

Zukunftsfähige Produktion: Smart und nachhaltig

Smarte Batchprozesse im Energiesystem der Zukunft

Die deutsche Industrie steht vor der doppelten Herausforderung: Sie muss CO₂-Emissionen reduzieren und zugleich wettbewerbsfähig bleiben. Besonders energieintensive Batchprozesse, wie in der Chemie, erfordern innovative Ansätze, um sich an die schwankende Energieversorgung aus erneuerbaren Quellen anzupassen. Ein interdisziplinäres Projekt liefert Lösungen.

Von Daniel Görges, Erik von Harbou, Marco Kiehl, Florian Sahling und Katharina Spraul

Die Industrie in Deutschland steht vor der enormen Herausforderung, den CO₂-Ausstoß ihrer Produktionsketten signifikant zu senken und gleichzeitig ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Insbesondere die in jüngster Zeit drastisch gestiegenen Energiekosten stellen für viele Unternehmen eine erhebliche Belastung dar.

Die Unternehmen aus der Chemiebranche sind hiervon besonders betroffen, da sie zu den energieintensivsten Branchen zählt. Ihr Endenergieverbrauch liegt bei rund 200 TWh pro Jahr, wovon rund 50 TWh auf elektrische Energie entfallen. Dies entspricht einem Anteil von 10 % des gesamten Strombedarfs in Deutschland. Der jährliche Wärmebedarf, der heutzutage meist noch über fossile Energieträger gedeckt wird, beläuft sich auf ungefähr 90 TWh. Der Anteil der chemischen Industrie am CO₂-Ausstoß in Deutschland beträgt insgesamt circa 6 % in Bezug auf energetische Nutzung (Verband der Chemischen Industrie 2024). Im Rahmen der Bestrebungen der chemischen Industrie, ihre Treibhausgasemissionen zu senken, wird aktuell intensiv an der Elektrifizierung von Prozessen gearbeitet (Chemie Technik 2022). Davon ausgehend wird erwartet, dass die Chemieindustrie ihren Strombedarf im Vergleich zum heutigen Stand ungefähr vervierfachen wird (Brudermüller 2020).

Aus diesen Zahlen wird deutlich, dass einer unter technologischen, ökologischen und ökonomischen Aspekten optimierten Versorgung von chemischen und auch biotechnologischen Produktionsstandorten mit elektrischer Energie eine entscheidende Rolle für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende zukommt.

Herausforderungen der Batchproduktion in der Energiewende

Insbesondere in der Prozessindustrie werden viele chemische und biotechnologische Produktionsprozesse als diskontinuierliche Prozesse, sogenannte Batchprozesse, durchgeführt. Diese Produktionsverfahren stehen im Projekt *Smarte Batchprozesse im Energiesystem der Zukunft* im Fokus.

Abbildung 1 verdeutlicht den Wandel von einem konstanten Stromangebot aus fossilen Quellen mit nahezu konstanten Preisen (Quadrant I) hin zu einer Energieversorgung aus erneuerbaren Quellen mit schwankendem Stromangebot und -preisen (Quadrant II). Diese Umstellung der Energieversorgung auf zunehmend erneuerbare Quellen ermöglicht langfristig eine industrielle Produktion ohne CO₂-Emissionen in Scope 2, wobei die Stromerzeugung durch erneuerbare Energien teilweise erheblichen Schwankungen unterliegt.

Eine wesentliche Herausforderung ergibt sich für Batchprozesse dadurch, dass ihre verschiedenen Prozessschritte üblicherweise nacheinander ausgeführt werden (z. B. Aufheizen, Rühren, Filtrieren, Abkühlen). In der Regel haben diese einzelnen Prozessschