044	35 783	24 708	23
12	16	Holz, Holz-, Kork-, Flecht- u. Korbwaren (ohne Möbel)	43 877	44 687	44 418	88
13	17	Papier, Pappe u. Waren daraus	180 823	305 239	249 007	234
14	18	Druckereileistungen, bespielt. Ton-, Bild- u. Datenträger	28 078	32 835	23 408	22
15	19	Kokerei- u. Mineralerzeugnisse	4 087 892	4 388 214	5 058 347	3 343
16	19.1	Kokalerzeugnisse	393 071	314 182	371 814	340
17	19.2	Mineralerzeugnisse	3 694 821	4 074 032	4 686 533	3 003
18	20	Chemische Erzeugnisse	1 329 444	1 681 433	1 559 937	1 573
19	21	Pharmazeutische Erzeugnisse	55 382	27 035	18 842	30
20	22	Gummi- u. Kunststoffwaren	81 506	88 446	98 234	93
21	23	Glas, Keramik, verarbeitete Steine u. Erden	311 537	254 937	279 771	292
22	23.1	Keramik, verarbeitete Steine u. Erden	100 244	88 029	87 710	88
23	23.2	Glas	211 293	166 914	192 061	204
24	24	Metalle	928 443	845 038	834 434	847
25	24.1-3	Roh Eisen, Stahl, Erzeugn. der ersten Bearb. von Eisen u. Stahl	792 431	725 947	711 711	743
26	24.4	NE-Metalle u. Halbzeug daraus	98 244	92 387	77 798	73
27	24.5	Gießereierzeugnisse	37 747	46 504	47 527	50
28	25	Metallerzeugnisse	93 911	104 937	107 498	110
29	26	Dringerei, elektronische u. optische Erzeugnisse	33 734	39 834	37 521	33
30	27	Sonstige Ausrüstungen	35 174	33 174	33 174	30

Produkte sowie Komponenten der Fertigungstechnik produktionsbereichs- und sektorenübergreifend eingesetzt.

Die Energieforschung in der Fertigungstechnik hat somit zwei Perspektiven:

- Optimierung des Energieverbrauchs in der Fertigungstechnik selbst (z. B. Minimierung der Reibung)
- Veränderung der Fertigungstechnik zur Optimierung des Energieverbrauchs der hergestellten Produkte (z. B. Pumpen)

3. THEMENVIELFALT IM FORSCHUNGSFELD

3.1 Herausforderung im Themenfeld

Die Herausforderungen des Themenfeldes im Kontext der Energieforschung unterliegen einer enormen Komplexität und können nur durch ein Zusammenspiel verschiedener Fachdisziplinen erreicht werden.

Beispielhaft und aus aktuellen Forschungsprojekten abgeleitet sei hier das Zusammenspiel von

- Maschinenbau,
- Elektrotechnik,
- Informatik,
- Betriebswirtschaft,
- Bauingenieurwesen,
- Architektur und
- Arbeitswissenschaften

genannt. Das Ergebnis einer Umfrage unter Energieeffizienzexperten durch das PTW, TU Darmstadt, hat hierbei die in Abbildung 3 1 dargestellte Schlagwortliste ergeben. Hierzu wurden die Befragten gebeten, Themen, welche sie mit dem Forschungsfeld assoziieren,

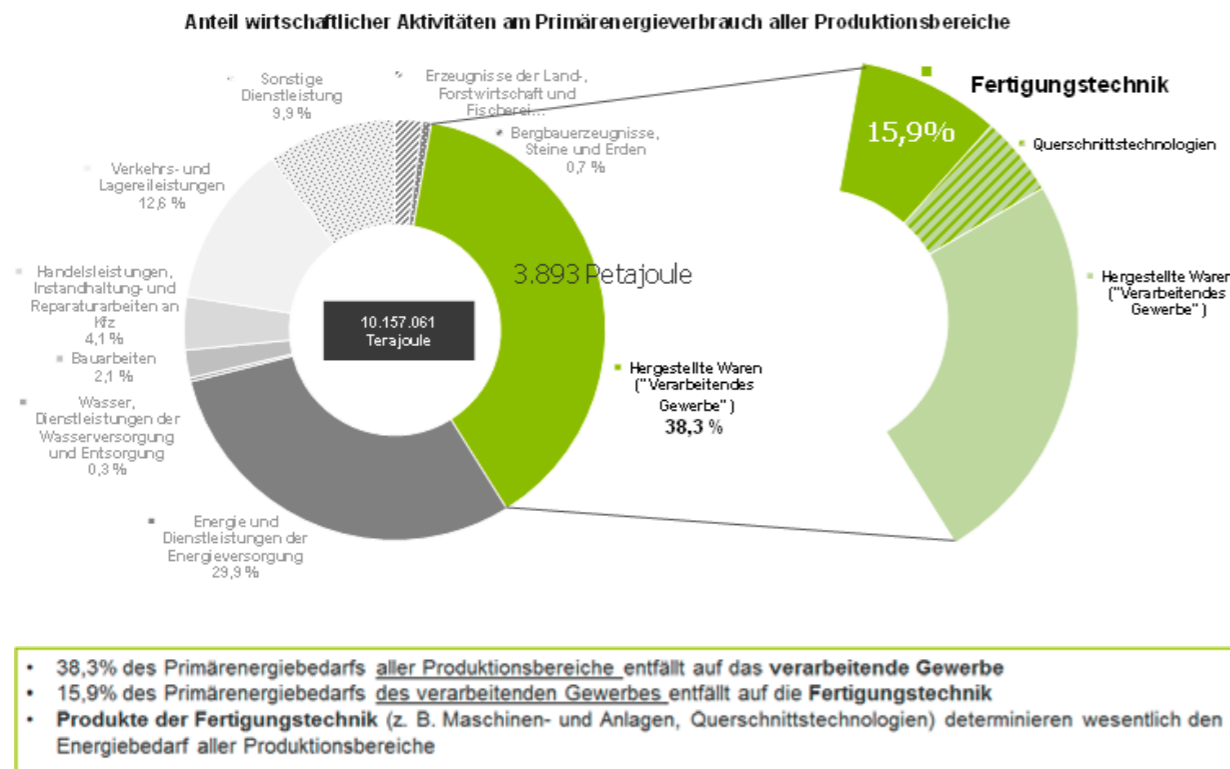


Abbildung 2 2: Primärenergiebedarf der Fertigungstechnik

zu nennen. Aus dem Ergebnis ist ersichtlich, dass multiple Forschungsfragen und gegebenenfalls gegenläufige Zielstellungen mit den angesprochenen Themen verbundenen sind.

3.2 Hemmnisse bezogen auf Umsetzungsmaßnahmen

Ein besonderes Anliegen des Kuratoriums ist die verstärkte Umsetzung von bereits bekannten Energieoptimierungsmaßnahmen sowie die Einbeziehung neuer noch zu entwickelnder Kompetenzen und Technologien. Vor diesem Hintergrund ist eine Analyse der aktuellen Hemmnisse, Energieeffizienzmaßnahmen umzusetzen, essentiell. Hierbei hat das Kuratorium die

in Abbildung 3 2 dargestellten Umsetzungshemmnisse identifiziert. Die identifizierten Hemmnisse können hierbei nur die Basis für weitere fokussierte Untersuchungen darstellen, um langfristig unter Kenntnis der Hemmnisse bekannte Energieoptimierungsmaßnahmen in allen Produktionsbereichen umzusetzen.

4. SCHLÜSSELTHEMEN DES FORSCHUNGSFELDES ENERGIE – FERTIGUNGSTECHNIK

Die durch das Kuratorium identifizierten fünf Schlüsselthemen (links), die zu den drei übergeordneten Leitaspekten beitragen sollen (rechts) können Abbildung 4 1 entnommen werden.



- Multiple und zum Teil gegenläufige Zielstellungen der angesprochenen Forschungsfragestellungen
- Komplexe Herausforderungen im Themenfeld

Abbildung 3 1: Schlagworte im Themenfeld

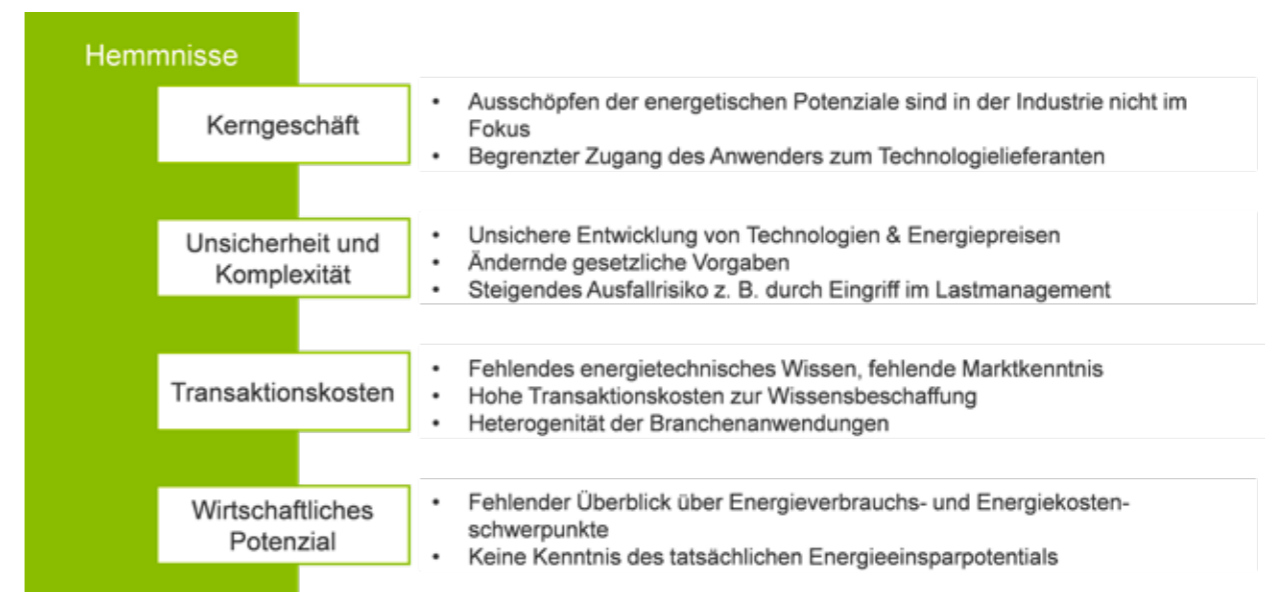


Abbildung 3 2: Hemmnisse in der Umsetzung von Energieoptimierungsmaßnahmen

Im Folgenden sind Einzelthemenschwerpunkte der fünf Schlüsselthemen, entsprechend der Ergebnisse der Auftaktsitzung, weiter detailliert.

4.1 Neue Fertigungsverfahren

Generative Herstellungsverfahren zeichnen sich durch eine rasant wachsende Verbreitung aus. Die Verfahren sowie die Vorprozesse zur Herstellung des Grundverfahrens sind vergleichsweise energieintensiv und sollten daher weiter erforscht werden. Dies gilt auch für hybride Herstellungsverfahren, welche die Vorteile der generativen Verfahren mit klassischen Produktionsverfahren verbindet. Gleichsam ist zu betrachten, welchen Einfluss Bauteile, die mit vorab genannten Verfahren hergestellt wurden, auf den Energiebedarf von Funktionsmodulen haben können (z. B. Integration von Heiz-/Kühlkanälen in Bauteile). Auch die Nutzung von Recycle-Materialien zur Fertigung kann hier einen nennenswerten Beitrag liefern.

Verkürzte Prozessketten definieren material-, zeit- und energieintensive Produktions- und Logistikabläufe völlig neu. Innovative IuK-Technologien wie das Maschinelle Lernen bieten das Potenzial, Gesamtprozesse in nie dagewesener Dimension zu optimieren. Der Mensch als kreativer Problemlöser spielt in Fabriken der Zukunft eine zentrale Rolle. Intuitive soziotechnische Schnittstellen stellen ihm Assistenzfunktionen für eine wertschöpfungs-, energie- und klimaoptimale Produktion zur Verfügung.

Der Leichtbau (Verbundwerkstoffe, Schäume etc.) ermöglicht wegen geringer Massen Energieeinsparungen bei Herstellung und Nutzung. Der Leichtbau von

Komponenten der Fertigungstechnik sowie die Bearbeitung von Leichtbaukomponenten erfordern die Entwicklung neuer Fertigungsverfahren sowie die Integration neuer Prozesse in bestehende Anlagen und Fertigungsverfahren. Hierzu zählen Forschungsanstrengungen zur Entwicklung von Technologien und Verfahren zum

- Fügen,
- Urformen neuer Materialien,
- Umformen neuer Materialien,
- Recycling.

Niedertemperaturverfahren ermöglichen die Nutzung von Abwärme auf Prozesstemperaturen, welche durch direkte Abwärmenutzung oder durch Nutzung von Wärmepumpentechnik bereitgestellt wird. Beispielsweise sollen in der Oberflächenbehandlung (z. B. Reinigung) und der Beschichtung (Pulverbeschichtung, Lackierung) Verfahren entwickelt werden, welche die verstärkte Nutzung von Abwärme als Energiequelle ermöglichen.

4.2 Effiziente Technologien für die Fertigung (Komponenten) und effiziente Fertigungsprozessgestaltung

Gleichstromnetze in der Produktion ermöglichen die Reduktion von Wandlungsverlusten und Einsparung von Rückspeisetechnik. So können Multiachsenanwendungen, wie Roboter und Werkzeugmaschinen, direkt

am Gleichstromkreis betrieben werden. Gleichsam werden Wandlungsverluste sowie Netzurückwirkung minimiert und die Integration von Energiespeichern vereinfacht. Geeignete Anwendungsfelder stellen rekuperierende Systeme mit gegenläufiger Bewegung sowie Applikationen mit intensivem zyklischem Bremsen, hoher Bremsleistung und großen zu bewegenden Massen dar. Zurzeit ist diese Technik allerdings nur wenig verbreitet und standardisiert. Der Betrieb von Anlagen direkt am Gleichstromkreis bietet somit enorme Energieeinsparpotenziale und ist insbesondere hinsichtlich der Standardisierung zu erforschen.

(De-)zentrale Speichertechnologien (z. B. Batterie-speicher im Schaltschrank) an einzelnen Produktionsmaschinen können einen Beitrag zum Lastmanagement auf Maschinenebene liefern und somit unter anderem eine schlankere und effizienter betriebene Energieinfrastruktur ermöglichen. Darüber hinaus wird ein Beitrag zur flexibilisierten Energienutzung geleistet. Auch die Ertüchtigung funktionaler Speicher, wie z. B. eine Reinigungs- und Trocknungsmaschine, die als temporärer Zwischenspeicher thermischer Energien dient, bietet hohe Flexibilisierungspotenziale.

Energieeffiziente Technologien ermöglichen einen hohen Wirkungsgrad im Auslegungspunkt. Besondere Bedeutung hat jedoch auch ein hoher Wirkungsgrad bei Abweichung vom Auslegungspunkt. Dies kann durch adaptive Prozessführung und maschinelles Lernen erreicht werden. Digitalisierung generiert hierbei Systemwissen und reduziert das Auftreten von ineffizienter Teilprozess-Optimierung.

Energieeffiziente und nachhaltige Kühl- und Kältetechnik nimmt in der Fertigungstechnik eine zentrale Rolle ein, da nahezu der komplette Energieeinsatz in Abwärme umgewandelt wird. Entwicklungen zur Reduzierung der Anforderungen an die Kühltemperatur aber auch Konzepte zur bedarfsgerechten zentralen oder dezentralen Bereitstellung von Kälte versprechen hohes Einsparpotenzial. Darüber hinaus bieten Technologien zur Kühlung ein großes Potenzial zur Anbindung an thermische Speicher.

Multivalente Energienutzung ermöglicht beispielsweise den simultanen oder in Abhängigkeit der Randbedingungen alternierenden Betrieb eines Prozesses mit Gas oder Strom als Energiequelle. Die Ertüchtigung von Komponenten und Anlagen zur multivalenten Energienutzung kann ein Energieüberangebot einbinden und den Bedarf an einzelnen Energieträgern flexibilisieren. Die Sektorkopplung

bietet somit enorme Flexibilitätspotenziale und ist insbesondere hinsichtlich der Regelung zu erforschen.

Energierückgewinnung ermöglicht es, durch technische Verfahren Energie rückzugewinnen. In der Mechatronik lassen sich insbesondere bei Anwendungen mit vielen zyklischen Bewegungen und hohen bewegten Massen durch hocheffiziente Rückspeiseverfahren signifikante Energieeinsparpotenziale erzielen. Umsetzungen scheitern oftmals an den hohen Investitionskosten, die über den Lebenszyklus amortisiert werden müssen. Daher sollen kosteneffiziente Technologien an dieser Stelle weiter untersucht werden.

4.3 (Energie- und Prozess-) Datenverfügbarkeit und Datenintegration

Simulationsmodelle ermöglichen es Unternehmen, Lern- und Optimierungsprozesse in eine virtuelle Umgebung zu verlagern, und können damit einen wesentlichen Beitrag zur risiko- und kostenminimierten Energieeffizienzsteigerung in den Lebenszyklusphasen

- Planung (Vergleichsfunktion, Regelungsfragen),
- Aufbau und Inbetriebnahme komplexer interagierender Systeme,
- Betrieb (Soll-Ist-Vergleich),
- Retro-fit (Vergleichsfunktion)

Intelligente automatisierte CNC-Optimierung unter Zuhilfenahme von Simulationswerkzeugen können in der Arbeitsplanung als auch in der kontinuierlichen Optimierung dem Nutzer Effizienzoptionen aufzeigen.

Smart Services der Digitalisierung ermöglichen zum einen durch Monitoring- und Reporting-Funktionalitäten, den aktuellen Energiebedarf in Echtzeit zu überwachen, und bieten somit die Möglichkeit, bei Abweichungen direkt einzugreifen. Zum anderen bieten Machine-Learning-Algorithmen vielfältige Energieeffizienz-Potenziale. So ermöglichen Machine-Learning-Algorithmen unter anderem eine sensorische Prozessführung, Condition Monitoring auf Basis von Referenzbauteilen oder aber die Erreichung der maximalen Auslastung einer Maschine.

Für Energieeffizienzmaßnahmen auf Basis von Simulationsmodellen oder Smart Services der Digitalisierung



Abbildung 4 1: Schlüsselthemen im Forschungsfeld Fertigungstechnik

ist die Bereitstellung von Betriebsdaten erforderlich. Somit bildet die Erfassung, Speicherung und Auswertung von Daten, beispielsweise in Form von Datenbanken zur Bereitstellung von technischen Kennlinien zur Verwendung in einem Planungsprozess (Maschinen, Anlagen, Fabrik), eine wesentliche Grundlage für Energieeffizienzmaßnahmen in diesem Bereich.

4.4 Komplexitätsreduktion interagierender Systeme

Die Effizienzpotenziale der energetischen Vernetzung führen zu Energiesystemen, welche durch Interaktion an Komplexität zunehmen. Dies betrifft die Inbetriebnahme sowie die effiziente Regelung im Betrieb. Aus der Bewältigung der gesteigerten Komplexität interagierender Energiesysteme resultiert Forschungs- und Entwicklungsbedarf. So ermöglichen intelligente Maschinenkomponenten (Hydraulikaggregate, Kühlaggregate etc.) im Sinne von Plug-and-Play Fähigkeiten (Standardisierung von Schnittstellen) die aufwandsreduzierte Integration in ein physisches und datentechnisches Gesamtsystem.

Der zunehmende Einsatz von Datenpunkten im Rahmen von Digitalisierungsprojekten ermöglicht auch eine immer bessere Ausnutzung der Effizienzpotenziale. Dennoch steigt mit der Anzahl der Datenpunkte auch die Gefahr von fehlerhaften Datensätzen. Vor diesem Hintergrund und zum langfristig effizienten Betrieb von Energiesystemen werden robuste und aggregierte Sensordaten erforderlich. Forschungsbedarf besteht daher bei Auswerteroutinen zur Detektion von fehlerhaften Datensätzen sowie bei der Entwicklung und Auswahl robuster Sensorik für den dauerhaften Einsatz.

Kürzere Lebenszyklen von Produkten erfordern vermehrte Rekonfigurationen der zur Herstellung erforderlichen Produktionssysteme. Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen müssen vor diesem Hintergrund auch bei einem Wechsel der Produktionskonfiguration weiterhin ihr Einsparpotenzial entfalten können. Dies erfordert modulare Maschinenkomponenten, welche durch geringfügige Anpassungen auch für neue Produktionsaufgaben genutzt werden können. Entsprechende disziplin- und systemübergreifende Schnittstellen erfordern seitens der Maschinen und der Komponenten weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um den Einsatz in green-field- und brown-field-Anwendungen zu ermöglichen.

4.5 Befähigung

Die (universitäre) Weiterbildung zur Befähigung von Schlüsselpersonen im Unternehmensumfeld stellt einen weiteren wesentlichen Einflusshebel zur Umsetzung von Energieeinsparpotenzialen dar. So kommt den Produktionsplanern der größte Hebel in Energieeffizienzgesichtspunkten bei den Entscheidungen von Fragestellungen, die z. B. die Materialauswahl oder die Fertigungsverfahren (Umformung vs. Zerspanung) betreffen, zu. Auch Maschinenentwickler (Bedarfsgerechte Komponenten oder auch Senkung des Druckluftbedarfs) sowie Maschinenbediener und Instandhaltungspersonal (z. B. Verkürzung von Taktzeiten, Reduzierung von Druckluftleckagen) können Einfluss auf den zukünftigen Energiebedarf von Anlagen nehmen.

Im Rahmen der Befähigung spielt die Entwicklung von wissenschaftlichen Methoden zur Identifizierung weiterer wirtschaftlicher Energieeffizienzpotenziale eine entscheidende Rolle. Zu bearbeitende Themenfelder stellen unter anderem die Technologiewirksamkeit oder auch das Prozess-Know-how dar. Entsprechende Methoden sollten insbesondere die Optimierung im Produktionsbestand (brown-field) im Fokus haben und die Entwicklung neuer Technologien beeinflussen. Dieser Bereich steht bislang wissenschaftlich weniger im Fokus als Neuplanungen.

Viele Energieeffizienzansätze stellen unternehmensinternes Know-how dar. Best-Practice-Ansätze und Technologiedemonstratoren (sowohl inner- als auch außeruniversitär) zeigen die Wirksamkeit innovativer Ansätze einem breiten Publikum auf und machen somit die Einsparpotenziale deutlich und das erforderliche Know-how zugänglich. Weiterhin können Umsetzungshürden durch das Aufzeigen funktionaler Ansätze genommen werden.

ABWÄRMENUTZUNG BEITRÄGE AUS DEM FORSCHUNGSFELD



■ MOTIVATION

Im Rahmen des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe wurden sieben strategische Schlüsselthemen identifiziert, deren Förderung jeweils in einem Forschungsfeld organisiert wird. Eines dieser Schlüsselthemen ist die Abwärmenutzung in Industrie und Gewerbe, welches in dem Forschungsfeld Abwärmenutzung adressiert wird.

Bei nahezu jedem industriellen Prozess entsteht Wärme. Das reicht von vergleichsweise niedrigen Temperaturen von rund 40 °C, die in der Industrie bei technischen Anlagen wie etwa Kompressoren oder Pumpen entstehen, bis zu über 1.000 °C, bei Verbrennungsprozessen. Mehreren Studien zufolge liegt das Abwärmepotenzial in Deutschland zwischen etwa 88 und 260 Terawattstunden pro Jahr. Die Weiterentwicklung von Technologien zur Nutzung der Abwärmepotenziale ist ein Ziel des Forschungsfeldes "Abwärmenutzung".

Dazu wurde im Rahmen dieses Forschungsfeldes in zwei Workshops am 23. März 2017 in München und am 20. September 2017 in Freiburg der Forschungsbedarf von Technologien zur Nutzung dieser Abwärme diskutiert. Die Ergebnisse dieser Workshops sind im Folgenden zusammengefasst. Naturgemäß kann diese Zusammenstellung nicht vollständig sein.

■ FuE-BEDARF ZUR ABWÄRMENUTZUNG

1. Thermoelektrik

Die wesentlichen Vorteile der thermoelektrischen Abwärmeverstromung liegen darin begründet, dass sie ohne jegliche bewegliche Teile auskommt, damit eine hohe Betriebsdauer ohne intensive Wartung verspricht, gleichzeitig unabhängig von Raumlage funktioniert und potenziell sehr kostengünstig umzusetzen ist. In den letzten Jahren gab es signifikante Weiterentwicklungen

im Bereich der Hochtemperaturmaterialien und -module. Nichtsdestotrotz ist ein großflächiger Einsatz heute noch nicht Realität, da systemseitig bisher nur wenige Prototypen gefertigt wurden und somit noch keinerlei Skaleneffekte bei der Materialiensynthese bzw. bei Modul- und Systemfertigung erreicht werden konnten. Gleichzeitig ist ein starkes Interesse an dieser Technologie insbesondere von KMUs zu beobachten, welche aber die signifikanten Entwicklungskosten für Einzelanwendungen nicht stemmen können. Um der thermoelektrischen Abwärmenutzung Marktpotenziale eröffnen zu können, müssen daher Konzepte erarbeitet werden, die die Systemkosten signifikant reduzieren und gleichzeitig eine modulare Bauweise ermöglichen, sodass die Adaption auf unterschiedliche Anwendungen einfach umgesetzt werden kann. Darüber hinaus kann durch weitere Materialoptimierungen und -entwicklungen hinsichtlich der Steigerung der Effizienz über einen breiten Temperaturbereich bzw. über eine Reduktion der Kosten durch Verwendung kostengünstigerer Materialien und automatisierter Herstellprozesse der Markteintritt dieser Technologie befördert werden.

2. Organic-Rankine-Cycle

Mittels der Organic-Rankine-Cycle-Technologie kann aus Wärme eines großen Temperatur und Leistungsbereichs elektrische Energie erzeugt werden. Für Anwendungen mit hohen Wärmequellentemperaturen (> 500 °C) und großen Leistungen (>> 1 MW), wie z. B. Zementwerken, kann die Technologie als Stand der Technik betrachtet werden. Die Vielzahl der Anwendungen liegt jedoch bei deutlich geringeren Wärmequellentemperaturen und auch geringeren Leistungen vor. Die im Temperaturbereich oberhalb 100 °C/200 kW Eingangsleistung aktuell verfügbaren Systeme weisen für einen flächendeckenden Einsatz noch zu hohe Kosten auf. Neben der Weiterentwicklung und Kostenreduktion der Systeme bietet die Integration in Produkte mit Abwärmeeinfall oder -abfuhr, wie z. B. Kompressoren oder Kühler, die Möglichkeit, Kosten und Komplexität deutlich zu reduzieren. Niedertemperaturanwendungen wie die oben genannten Kühler standen bisher nicht im Fokus der Abwärmenutzung, weshalb kaum Kenntnisse über Laufzeiten, Temperaturniveaus, etc. vorliegen. Hierfür muss mittels Messkam-

THEMEN

1. Thermoelektrik
2. Organic-Rankine-Cycle
3. Effiziente Wärmepumpen ohne schädliche Kältemittel
4. Wärmeübertragung
5. Wärmenutzung
6. Thermische Speicher
7. Energiemanagement

pagnen eine Datenbasis für die zielgerichtete Entwicklung von passenden ORC-Systemen geschaffen werden. Technologischer Schwerpunkt bei der Weiterentwicklung der ORC-Technologie ist die Anpassung auf geringe Antriebstemperaturen, so dass Wärme ab 70 °C genutzt werden kann. Schlüssel hierfür sind eine optimierte Gestaltung der Verdampfer mit geringen Temperaturdifferenzen zur Wärmequelle, kostengünstige Expansionsmaschinen und betriebssichere Arbeitsmedien mit geringem GWP. Mit diesen Ergebnissen können Konzepte zur Integration des ORCs in unterschiedliche Produkte erarbeitet werden. Abwärmenutzungs- oder -verstromungssysteme bieten die Möglichkeit, ohne Mehraufwand Daten aufzuzeichnen. Hieraus kann für die Kunden ein Zusatznutzen generiert werden, wie z. B. die Optimierung und vorausschauende Wartung von Systemen.

3. Effiziente Wärmepumpen ohne schädliche Kältemittel

Eine besonders effiziente Nutzung industrieller Abwärme ist die direkte Verwertung der Wärme oder durch Antriebswärme erzeugte Kälte in den jeweiligen Prozessen. Die direkte Verwertung der Wärme ist meist schwierig, da die entstehende Abwärme häufig auf einem zu niedrigen Temperaturniveau anfällt. Durch die Verwendung von effizienten elektrischen oder thermischen Wärmepumpen kann das Temperaturniveau auf das benötigte Level angehoben werden. In anderen Anwendungen kann Abwärme auf einem hohen Temperaturniveau genutzt werden, um durch thermische Wärmetransformation Kälte auf einem niedrigen Temperaturniveau bereit zu stellen.

Bei elektrischen Wärmepumpen für den industriellen Einsatz besteht Entwicklungsbedarf insbesondere hinsichtlich der Verwendung alternativer Low-GWP Kältemittel. Hier ist aufgrund der F-Gase-Verordnung, die die Verwendung der klassischen Kältemittel immer weiter reglementiert, von einem verstärkten Bedarf an Alternativen auszugehen. Die hier verfügbaren Kältemittel erfordern Anpassungen des Verdichters, des Ölmanagements und der Wärmeübertrager. Darüber hinaus adressieren industrielle Abwärmeprozesse andere Temperaturniveaus, sowohl auf der Quellen-, als auch

auf der Senkenseite des Prozesses, die ebenfalls die Anpassung und Weiterentwicklung der Kältekreis Komponenten erforderlich machen. Zusätzlich besteht Entwicklungsbedarf im Bereich neuer effizienter Wärmepumpentechnologien wie Magneto-, Elasto- oder Elektrokalorik, welche ganz ohne den Einsatz kritischer Fluide auskommen.

Neben den elektrisch getriebenen Prozessen sind thermisch getriebene Wärmepumpen und Kältemaschinenprozesse, die z. B. auf dem Grundprinzip der Ab- oder Adsorption basieren, von großem Interesse. Hier ist die Wahl des Kältemittels weniger kritisch, da Arbeitsmittel wie Wasser, Methanol oder Ethanol sowie Wasser-Salz-Gemische Anwendung finden. Für das Arbeitsmittel Wasser ist eine Erweiterung des Arbeitsbereiches unter den Gefrierpunkt eine zentrale Herausforderung, die eine deutliche Erweiterung des Anwendungsspektrums thermischer Verfahren erlauben würde. Darüber hinaus stellen – wie bei den elektrischen Systemen auch – flexible Lösungen, die eine effiziente Anpassung an eine Bandbreite von Temperatur- und Leistungsanforderungen erlauben, die zentrale Entwicklungsaufgabe dar.

4. Wärmeübertragung

Wärmeübertrager sind zentrale Bauteile in Prozessen zur Abwärmenutzung und stellen in den Anlagen einen relevanten Kosten- und Bauraumanteil dar.

Trotz schon bestehender großer Vielfalt an Wärmeübertragerbauformen und – betriebsweisen sind insbesondere hinsichtlich der Leistungsdichte, Robustheit und der Kosten noch Verbesserungen möglich und zentral erforderlich, um abwärmennutzende Systeme effizient und kompakt zu gestalten.

In der Entwicklung von Wärmeübertragern für Abwärmeprozesse sind Bauformen zu entwickeln, die – z. B. durch einen modularen oder bauraumangepassten Aufbau und die flexible Wahl von Materialien – eine hohe Anpassungsfähigkeit im Einsatz ermöglichen. Hierfür sind zunächst geeignete Auslegungsverfahren, die unter Berücksichtigung der thermischen und hydraulischen

Effizienz die Optimierung von Bauraum und Bauteilkosten erlauben, zu entwickeln.

Insbesondere im Hinblick auf steigende Ansprüche bezüglich Kompaktheit und Effizienz von Wärmeübertragerprozessen spielt der Wärmetransport eine immer wichtigere Rolle. Hier sind Heatpipes für den passiven und effizienten Wärmetransport zwar eine altbekannte, aber immer noch sehr wenig eingesetzte Technologie. Für einen breiteren Einsatz dieser Technologie zur effizienten Nutzung von industrieller Abwärme besteht Forschungsbedarf unter anderem hinsichtlich neuer Fertigungstechnologien (3D-Druck), bezüglich der Verwendung alternativer, kostengünstiger Materialien sowie neuer Heatpipe-Konzepte (pulsating Heatpipes, Loop-Heatpipes, schaltbare Heatpipes) für mehr Flexibilität und zur weiteren Steigerung der Leistungsdichten.

5. Wärmenetze

Abwärmeströme unterhalb von 35 °C werden im Allgemeinen nicht als nutzbare Wärme wahrgenommen. Überwiegend fallen diese Wärmeströme wasser-gebunden an. In den meisten Fällen wird das warme Wasser weiter abgekühlt, z. B. verrieselt, und anschließend entsprechend den gesetzlichen Anforderungen in Flüsse, Abwasserkanäle und/oder Kläranlagen „entsorgt“. Bekannte Beispiele für solche niederexergetischen Energiequellen sind Grubenwässer, Abwasserströme aus der Papierindustrie, Stahlverarbeitung, Grauwasser etc.

In Bezug auf die Nutzung dieser niederexergetischen Abwärmeströme zur Gebäudeheizung besteht ein hoher Anpassungsbedarf zwischen dem derzeit verfügbaren Angebot und der tatsächlich genutzten Menge. Dieser Anpassungsbedarf ist größtenteils auf die vorhandene Wärmeversorgungsinfrastruktur zurückzuführen, die entweder aus vielen individuellen dezentralen Systemen oder zentralen Systemen mit deutlich höheren Betriebstemperaturen besteht.

In dezentralen Systemen kann die Niedertemperaturwärme entweder direkt in niederexergetischen Temperierungssystemen (z. B. Fußbodenheizung, Bauteilaktivierung) genutzt werden oder auch indirekt z. B. als Wärmequelle für Wärmepumpen eingesetzt werden. Als zentrale Systeme kommen Tieftemperaturwärmenetze in Frage. Durch Ausnutzung der Substitutionspotenziale fossiler Brennstoffe im Gebäudebereich könnten deutliche Emissionsminderungen von Treibhausgasen bewirkt werden. Zugleich könnte die Wärme,

die derzeit der Entsorgung zugeführt oder rückgekühlt wird, auch wirtschaftlich interessant verwertet werden.

FuE-Bedarf in technischer Sicht besteht in erster Linie bei der Erarbeitung von niederexergetischen Gesamtkonzepten und Produkten zur Nutzung der Niedertemperaturwärme durch Integration von Mehrquellensystemen. Ein weiteres Thema sind Methoden zur Transformation von hydraulischen Systemen. Durch die zeitlichen Schwankungen des Wärmedargebots und der Wärmenachfrage besteht FuE-Bedarf für Technologien zur Flexibilisierung von Wärmenetzen. Außer der Demonstration der technischen Machbarkeit besteht vor allem die Notwendigkeit, auch die wirtschaftliche Umsetzbarkeit darzustellen.

Aus organisatorischer Sicht besteht Bedarf bei der Entwicklung von Planungshilfen zur Ermittlung von Angebot und Nachfrage und der Verknüpfung von Erzeuger und Verbraucher, z.B. mittels (kalter) Nah- und Fernwärmekonzepte. Durch die hohe Anzahl von beteiligten Akteuren ist eine gute Akzeptanz notwendig, die im Zuge von Reallaboren wissenschaftlich evaluiert werden kann.

6. Thermische Speicher

Durch den Einsatz thermischer Speicher können der Anfall von Abwärme und ihre weitere Nutzung voneinander entkoppelt werden. Zeitweise anfallende Überschüsse können gespeichert und einer späteren Nutzung zugeführt werden. Industrielle Prozesse werden teilweise als kontinuierliche Prozesse, teilweise als batch-Prozesse betrieben – siehe z. B. Stahl- und Eisenindustrie. Wärmespeicherung erlaubt die Nutzung kontinuierlich anfallender Abwärme auch in batch-Prozessen und umgekehrt. Auch kann es unter Umständen sinnvoll sein, Kälte direkt aus Abwärme zu erzeugen und dann für eine weitere Verwertung zu speichern bzw. thermische Speicher direkt in ein Wärmenetz einzubinden.

Des Weiteren trägt Kälteerzeugung in Deutschland ca. 16% zum Stromverbrauch bei –Tendenz stark wachsend – daher ist auch bei der Flexibilisierung der Kälteerzeugung mittels Kompressionskälte durch Kältespeicher der Hebel sehr groß und der Entwicklung effizienter und kostengünstiger Kältespeicher kommt eine wichtige Rolle zu.

Zusammenfassend leisten thermische Speicher einen wichtigen Beitrag zur Flexibilisierung der Möglichkeiten der Abwärmenutzung hinsichtlich Prozessintegration, Hybridisierung mit anderen (erneuerbaren) Wärmequellen, Einbindung in Wärmenetze und Betriebsführung.

Bei den Speichertechnologien besteht Forschungsbedarf zu neuen Materialien (z. B. Phase-Change-Materials (PCM)), Wärmetauschern und Speicherkonzepten. Während bei passiven PCM Speichern Wärmetauscher das Speichervolumen durchdringen sind bei aktiven PCM Speichern die Wärmeübertragung und das Speichervolumen (und damit die Speicherkapazität) entkoppelt, mit jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen und entsprechendem Forschungsbedarf.

Für Prozesse mit sehr hohen Abwärmepemperaturen können Hochtemperatur-Speicher eingesetzt werden, z. B. auf Basis von Salzschnmelzen und/oder Feststoff-Schüttungen oder thermochemischen Speicher, um nur einige Optionen explizit zu nennen. Auch hier besteht Forschungsbedarf zu Materialien und (im Falle durchströmter Schüttungen) deren Verträglichkeiten sowie dem Zusammenspiel mit Wärmeübertragern zur Be- und Entladung. Insbesondere thermochemische Speicher mit dem großen Potenzial günstiger, kompakter und verlustfreier Langzeitspeicherung sind noch wenig ausgereift hinsichtlich Materialien und Speicherkonzepten. Zu weiteren Speicherkonzepten, wie z. B. Feststoffspeichern, besteht Forschungsbedarf hinsichtlich kostengünstiger, kompakter Lösungen für industrielle Anwendungen.

7. Energiemanagement

Energiemanagement ist seit vielen Jahrzehnten fester Bestandteil von industriellen Produktionsanlagen – in einfachen Fällen der Lastabwurf einzelner Anlagen. In Bezug auf die Nutzung von Abwärme besteht die Herausforderung eines Energiemanagements in der Flexibilisierung entweder der Produktion selber oder in der Steuerung der Abwärmeflüsse zu „smarten“ Erzeugern um eine last-, temperatur- und angebotsgeregelte Integration in die Wärmeversorgung zu ermöglichen. Im Einzelnen besteht in Bezug auf die Nutzung industrieller Abwärme folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- Regelung und Steuerung komplexer Abwärmesysteme (Integration von anderen Quellen). Hier sollten Demonstrationsvorhaben initiiert werden.
- Entwicklung von Regelungen um Abwärmeflüsse zu „smarten“ Erzeugern zu wandeln
- Entwicklung von Methoden zur schnellen Erfassung des dynamischen Profils von Abwärmepotenzialen zur Bewertung der Flexibilisierbarkeit des Abwärmepotenzials (Monitoringmethoden)

- Vorhersagemodelle für den zeitlichen Verlauf (Temperaturniveau, Leistung) von Abwärmequellen (model predictive control)

■ RAHMENPOLITISCHE BEDARFE

Um eine breite Wirksamkeit und einen flächendeckenden Einsatz der oben beschriebenen Technologien zu erreichen, sollte bereits in einer frühen Phase die Markteinführung nach erfolgreicher Technologie- und Produktentwicklung unterstützt werden.

Regulatorische Anreize wie die ISO50001/3 sollten weiterentwickelt werden und Mindeststandards für die Verbesserung von Energiekennzahlen im Energiemanagement enthalten.

Ein einfach zu handhabendes Marktanreizprogramm für Unternehmen kann beim Markteintritt neuer Technologien helfen und unterstützt bei der Erreichung von signifikanten Stückzahlen, welche wiederum für die Erreichung niedriger marktgerechter Kosten notwendig sind.

Bei der Einspeisung von elektrischer Energie ins Netz müssen hohe technische und regulatorische Anforderungen erfüllt werden, um besonders mit der fluktuierenden Leistung bei der Einspeisung von Strom aus Sonne und Wind die Stromnetze stabil zu halten. Für die Stromerzeugung aus Abwärme gelten die gleichen hohen Anforderungen, auch wenn im Einzelfall die Einspeisung elektrischer Energie deckungsgleich mit hohem Strombezug, z. B. für den Betrieb des Werks/der abwärmeerzeugenden Anlage ist. Hier muss zumindest eine Gleichstellung der Stromerzeugung aus Abwärme mit periodisch rückgespeistem Strom (z. B. von Kränen, Hochregallagerantrieben etc.) geschaffen werden, um unnötige Kosten zu vermeiden. Der administrative Aufwand, wie z. B. Anmeldung beim Netzbetreiber, Genehmigung etc., muss besonders für Anlagen mit geringem Anteil am Gesamtstrombedarf des Unternehmens reduziert werden. Hier könnten 10 % der Stromeigenerzeugung (ausgeschlossen EEG-Anlagen und BHKWs ohne Wärmenutzung) von der EEG-Umlage und somit von der Anzeigepflicht beim Netzbetreiber befreit werden.

Langfristig kann eine CO₂-Steuer, wie z. B. in Kanada, Abwärmenutzungstechnologien zur weiten Verbreitung verhelfen.

HOCHTEMPERATUR-SUPRALEITUNG BEITRÄGE AUS DEM FORSCHUNGSFELD



■ MOTIVATION

Anlässlich der Initiierung des BMWi-Forschungsfeldes Hochtemperatur-Supraleitung im November 2016 wurde Prof. Noe (KIT) aufgefordert, den FuE-Bedarf zur Hochtemperatur-Supraleitung aus der Fachszene aufzunehmen und gegenüber dem BMWi/PTJ darzustellen. Anlässlich der Hannover Messe im April 2017 und dem Braunschweiger Supraleiterseminar im Juni 2017 wurden dazu Treffen des Forschungsfeldes angesetzt, bei denen Vertreter aus Industrie (ATZ, BNG, Bruker, d-nano, ECOS, evico, Magnet World, Nexans, Vision Electric Super Conductors, Siemens CT, Sumitomo, Theva) und Forschung (KIT, U Braunschweig, U Köln) den Forschungsbedarf gesammelt haben. Dieser ist im Folgenden aggregiert dargestellt. Bei der Vielzahl der Einzelvorschläge wurde versucht, den Kerngedanken darzustellen. Selbstverständlich erhebt diese Darstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

FuE-Bedarf zur Hochtemperatur-Supraleitung

Die Hochtemperatur-Supraleitung besitzt als Querschnittstechnologie eine Vielzahl von attraktiven Anwendungen in Energie, Medizin, Transport, Industrie und Wissenschaft. In der Energie ist grundsätzlich eine deutliche Verbesserung der Effizienz bei kompakter Bauweise möglich und es werden neue Anwendungen wie der Strombegrenzer und der magnetische Energiespeicher erst ermöglicht.

Die Leitlinie für die zukünftige FuE-Förderung sollte die Beschleunigung der Anwendungsentwicklung und das Erschließen neuer Anwendungsfelder sein. Dabei fließen folgende Kernthemen ein, auf die weitergehend detailliert eingegangen wird.

1. Leitereigenschaften und Leiterfertigung
2. Technologieentwicklung

3. Anwendungsentwicklung
4. Demonstration von HTS-Anwendungen

Durch diese thematische Gliederung werden alle relevanten Forschungsaspekte von der Material- bis hin zur Systemintegration betrachtet. Die Bandbreite der Anwendungen ist hier noch nicht eingeschränkt, fokussiert sich aber auf energietechnische Anwendungen und Beiträge zur Erhöhung der Energieeffizienz. Aufgrund der sehr dynamischen Entwicklung der Leitereigenschaften und des unterschiedlichen Entwicklungsstandes der verschiedenen Anwendungen wird eine Priorisierung und Einteilung in kurz-, mittel- und langfristige Entwicklungsziele hiermit noch nicht vorgenommen.

1. Leitereigenschaften und Leiterfertigung

Die Erschließung von Anwendungen der Supraleitung erfordert eine weitere Verbesserung der Leitereigenschaften und eine industrielle Fertigung der Hochtemperatur-Supraleiter. Wesentliche Leitereigenschaften sind das Preis-Leistungsverhältnis, kritische Stromdichten im Eigenfeld oder im externen Magnetfeld, die Wechselstromverluste und die Leiterhomogenität entlang einer benötigten Einzelbandlänge. Hierbei ist zu beachten, dass einzelne Anwendungen sehr oft eine spezifische Leitereigenschaft erfordern, wie z. B. ein höheres Spannungskriterium für Strombegrenzer oder eine höhere kritische Stromdichte im Magnetfeld für rotierende Maschinen. Die Anpassung der Bandleitereigenschaften auf die jeweiligen Anwendungsanforderungen beinhaltet das Nachjustieren des Herstellungsprozesses, was unter anderem das Hinzufügen zusätzlicher Fertigungsschritte bedeuten kann. Zur Hochskalierung einer qualitativ hochwertigen Leiterfertigung ist eine Entwicklung und Integration von spezialisierten In-situ Prozess- und Qualitätskontrollen bei der Herstellung erforderlich. Aufbauend auf den industriell gefertigten Hochtemperatur-Supraleitern sind einfache und stabile Leiterkonzepte für die jeweilige Anwendung zu entwickeln. Um Supraleiter für die weitere industrielle Nutzung handhabbar zu

THEMEN

1. Leitereigenschaften und Leiterfertigung
2. Technologieentwicklung
3. Anwendungsentwicklung
4. Demonstration von HTS-Anwendungen

machen, ist eine Standardisierung und Überführung in eine geeignete Normierung durch die DKE notwendig.

2. Technologieentwicklung

Der Hochtemperatur-Supraleiter benötigt für die jeweilige Anwendung eine angepasste elektrische Isolation bei tiefen Temperaturen, eine verlustarme und robuste Kontakttechnologie sowie eine angepasste Wickel- und Vergusstechnologie für große Komponenten. Wie die erfolgreiche Entwicklung erster Demonstratoren und Prototypen zeigt, sind, aufbauend auf den grundlegenden Leitereigenschaften, spezielle Lösungen für die jeweilige Anwendung zu entwickeln.

Eine wesentliche Komponente supraleitender Anwendungen stellt das Kühlsystem dar. Obwohl Kühlsysteme verschiedener Art und Größe kommerziell verfügbar sind, ergibt sich eine große Auswirkung, wenn wichtige Eigenschaften weiter verbessert und neue Systeme entwickelt werden können. Dazu gehören unter anderem die Minimierung der Kryostatverluste, die Erhöhung des Wirkungsgrades, die Verringerung des Wartungsaufwands und die Entwicklung energieeffizienter und kostengünstiger Kälteanlagen. Demonstratoren, Pilotanlagen und der Aufbau einmaliger Infrastrukturen zur Kühlung von Prototypenanwendung leisten dabei einen wichtigen Beitrag zur Beschleunigung der Anwendungsentwicklung.

3. Anwendungsentwicklung

Bisher sind für eine Vielzahl von Anwendungen der Supraleitung erste Demonstratoren erfolgreich entwickelt und getestet worden. Für supraleitende Mittelspannungskabel und -strombegrenzer liegen für erste Prototypen längere Betriebserfahrungen im Netz vor. Die Entwicklung der Einsatzbereiche der Hochtemperatur-Supraleiter sollte sich deshalb zunächst konzentrieren auf die Entwicklung neuer vielversprechender Anwendungen oder Anwendungen mit deutlich verbesserten Eigenschaften. Dies umfasst zum Beispiel die energietechnischen Anwendungen für Generatoren, Transformatoren, Kabel und Strombegrenzer ebenso wie rotierende Maschinen für Flugzeuge oder mobile Anwendungen für Massivsupraleiter.

Synergien zu anderen Anwendungen im kryogenen Bereich wie z. B. der Leistungselektronik oder der Schalt- und Schutzgerätetechnik sollten erforscht werden, damit komplette Systeme betrachtet werden können und nicht nur einzelne Komponenten.

4. Demonstration von HTS-Anwendungen

Anwendungen in der Energietechnik besitzen üblicherweise eine sehr lange Lebenszeit von mehr als 20 Jahren und die Markterschließung mit neuen Technologien erfolgt in der Regel über die langjährige Demonstration wichtiger Betriebseigenschaften, wie z. B. die Zuverlässigkeit.

Deshalb erfordert die Beschleunigung des Einsatzes supraleitender Anwendungen eine umfassende Feld- und Nutzererfahrung, um die herausragenden Möglichkeiten und die Anwendungsreife zu demonstrieren. Weiterhin dienen Demonstrationsvorhaben dazu, Schwachstellen zu identifizieren und zukünftigen FuE-Bedarf abzuleiten.

Der Fokus zukünftiger Entwicklung wird dabei auf die Umsetzung weiterer Demonstratoren zur Schaffung von Betriebserfahrungen, das Schließen der Lücken zwischen Demonstrator und Prototypenanwendung (> TRL6), das Weiterverwenden der Demonstratoren nach Projektende und den Betrieb nach der Projektlaufzeit gelegt. Hierbei sollten für den Endanwender Anreize für den Einsatz neuer Technologien geschaffen werden.

EISEN UND STAHL BEITRÄGE AUS DEM FORSCHUNGSFELD



■ MOTIVATION

Konzeptionelles Vorgehen im Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe mit dem Schwerpunkt Forschungsfeld Eisen und Stahl

Die Förderstruktur der Forschungsfelder Energie ist so ausgelegt, dass eine gezielte Forschung ermöglicht wird, indem die Struktur:

- für Schlüsselthemen von übergeordneter Bedeutung eine schlagkräftige Forschung durch Konzentration der Maßnahmen erlaubt,
- durch Langfristorientierung und Verlässlichkeit ein konzeptionelles Vorgehen in der Forschung und der Forschungsförderung unterstützt und
- gleichzeitig flexibel reagieren kann und für innovative Einzelthemen jederzeit auch eine kurzfristige Berücksichtigung ermöglicht.

Im Forschungsfeld Eisen und Stahl werden diese Forschungsstrukturen seitens des BMWi unterstützt.

Um den Austausch innerhalb des Forschungsfeldes effektiv zu gestalten und auch die Schlüsselthemen zu identifizieren sowie das konzeptionelle Vorgehen zu erhalten, wurde Dr.-Ing. Peter Dahlmann, geschäftsführendes Vorstandsmitglied des Stahlinstitutes VDEh, als Kurator benannt.

Bei einem gemeinsamen Workshop mit dem BMWi und PTJ sowie den Mitgliedsunternehmen des Stahlinstitutes VDEh im Oktober 2016 wurde angeregt, dass Statuspapiere erarbeitet werden, welche den aktuellen Stand der Technik und die Ausrichtung der kommenden Forschungsaktivitäten identifizieren sollen. Als Themengebiete wurden in der Diskussion herausgearbeitet:

1. Eisenerzreduktion mit Wasserstoff
2. inkrementelle Effizienzsteigerung
3. Flexibilisierung der Produktion
4. weitere Forschungsansätze zur Emissionsminderung und zu Effizienzpotenzialen in der Produktion, sowie durch energieeffiziente Produkte

Neben den genannten Inhalten muss es dabei Ziel sein, neben langfristigen Projekten auch kleinere Studien (z. B. Meta-Studien) mit geringerem Fördervolumen in kurzen Zeiträumen (unter einem Jahr) durchführen zu können.

Zudem würde es das Forschungsfeld Eisen und Stahl begrüßen, wenn die Möglichkeit zu Leuchtturmprojekten (Großprojekte mit wenig Partnern sowie hohen Fördersummen und Eigenleistungen der Industriepartner) bestehen würde, die eine Signalwirkung für mögliche Folgeprojekte ausüben.

1. Eisenerzreduktion mit Wasserstoff

Die Eisenerzreduktion findet in Deutschland mit Kohlenstoffmonoxid unter Einsatz von Koks und kohlenstoffhaltigen Ersatzreduktionsmitteln nahezu ausschließlich im Hochofenverfahren statt. Zudem werden in einer kleineren Direktreduktion-Schachtofenanlage Eisenerze mit Erdgas reduziert. Solche Direktreduktionsanlagen sind heute weltweit großindustriell in der Anwendung.

Zum Erreichen der Klimaschutzziele können Direktreduktionsanlagen voraussichtlich auch mit hohen Anteilen Wasserstoff anstelle von Erdgas betrieben werden. Dies wird weltweit industriell jedoch noch nicht durchgeführt. Die Voraussetzung für eine entsprechende Anwendung von Wasserstoff zur CO₂-armen Stahlerzeugung ist die elektrolytische Wasserstoffproduktion mit Strom aus regenerativen Quellen sowie die Wasserstoffspeicherung und die Wasserstoffverteilung. Die den Direktreduktionsanlagen nachzuschaltenden Elektro-

THEMEN

1. Eisenreduktion mit Wasserstoff
2. Inkrementelle Effizienzsteigerungen entlang der Prozesskette der Stahlherstellung
3. Flexibilisierung der Produktion
4. Weitere Forschungsansätze zur Emissionsminderung und Effizienzpotenzialen in der Produktion sowie durch energieeffiziente Produkte

lichtbogenöfen müssten ebenfalls mit regenerativem Strom versorgt werden.

Für die erforderliche Weiterentwicklung der Direktreduktionstechnologie hin zu einem gesteigerten Einsatz von Wasserstoff sind Forschungsvorhaben notwendig, z. B. um die Kinetik der Reduktion von Eisenerzen mit Wasserstoff in entsprechenden Schachtofen zu ermitteln. Dazu zählen die Auswirkungen des bei der Reduktion gebildeten Wasserdampfes auf die Reduktionsvorgänge im Prozess, insbesondere bei kürzeren Verweilzeiten, sowie die Reduktionskinetik und Thermodynamik der Reduktion von Eisenerzen mit Wasserstoff bei Temperaturen von über 700 °C.

Aktueller Stand Technical Readiness Level (TRL): 3-5
Ziel TRL: 5-8

Projektvolumen: Mehrere aufeinander aufbauende kleinere Projekte von Grundlagenuntersuchungen bis hin zum Upscaling

Forschungsbudget: gesamt 20 Mio. €

2. Inkrementelle Effizienzsteigerungen entlang der Prozesskette der Stahlherstellung

Die Stahlindustrie in Deutschland hat in den letzten Jahren bereits eine erhebliche Minderung der CO₂-Emissionen und Steigerung der Energieeffizienz erreicht. Dieser Erfolg basiert im Wesentlichen auf der Weiterentwicklung und Optimierung der aktuellen Produktionsverfahren sowie auf einer Steigerung der Rohstoff- und Energieeffizienz. Doch zeigen die aktuellen Entwicklungen der spezifischen CO₂-Emissionen und Energieeffizienzkennzahlen eine Stagnation der Kennlinien auf Basis der stetigen Optimierung der vorhandenen Anlagenbasis. Inkrementelle Effizienzsteigerungen beschreiben Technologien, welche aktuell nicht oder nur in Ausnahmefällen in der Stahlindustrie in Deutschland integriert sind. Dies hat sowohl technische, organisatorische, ordnungsrechtliche aber zu meist wirtschaftliche Gründe.

Ziel ist die Implementierung (Technology Rollout, Carbon Lock-in) inkrementeller Technologien in Deutschland. Hierzu gehört hauptsächlich die Ent-

wicklung von Methoden und Verfahren, die die Implementierung inkrementeller Technologien im Rahmen der Energiewende wirtschaftlicher darstellt. Dies wird einerseits durch die Weiterentwicklung des Standes der Technik (Verringerung der Investitionskosten CAPEX) erreicht, andererseits durch die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle für eine wirtschaftliche und sinnvolle Darstellung der Betriebskosten (OPEX). Notwendige Forschungsarbeiten sind zudem die Überwindung organisatorischer Hemmnisse, wie die Optimierung und Erweiterung des Anlagenverbunds sowie die Redundanz bei Teilstillständen. Hinzukommen notwendige systemische Betrachtungen auf die Energie- und Rohstoffversorgungssysteme der Zukunft, insbesondere bei den Themen Recycling von Stahlschrotten und anderen möglichen Kreislaufstoffen.

Aktueller Stand TRL: 4-7

Ziel TRL: 5-8 (Demonstration von anwendungsreifen Lösungen)

Projektvolumen: Mehrere parallele Projekte
Forschungsbudget: 20 Mio. €.

3. Flexibilisierung der Produktion

Der steigende Anteil aus regenerativen Energien in der Energieversorgung bietet Chancen für die Industrie hinsichtlich der Senkung der CO₂-Emissionen. Die stark fluktuierenden erneuerbaren Energien führen zu neuen Herausforderungen und Chancen bei der Energienutzung in Industrieprozessen, insbesondere bezüglich elektrischer Energie.

Die Stahlindustrie betreibt heute sehr effiziente, kontinuierlich oder im Batchbetrieb arbeitende Hochtemperaturprozesse. Die Effizienz der Prozesskette zur Herstellung von Stahl wird in hohem Maße von der optimalen Steuerung des Energieeinsatzes beeinflusst.

Zur Erhöhung der Flexibilität bei der Nutzung von Energieträgern müssen daher neue Prozessführungs- und Automatisierungskonzepte sowie eine Verbesserung der Informations- und Kommunikationsstruktur zum Energiemanagement geschaffen werden. Gleichzeitig gilt es, neue Energieumwandlungsanlagen zu entwickeln, um auf die Herausforderungen des

flexiblen Energieeinsatzes mit einem kurzfristigen Ansprechverhalten bei Energieträgerwechsel robust reagieren zu können.

Aktueller Stand TRL: 4-7

Ziel TRL: 5-8 (Demonstration von anwendungsreifen Lösungen)

Projektvolumen: Mehrere parallele Projekte

Forschungsbudget: 20 Mio. €

Es besteht eine enge thematische Verknüpfung zum Thema Eisenerzreduktion mit Wasserstoff (1), da die Erzeugung von Wasserstoff aus regenerativen Energien zur Flexibilisierung der Energienutzung in Industrieprozessen aber auch direkt zur CO₂-Vermeidung genutzt werden kann.

4. Weitere Forschungsansätze zur Emissionsminderung und zu Effizienzpotenzialen in der Produktion sowie durch energieeffiziente Produkte

An die Verfahren zur Aufbereitung der Prozessgase - werden vom jeweils gewählten Verwertungsverfahren spezifische Anforderungen hinsichtlich des Restgehaltes an Störkomponenten sowie der Zusammensetzung der Hauptkomponenten CO₂, CO und H₂ gestellt. Die gängigen Verfahren der Gasreinigung und Gasseparation sind hierfür grundsätzlich geeignet, müssen jedoch an die jeweiligen Anforderungen individuell angepasst werden. Hierbei ist wesentlich, dass die Verfahren mit geringem Energieeinsatz und geringen zusätzlichen Emissionen kostengünstig zu betreiben sind. Forschungsbedarf besteht z. B. bei der Weiterentwicklung von Adsorbentien, Waschlösungen und Membranen. In Abhängigkeit vom Entwicklungsstand sind Arbeiten im Labor- und Technikmaßstab sowie Untersuchungen unter realen Prozessgasbedingungen im Rahmen von Demonstrationsprojekten erforderlich.

Aktueller Stand TRL: 3-6

Ziel TRL: 4-7

Projektvolumen: Mehrere aufeinander aufbauende kleinere Projekte von Grundlagenuntersuchungen bis hin zum Demonstrationsvorhaben

Forschungsbudget: 10 Mio. €

Additive Manufacturing ist ein Verfahren zur schnellen und kostengünstigen Fertigung z. B. von Modellen und Endprodukten. Metallische und andere funktionelle Schichten werden direkt strukturiert und schichtübergreifend integriert. Die Herstellung dreidimensionaler Bauteile aus klassischen Werkstoffen, wie z. B. Metallen,

Hochtemperatur-Materialien oder auch faserverstärkten Materialien wird ermöglicht. Durch die Kombination von innovativen Werkstoffen und 3D-Druck eröffnen sich vielfältige Möglichkeiten in der Forschung zur Entwicklung neuer Produkte. Durch die Anwendung keramischer 3D-Druck-Bauteile können Thermoprozessanlagen energetisch besser ausgelegt werden. Des Weiteren erhöht sich die Wirtschaftlichkeit mit steigender Komplexität der Bauteilgeometrie.

Klassischerweise wird das Pulver zum 3D-Druck heute auf Basis von Drahterzeugnissen hergestellt. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist, die Pulver energetisch günstiger direkt aus der Schmelze zu erzeugen.

Aktueller Stand TRL: 3-5

Ziel TRL: 4-7

Projektvolumen: Mehrere aufeinander aufbauende kleinere Projekte von Grundlagenuntersuchungen bis hin zur Demonstration anwendungsreifer Lösungen

Forschungsbudget: 3-8 Mio. €

Auch die Themen Digitalisierung/Industrie 4.0 spielen eine zunehmende Rolle bei Fragen der Optimierung des Energieverbrauchs in der industriellen Produktion. Erweiterte Sensorik zur Erfassung der exakten und auf das Einzelprodukt bezogenen Energieverbräuche sowie die Möglichkeit der Verfolgung des kompletten Materialflusses entlang der Produktionskette, auch in der Prozessindustrie, eröffnen in Kombination mit der Ausprägung von Einzelanlagen als cyber-physische Produktionssysteme völlig neue Möglichkeiten. Hierzu gehört die Ermittlung der Gründe von Energiebedarfschwankungen ebenso wie die schnelle Reaktion auf sich ändernde Bedingungen auf den Energiemärkten durch dynamische Last- und -abschaltung.

Ein besonderes Augenmerk liegt zukünftig auch auf der energetischen Optimierung ganzer Produktionsketten durch geeignete Wiederverwendung von Energieströmen (z. B. Abwärme) an anderer Stelle der Produktion. Hierbei ist eine intensive Kommunikation und Koordination erforderlich, die neue Lösungen im Bereich der Digitalisierung voraussetzt.

Aktueller Stand TRL: 3-5

Ziel TRL: 5-7

Projektvolumen: Mehrere parallele Projekte

Forschungsbudget: 15 Mio. €

Leichtbau ist eine wesentliche Voraussetzung für nachhaltige und wettbewerbsfähige Produkte. Insbesondere bei Fahrzeugen oder Komponenten des

Maschinen- und Anlagenbaus ist er unverzichtbar, um Rohstoffe und Energie nicht nur während der Herstellung, sondern auch in der Nutzungsphase einzusparen.

Für die Stahlindustrie stellt Leichtbau ein wichtiges Themenfeld dar. Neue hochfeste oder dichterduzierte Stähle, stahlbasierte Verbundwerkstoffe und moderne Verarbeitungstechnologien wie die Warmumformung ermöglichen es, leichtere und energiesparende sowie ressourceneffiziente Produkte zu realisieren.

So können z. B. Kraftstoffverbräuche von LKWs gesenkt oder die Leistungsfähigkeit von Kraftwerken durch den Einsatz von Hochleistungsstählen erhöht werden.

Aktueller Stand TRL: 4-6

Ziel TRL: 5-7

Projektvolumen: Mehrere parallele Projekte

Forschungsbudget: 5 Mio. €

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ IN DER PRODUKTION

BEITRÄGE AU DEM WORKSHOP

■ KURZZUSAMMENFASSUNG

Wie lässt sich mithilfe Künstlicher Intelligenz (KI) künftig in der Produktion mehr Energie sparen? Das diskutierten Fachleute aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Verwaltung am 11. und 12. Oktober 2017 an der Universität Bremen. Die Wissenschaftler des Instituts für integrierte Produktentwicklung (BIK) und des BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik sehen hier große Potenziale. Im Rahmen des Forschungsprojektes „KI-unterstützte Plattform zur Assistenz von Produktionssteuerung zur Verbesserung der Energieeffizienz“ (KIPro) haben sie Experten aus ganz Deutschland zu einem gemeinsamen Austausch über dieses Zukunftsthema eingeladen.

Der Projektverbund KIPro läuft seit September 2015 und zählt zu den vom BMWi geförderten und im thematischen Verbund „Energieeffizienz durch KI-Technologien“ gebündelten Projekten. Der Workshop „Digitalisierung in der Produktion zur Steigerung der Energieeffizienz – Anwendung von KI“ an der Universität Bremen richtet sich an Akteure in diesem Themenverbund und hat zum Ziel, sich auszutauschen, die Entwicklung voranzutreiben und Weichen für künftige Forschungen auf diesem Gebiet zu stellen. Die Veranstaltung findet in Kooperation mit dem BMWi und PtJ statt. Ein wesentliches Ergebnis des Workshops ist die Erkenntnis der erstarkenden Wichtigkeit digitaler Themen in modernen und effizienten Produktions- und Fertigungsprozessen. Den vielschichtigen Teilgebieten des Überbegriffes „Digitalisierung“ kommt dabei in Kombination mit oft nicht erfüllten Anforderungen an die notwendige Datenakquise (Sensorik) eine Querschnittsbedeutung zu.

Diskurs und Impulse für nächstes Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

Während des Workshops wurden Forschungen im Themenverbund und aktuelle Entwicklungen vorgestellt sowie die Bedarfe der Industrie diskutiert. Der Fokus der Veranstaltung liegt auf den technischen Herausforderungen wie Datenhandling, Algorithmen und Auswertung sowie unter anderem auf den Fragen, wie gut Unternehmen auf den Einsatz von KI vorbereitet sind, was zur Umsetzung der KI in der Produktion erforderlich ist und bei welchen Produkten und Produktionsverfahren der Einsatz von KI Chancen bietet. Zudem ging es um Perspektiven. Erörtert wurden daher auch Trends und Themen, die im Rahmen der Forschungsnetzwerke Energie in das nächste Energieforschungsprogramm der Bundesregierung einfließen sollen.

Unter diesem Gesichtspunkt wurden vier Fragestellungen mit den Teilnehmern erarbeitet und diskutiert. Die erste Frage bezog sich auf das eigene Unternehmen und sollte klären, wie sich Unternehmen auf die neuen Herausforderungen vorbereiten und welche Erfahrungen sie bereits damit gesammelt haben. Dabei wurde das ganze Spektrum – angefangen beim Personal über die Maschinen, Prozesse und Daten bis hin zu den Kosten – in der Diskussion erörtert. Weitere Aspekte waren die geplanten und umgesetzten Ideen in diesem Bereich. Mit der zweiten Frage wurden die Chancen für KI in den eigenen Produkten und Produktionsverfahren abgeschätzt. Im Fokus dieser Diskussion stand der Mehrwert, den KI bietet, und welche Veränderungen dafür vorgenommen werden müssen. Gleichzeitig ging es um die Bereitschaft, diese auch umzusetzen. Was grundsätzlich zur Umsetzung von KI in der Produktion fehlt, wurde in einer weiteren Fragestellung erarbeitet. Der Schwerpunkt in diesem Bereich lag auf dem erforderlichen Know-how der Fachkräfte, den notwendigen Voraussetzungen und den einzusetzenden Sensoren. Die letzte Fragestellung beinhaltete das Datenhandling, die Algorithmen und die Auswertung. Neben der Übertragbarkeit der Lösungen wurden hier sicherheitstechnische sowie rechtliche Aspekte diskutiert.

THEMEN

1. Fragen | Diskussionen
2. Möglichkeiten für die Anwendung von KI in der Produktion

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz von Künstlicher Intelligenz in der Produktion ein Trend ist, wobei zurzeit nur wenige der Teilnehmer diese in der realen Anwendung nutzen. Viele Unternehmen versuchen aktuell, diese Techniken zu erproben und sich zu positionieren. Ein Hauptproblem sind die fehlenden Fachkräfte, denn ohne das notwendige Grundverständnis der Ansätze der eigenen Mitarbeiter ist eine Positionierung in diesem Bereich nicht möglich. Weiter wird anhand der Ergebnisse des Workshops erkennbar, dass jenseits aller weit fortgeschrittenen Grundlagenforschungsansätze gerade im Mittelstand noch ganz triviale Fragen und Vorbehalte bestehen, die zukünftig in einer Forschungsförderung mitberücksichtigt werden sollten.

■ 1. DISKUSSION

Der Teilnehmerkreis in der Diskussionen besteht aus Wissenschaft, Herstellern und Entwicklern von Systemen für Produktionsanlagen sowie den Anwendern, von denen sich ein Großteil an BMWi-geförderten Forschungsvorhaben beteiligt. Aus diesem Grund wurden zur Einführung der Diskussion die Sichtweise des BMWi, die geförderten Projekte KIPro, ENPro und ALSO 4.0 sowie neue innovative Sensorlösungen vorgestellt. Nach einer Gruppendiskussion wurden die Fragestellungen gemeinsam im Plenum diskutiert.

FRAGE 1.1:

Wie gut ist mein Unternehmen auf den Einsatz von KI vorbereitet?

Insgesamt kann in allen Diskussionen einheitlich unter allen Teilnehmern festgestellt werden, dass Methoden der Künstlichen Intelligenz in Zukunft eine wesentliche Rolle in der Produktion spielen werden. Wichtig für alle Unternehmen ist dabei die rechtzeitige Vorbereitung auf die neuen Herausforderungen. Entsprechend beurteilen alle das Potenzial für die Einsatzmöglichkeiten von KI als sehr hoch. Die Frage nach dem aktuellen Sachstand der einzelnen Unternehmen in dieser Thematik wird hingegen durchweg als schlecht beurteilt. Auch in dieser Einschätzung kommen die unterschiedlichen Gruppen aus den Bereichen Wissenschaft, Entwicklung und Anwendung zur gleichen Beurteilung.

Die Gründe für die Beurteilung der Situation sind sehr vielschichtig. Bereits bei der Definition des Begriffes KI zeigen sich die unterschiedlichsten Sichtweisen. Beispielsweise wird der Begriff KI einmal eng gefasst als Synonym für Maschinelles Lernen benutzt, beinhaltet aber in anderem Zusammenhang noch viele weitere Bereiche der Digitalisierung. Aus der Perspektive der Wissenschaftler, die die Methoden des Maschinellen Lernens in der Produktion anwenden möchten, ist diese weite Sichtweise nachvollziehbar. Denn ohne die digitalisierte Erfassung des Inputs, der Prozessdaten und des Outputs können diese Ansätze nicht erprobt werden. In vielen Fällen sind grundlegende Digitalisierungsprozesse in den Unternehmen vorhanden, Art und Auswahl der Datenerfassung jedoch nur unzureichend für den Einsatz von KI.

Aus Sicht der industriellen Anwendung schreckt der Begriff KI durch diese weite Fassung jedoch viele Anwender ab. Es wäre daher sinnvoller die einzelnen Aufgaben in kleine überschaubare Bereiche – wie Datenerfassung, Datenanalyse, Datenauswertung und Maschinelles Lernen – zu unterteilen. So könnten das Verständnis bei allen Beteiligten gefördert und bestehende Vorurteile abgebaut werden.

„Wir müssen den Begriff schärfen, um die Industrie und besonders KMU nicht abzuschrecken.“

Neben der Definition des Begriffes selbst ist aber auch die Einschätzung des Nutzens ein schwieriges Thema. Obwohl es viele Ideen gibt, ist hier die Darstellung konkreter, nachvollziehbarer und umgesetzter Anwendungen notwendig. Besonders der Schritt von der Idee zu einer realen Umsetzung ist für den Anwender noch eine große Herausforderung. Vielen Unternehmen fällt es schwer, den richtigen Ansatz für ihren Anwendungsfall auszuwählen und damit die eigene Aufgabenstellung umzusetzen. Aus diesem Grund ist auch eine Abschätzung des wirtschaftlichen Erfolgs nicht qualifiziert möglich. Alle Beteiligten der Diskussion sind sich darüber einig, dass nur über klare und nachvollziehbare Anwendungsbeispiele die Hemmnisse überwunden und damit neue Anwendungsfelder erschlossen werden können.

Viele der bereits diskutierten Aspekte haben einen direkten Bezug zur personellen Aufstellung der Unternehmen. Alle Diskussionsteilnehmer sind sich einig: Es gibt zu wenig Fachpersonal, das in den Unternehmen sofort aktiv werden kann und das notwendige Know-how besitzt, um Fragestellungen rund um KI einzuschätzen. Jedoch ist die Entwicklung der eigenen Methodenkompetenz in den Unternehmen nicht die einzige Herausforderung. Wichtig ist auch, dass verschiedenste Tätigkeitsbereiche zusammengebracht und ein einheitliches Verständnis für die neuen Fragestellungen entwickelt werden. In diesem Zusammenhang ist es notwendig, Zeit für die Mitarbeiter zur Verfügung zu stellen, damit die Entwicklungen nicht im normalen Tagesgeschäft untergehen. Besonders kleine und mittlere Unternehmen stellt dieses vor eine große Herausforderung.

Weitere offene Fragestellungen liegen in den Bereichen Recht und Sicherheit. So ist es das Worst-Case-Szenario für die Anwender, dass Unternehmensdaten illegal durch andere Firmen genutzt oder Daten und Prozesse von außen manipuliert werden können. Auf der anderen Seite stellt sich den Entwicklern die Frage nach der Haftung, wenn es durch den Einsatz von KI zu Schäden bei Mensch, Maschine oder Produkt kommt. Diese Fragestellung muss jedoch stark in Bezug auf den Anwendungsfall differenziert werden. Beispielsweise ist ein Abweichen von der Spezifikation einer Mischfuttercharge hinsichtlich der Störfallschwere nicht vergleichbar mit schutzgutgefährdenden Fehlfunktionen an einer Produktionsanlage für z. B. Chemiegüter.

Ein anderer wichtiger Aspekt ist der Mitarbeiter selbst. Hier gibt es Vorbehalte der Mitarbeiter aufgrund der

Angst vor Arbeitsplatzverlust. Das Ziel muss sein, die Chancen der neuen Technologien aufzuzeigen, um so alle im Unternehmen in den Prozess der Einführung von KI mitzunehmen und die Ängste abzubauen.

„KI-Kompetenz in den Unternehmen muss erst noch aufgebaut werden.“

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Unternehmen wegen der unzureichenden Kenntnis in der industriellen Breite über die Chancen und Möglichkeiten des KI-Einsatzes und wegen der fehlenden personellen Ressourcen nicht gut vorbereitet sind. Die Forschung zu KI muss dabei helfen, die bestehenden Möglichkeiten aufzuzeigen. Daher ist die Frage nach dem Vorbereitungsstand zum aktuellen Zeitpunkt nicht klar zu beantworten, auch wenn viele neue innovative Ideen diskutiert wurden.

FRAGE 1.2:

Bei welchen Ihrer Produkte/Produktionsverfahren bietet der Einsatz von KI Chancen?

Neben der Einschätzung der Aufstellung des Unternehmens stellt sich die Frage nach den eigenen Ideen für den Einsatz von KI in der Produktion. Ohne die klare Vision, ein unternehmerisches Ziel mit KI erreichen zu können, wird sich das Unternehmen auch nicht mit dieser Thematik beschäftigen.

Die Vielfalt der Visionen des Teilnehmerkreises spiegelt sich in der Breite der Ideen wieder, welche im Workshop diskutiert wurden. Alle haben eigene Vorstellungen davon, wie sie KI in der industriellen Anwendung einsetzen möchten. Im Abschnitt „Möglichkeiten für die Anwendung von KI in der Produktion“ sind diese zusammengestellt. Die Chancen werden dabei in Abhängigkeit von der Komplexität des Prozesses und der Fragestellung gesehen.

Der nächste Schritt zur Umsetzung scheitert häufig jedoch an dem nur teilweise vorhandenen notwendigen Know-how über die Methoden des Maschinellen Lernens und in bestimmten betrieblichen Bereichen auch an fehlender Akzeptanz.

„Wir haben eine Vision für den Einsatz von KI in der Produktion, kennen aber die Methoden noch nicht“

So sind es besonders die Black-Box-Ansätze (z. B. Künstliche Neuronale Netze), welche sehr kontrovers gesehen werden. Die Bedenken gehen von der fehlenden Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen bis hin zu der Angst des Mitarbeiters vor dem Verlust des Verständnisses der Zusammenhänge im Prozess. Durch den Aufbau von Know-how und ein größeres individuelles Verständnis über die Methoden könnten Vorbehalte abgebaut werden. Zusätzlich sind hier auch neue Lösungen gefragt, die dieser Problematik Rechnung tragen. Denn in allen Diskussion wird erkennbar, dass der gut qualifizierte und motivierte Mitarbeiter eine wichtige Position in den Unternehmen einnimmt. Dieser soll sich möglichst mit seinem Prozess identifizieren und ihn auch eigenständig bedienen können, denn beispielsweise ist in Sondersituationen wie dem Fehlerfall diese Mitarbeiterexpertise für Unternehmen entscheidend.

„Wir wollen unsere Mitarbeiter durch KI unterstützen, deren Expertise ist für uns entscheidend.“

Aus der weiteren Diskussion ergibt sich damit die Notwendigkeit, auch weitere Wissenschaftsfelder der

Akzeptanzforschung und der Technikfolgenabschätzung mit einzubeziehen. Hier sind nicht nur technologische Fragestellungen zu beantworten.

Als Ergebnis der Diskussion kann man das Ziel ableiten, über die bisher beteiligten Branchen hinaus nach weiteren Anwendungsfeldern zu suchen und konkrete Beispiele zusammenzutragen. Denn neben der Akzeptanzproblematik ist die transparente und konkrete Darstellbarkeit des Mehrwertes von KI in der Produktion noch problematisch und schwierig.

FRAGE 1.3:

Was fehlt grundsätzlich zur Umsetzung der KI in der Produktion?

Eine Grundvoraussetzung für den Einsatz von KI in der Produktion sind die Visionen einer hochwertigeren betrieblichen Zukunft. Diese sind wie beschrieben bei allen vorhanden. Warum wird jedoch KI dann noch nicht flächendeckend eingesetzt? In einer weiteren Diskussion wurden die Hemmnisse bei der Umsetzung der Ideen diskutiert.

Als zentraler Punkt stellt sich immer wieder die personelle Aufstellung der Unternehmen heraus. Hier besteht ein großer Handlungsbedarf, Know-how in den unterschiedlichsten Bereichen aufzubauen. Auch wenn Unternehmen Methoden der Künstlichen Intelligenz oder Anwendungen nicht selbst entwickeln – besonders KMU sind in der Regel gezwungen, Aufgabenbereiche jenseits ihrer Kernkompetenz in einen Auftrag an spezialisierte Unternehmen zu vergeben –, ist ein Basiswissen die Grundvoraussetzung, um Ideen in diesem Bereich im eigenen Unternehmen entstehen zu lassen und weiterzuentwickeln.

„Konfigurierbare Apps zur Datenanalyse – ohne dass Daten Dritten zur Verfügung gestellt werden müssen“

In der Regel ist Know-how im Bereich der Digitalisierung und Elektrotechnik durch die verschiedensten Ausbildungsberufe bereits vorhanden. Die Zusammenführung dieser Aufgabenstellungen und das spezielle Wissen im Bereich maschinellen Lernens werden jedoch heutzutage in den Ausbildungen noch nicht ausreichend abgedeckt. Auch in der universitären Ausbildung wäre es wünschenswert, eine enge Verknüpfung von Ingenieurwissenschaften, Informatik und Mathematik herzustellen. Aus Sicht der Wissenschaft wäre dies eine Möglichkeit, aktuelle Forschungsergebnisse der Mathematik und der Informatik schnellstmöglich in die Industrie zu transferieren. Durch die Etablierung neuer Studiengänge wird dieser Forderung zum Teil schon Rechnung getragen. Es wird aber noch Zeit beansprucht, bis dieses Know-how in der Industrie flächendeckend ankommt. Zusätzlich müssen neue Möglichkeiten geschaffen werden, dieses Wissen und die Kompetenz gerade auch in kleineren Unternehmen zuverlässig und dauerhaft verfügbar zu machen. Nicht in jedem Unternehmen besteht die Notwendigkeit, beispielsweise eine komplette Stelle in diesem Bereich aufzubauen.

Verständnis und Know-how von KI-Ansätzen sind eine wichtige Voraussetzung. Auf der anderen Seite müssen auch Daten der Rohstoffe, des Prozesses und des fertigen Produktes gemessen, erfasst und bewertet werden. Dieser digitale Schatten muss vollständig automatisierbar erstellt werden können. Je nach Prozess fallen hierbei große Mengen und zum Teil fehlerbehaftete Daten an. Diese müssen effizient gespeichert, verarbeitet und analysiert werden. Zusätzlich ist für die Datenaufnahme eine elementare Voraussetzung, dass hierfür geeignete Sensoren die notwendigen Daten liefern können. Aus technologischer Sicht besteht hier noch ein großer Bedarf an innovativen Lösungen. Neben neuen Prinzipien zur Messung von bislang unberücksichtigten Eigenschaften spielen Kosten und Größe der Sensorik eine entscheidende Rolle. Nur wenn Sensorik kostengünstig in den Produktionsprozess integriert werden kann, wird sich auch KI weiterentwickeln.

Neben den technologischen sind methodische Aspekte zu unterstützen. So fehlt es allen Teilnehmern zurzeit noch an geeigneten Ansätzen für eine „KI-gerechte“ Prozessaufnahme. Entsprechend müssen neue Ansätze entwickelt werden, mit deren Hilfe es möglich ist, beispielsweise festzustellen welche Daten in welcher Menge notwendig sind.

„Wir müssen dafür sorgen, gute Sensorik zu einem günstigen Preis anbieten zu können, da die Datenerfassung die Basis für alle weitere Datenverarbeitung darstellt.“

Über alle Aufgaben hinweg ist auch erkennbar, dass die Komplexität der Aufgaben insgesamt zu groß ist, um in Einzelmaßnahmen individuelle Lösungen zu entwickeln. Es sind starke, interdisziplinäre Teams erforderlich, um sinnvolle und nachhaltige Lösungen zu schaffen. Entsprechend müssen Branchen innerhalb ihrer Domäne zusammenarbeiten und sich zusätzlich mit anderen Anwendungsfeldern austauschen. Beispielsweise wäre es sehr förderlich, für bestimmte Bereiche Standards zu schaffen, damit entwickelte Module mehrfach eingesetzt werden können. Zwar zeichnen sich Standardisierungslösungen heute an verschiedenen Stellen ab, sind aber noch weit von einer gemeinschaftlichen Sichtweise entfernt. Beispielsweise setzen Großunternehmen aus verschiedenen Gründen noch immer sehr stark auf native Strukturen. In den Diskussionen wurde daher die Frage gestellt, ob mittelständische Unternehmen sich zusammenschließen und einen eigenen Weg beschreiten könnten.

In diesem Zusammenhang müssen auch neue Konzepte für die Einbindung von heterogenen Systemen entwickelt werden. Nicht jeder kann und wird seine Systeme und Anlagen durch Neuanschaffung oder Aufrüstung zu einem fixen Zeitpunkt komplett umstellen. Bei diesen Überlegungen muss aber berücksichtigt werden, dass KI-Systeme unter Umständen nicht in Produktionsstätten mit Maschinen unterschiedlichen technologischen Alters implementierbar sind. Auf der anderen Seite werden in Deutschland auch viele innovative und neue Systeme eingesetzt, bei dem sich wiederum die Hersteller der Systeme gegen die Datenfreigabe sperren und damit den Entwicklungsprozess behindern. An dieser Stelle muss die Datenhoheit über die eigenen Daten wiederhergestellt werden.

„Standardisierung hat großen Einfluss auf den künftigen Erfolg bei der Einführung der KI in der Produktion.“

Diese Veränderungen der Möglichkeiten bedeutet aber auch die Bereitschaft, sich auf neue Chancen einzulassen. In der Abfall- und Recyclingwirtschaft von Lösungsmitteln wäre es beispielsweise wünschenswert, dass sich die Chemische Industrie mit dem Thema "schwankender Ausgangsstoff-Qualitäten" auseinandersetzt (Vermeidung von Lösungsmittelverbrennung), um so einer echten Kreislaufwirtschaft näherzukommen.

FRAGE 1.4:

Datenhandling, Algorithmen und Auswertung – Problem oder Herausforderung?

Hier liegt eine starke Verunsicherung vor. Viele der Teilnehmer sind sich der Wichtigkeit sehr bewusst, haben aber noch keinen Zugang zur inhaltlichen Komplexität der Materie. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ohne ein Grundwissen und eine konkret formulierte Aufgabenstellung die Positionierung und ein finanzielles Engagement des Unternehmens in diesem Themenfeld sehr unwahrscheinlich ist. Hier wird gerade von den KMU Unterstützung gewünscht, um sich auf die neuen Herausforderungen einzustellen.

„KI ist aktuell ein Hype. Wir werden uns an Datenanalyse für unternehmerischen Erfolg gewöhnen.“

Bezogen auf die eigentliche Fragestellung der Diskussion stehen allgemeine und unspezifische Punkte im Vordergrund, die nicht konkret für die einzelnen Unternehmen beantwortet werden können:

- Welche Daten brauche ich für einen bestimmten Mehrwert?
- Wie sammle ich meine Daten und wie archiviere ich diese?
- Wo und wie ist die Systemarchitektur?
- Wo sind die Server, wo laufen die Algorithmen?
- Wie wird deren Evolution sein/sein können?
- Was wird hier eröffnet oder zugelassen?
- Wie groß ist der künftige Aufwand im Umgang mit Datenmengen, die gesammelt werden und vorgehalten bzw. gespeichert werden müssen?
- Wie weit wird die Verantwortung für Entscheidungen vom Menschen auf die Maschine übertragen?
- Was passiert im Fehlerfall bzw. bei unvorhergesehenen Ereignissen/Zuständen?
- Wie robust ist das System gegen interne Fehlfunktion oder externe Sabotage?

Insgesamt stellt sich in den Diskussionen immer die Frage nach den Kosten und wer sich um die Pflege,

Wartung und Weiterentwicklung kümmern soll. Auch hier sehen sich besonders KMU noch überfordert.

Aus allgemeiner Sicht muss in der Industrie noch viel Aufklärungsarbeit in Hinsicht auf die eingesetzten Methoden und den damit verbunden notwendigen Rahmenbedingungen geleistet werden. Häufig ist beispielsweise schwer zu vermitteln, warum in einigen Fällen große Datenmengen aufgezeichnet werden müssen. Daten sind aber die Grundlage dafür, bestimmte Methoden einzusetzen und unbekannte Zusammenhänge zu identifizieren.

„Wie erhalte ich meine Datensouveränität?“

In anderen Bereichen der Digitalisierung ist der Standpunkt klar ausformuliert. Beispielsweise spielt die Datensouveränität bei allen Beteiligten eine zentrale Rolle. Entsprechend können sich zurzeit nur wenige ein Cloudcomputing außerhalb des eigenen Firmennetzwerkes vorstellen. Neben der Angst vor Datenespionage sind sie getrieben von der Sorge, dass von außen unerwartet in einen Regelkreis eingegriffen wird. Für bestimmte Branchen ist das aufgrund von notwendigen Zertifizierungen auch ein absolutes Ausschlusskriterium für eine neue Technologie. Diejenigen, die sich eine Cloudlösung für ihre Firma vorstellen können, legen Wert auf Serverstandorte in Deutschland und den Betrieb und die Verwaltung des Servers durch eine nationale Organisation. Diskutiert wurden die Möglichkeiten der Anonymisierung der Daten in Bereichen, wo sehr große Datenmengen über große Regionen/Kollektive zum Einsatz kommen sollen. Dies trifft beispielsweise für Ferndiagnosen und zentrale Prozessdatenauswertungen verschiedener betrieblicher Standorte zu.

Aus Sicht der Unternehmen sollten die weiteren Entwicklungen erst einmal lokal erfolgen, betrieben und gefördert werden.

■ 2. MÖGLICHKEITEN FÜR DIE ANWENDUNG VON KI IN DER PRODUKTION

Im Rahmen der Veranstaltung und der anschließenden Diskussion wurden eine Vielzahl von möglichen Anwendungsfällen zur Nutzung von Methoden der Künstlichen Intelligenz in der Produktion diskutiert. Die folgende Liste fasst die Ideen aus dem Auditorium des Workshops aus den unterschiedlichen Blickwinkeln von Wissenschaft, Entwicklern/Herstellern und Anwendern zusammen. Sie hat damit exemplarischen Charakter und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.1 Prozessregelung

In komplexen Prozessen besteht häufig der Bedarf, Prozessparameter in Abhängigkeit von veränderlichen Randbedingungen während der Laufzeit zu regeln, um einen konstanten Output sicherzustellen. Methoden der KI können die Aufgabe übernehmen.

Unterstützung bei Dosiervorgängen im Biogasbereich

PROBLEM:
Änderung der Dosierung bei Hinzunahme von Ersatzkomponenten führt zu Schwankungen in der Produktzusammensetzung.

LÖSUNG:
Die KI kann über Kennwerte (z. B. Energiegehalt, TS-Gehalt) bei Ausfall einer Dosierkomponente einen adäquaten Ersatz berechnen und die Qualität konstant halten.

Unterstützung bei Regelaufgaben in Membran-Gasaufbereitungsanlagen.

PROBLEM:
Das Biomethan soll mit möglichst geringem Energieaufwand definierte Qualitäten erreichen. Diese Anforderung kann durch mehrere „Stellschrauben“, die abhängig voneinander sind, erreicht werden.

LÖSUNG:
Die KI kann die Wechselwirkungen errechnen und so eine energieoptimierte Fahrweise vorgeben.

Unterstützung bei Extrusion

PROBLEM:
Die Qualität des Extruder-Output hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab (z. B. Rieselfähigkeit der Rezepturbestandteile, Schneckenkonfiguration, Temperaturen der einzelnen Schneckenbereiche, Drücke am Werkzeug usw.)

LÖSUNG:
Die KI kann eine Vielzahl von Prozessparametern erfassen und in Echtzeit Änderung an dem Prozess vornehmen.

Unterstützung Auslastung Batteriespeicher

PROBLEM:
Batteriespeicher werden aus Kostengründen sehr „eng“ bemessen und haben wenige Reserven für Schwankungen im Verbrauch.

LÖSUNG:
Die KI kann den „zukünftigen“ Prozess analysieren und Handlungsvorschläge für eine ausgewogene Fahrweise geben.

Abfüllanlagen von Flaschen in der Lebensmittelindustrie

PROBLEM:
Das Reinigen/Abfüllen von Flaschen in der Lebensmittelindustrie folgt einer starren Prozedur.

LÖSUNG:
Kontinuierliche Überwachung des Reinigungsgrades sowie des Füllguts. So könnte der Wasser-/Energieverbrauch durch Fehlfüllungen und nicht erfolgreiche Reinigung (vorzeitiges Ausschleusen der Flasche) drastisch reduziert werden.

Energieeffizienz in der Kälteerzeugung

PROBLEM:
Durch schwankende Umweltbedingungen sowie Menge und Eigenschaften der zu frostenden Produkte wird die Kälteerzeugung nicht immer im optimalen Bereich betrieben.

LÖSUNG:
Eine KI könnte automatisch die Einflussfaktoren berücksichtigen und die Kälteerzeugung regeln.

Herstellung von Gullydeckeln

PROBLEM:
Fehlgüsse durch Musterumstellung, falsche Schmelzmenge und unkorrekte Schmelztemperatur.

LÖSUNG:
Prozessanalyse und -optimierung durch künstliche neuronale Netze in Gießereien

Sortierprozesse in Verwertungsbetrieben

PROBLEM:
Die Qualität der Sortierprodukte muss bei veränderlichen Eingangsstoffströmen konstant gehalten werden. Gleichzeitig müssen kostenintensive Teilströme vermieden werden.

LÖSUNG:
Optimierung der Durchsätze der für die Materialsortierung eingesetzten NIRs durch frühzeitige Regelung der Durchsatzleistungen der vorgeschalteten Sortiermaschinen (Siebe, Sichter, Scheider)

2.2 Prozessoptimierung

Aktuell wird der Prozess mit der Expertise der Fachkräfte gesteuert. Methoden des Maschinellen Lernens können die Fachkräfte bei ihrer Aufgabe unterstützen. Zusätzlich kann durch eine kontinuierliche Überwachung der Prozesse auf kleinere Veränderungen reagiert werden.

Unterstützung bei der Reduzierung von Entgasungszeiten bei einer Kaffeeröstung

PROBLEM:
Nach der Röstung von Kaffeebohnen entstehen Verweilzeiten, weil die Bohne ausgasen muss. Diese Zeit hängt von der jeweiligen Produktzusammensetzung ab.

LÖSUNG:
Die KI kann anhand vorhandener Informationen eine minimale Verweilzeit berechnen, um so Durchsatz, Lagerkapazitäten und Energieverbrauch zu optimieren.

Unterstützung bei Ziegelherstellung

PROBLEM:
Verschiedene Sorten Ziegel sollen durch einen Brennofen gefahren werden.

LÖSUNG:
Die KI kann anhand des Auftragseinganges die Ziegelarten nach den Parametern "Brenntemperatur" und "Laufzeit" sortiert durch den gleichmäßiger geheizten Brennofen schicken.

Optimierte Bereitstellung von Energie durch Gasturbinen

PROBLEM/LÖSUNG:

Optimierung von Gasturbinen zur effizienten Bereitstellung von Prozessenergie in energieintensiven Produktionsprozessen

Brennstoffqualitäten in der Recyclingindustrie

PROBLEM/LÖSUNG:

Optimierung der Brennstoffqualitäten im Output-Material, welches energetisch verwertet wird, z. B. nicht stofflich verwertbarer Reststoffe oder Mischkunststoffe. Ziel ist die permanente Anpassung der Aggregate-Einstellungen im Sortierprozess an die variierende Zusammensetzung der Inputstoffe unter Gewährleistung eines konstanten Brennwertes des Ersatzbrennstoffes.

2.3 Veränderliche Rohware

In vielen Prozessen besteht die Herausforderung, aus Rohstoffen mit stark schwankenden Eigenschaften ein Produkt mit eng definierten Produkteigenschaften herzustellen. Methoden des Maschinellen Lernens können auf die Veränderungen in den Rohstoffen reagieren und den Prozess an die geforderten Produkteigenschaften autonom anpassen.

Unterstützung bei Mischprozessen in der Futtermittelbranche

PROBLEM:

Reaktion auf Änderung der Inputstoffe (z. B. Proteingehalt, Feuchte)

LÖSUNG:

Die KI kann anhand des Ist-Zustandes des Produktes die Mischung und die Prozessparameter für eine energetisch optimierte Produktion anpassen.

Unterstützung Käserei

PROBLEM:

Die Qualität des herzustellenden Käses ist abhängig von verschiedenen Faktoren, die zusammenhängend betrachtend werden müssen (Rohmilchqualität, Ausfälldauer, Zeitpunkt der Scheidung, Dauer Lagerung in Salzlake usw.).

LÖSUNG:

Die KI kann anhand der gelernten Erfahrungen ein gleichbleibendes Ergebnis sicherstellen und damit den Prozessenergiebedarf senken.

Vollautomatische Kanalballenpresse

PROBLEM/LÖSUNG:

Das zugeführte Material in einer Kanalballenpresse ist stark inhomogen. Mit einer intelligenten Regelung der Prozessparameter kann eine energie- und qualitätsoptimierte Fahrweise sichergestellt werden.

2.4 Unsichere Messdatenquellen

Eine wichtige Voraussetzung für deterministische Entscheidungen sind fehlerfreie und konsistente Messdaten aus dem Prozess. Ist dies nicht zu gewährleisten, muss mindestens die Qualität der Messdaten abgeschätzt werden können. Das gilt besonders, wenn Modelle daraus abgeleitet werden sollen. Methoden des Maschinellen Lernens können genutzt werden, diese Bewertung vorzunehmen.

Fehlererkennung in Messdaten aus Sensoren

PROBLEM:

In komplexen Prozessen kann durch die Überlagerung von Effekten ein fehlerhafter Messwert immer erkannt werden. Dadurch kann es zu einer nicht optimalen Fahrweise des Prozesses kommen.

LÖSUNG:

Die KI erkennt automatisch fehlerhaft Messwerte z. B. durch gegenseitiges Kontrollieren der Daten innerhalb eines „Sensorschwarmes“.

2.5 Sonstige

Unterstützung im Lieferkettenmanagement in der Futtermittelbranche

PROBLEM:

Es entstehen immer wieder Wartezeiten und Leerfahrten, weil das zu transportierende Produkt noch nicht transportbereit ist.

LÖSUNG:

Die KI kann über Standortbestimmung eine Auftragsplanung in Abhängigkeit der Entfernungen der LKWs, des Produktionszustandes der Anlage und der Bedarfsänderung der Kunden errechnen.

Wartungsintervalle von Netztransformatoren

PROBLEM/LÖSUNG:

Die Wartungsintervalle von Netztransformatoren können durch eine geeignete Überwachung von dessen Betriebsparametern (inline) in Sinne der Bewertung der Betriebshistorie reduziert werden.

Unterstützung „Predictive Maintenance“

PROBLEM:

Die Vorhersagbarkeit eines Maschinenausfalls hängt von einer Vielzahl Faktoren ab (Belastung, Laufzeit, Qualität eingesetzter Bauteile); sowohl vorsorgliche (zu häufige) Wartung wie auch versäumte Wartung (Anlagenstillstand) führen zu Energieverlusten.

LÖSUNG:

Die KI kann durch Auswerten der Betriebszustände und der Betriebshistorie von Anlagenteilen eine dynamische Vorhersehbarkeit des Ausfalls (ggf. einzelner Komponenten) berechnen.

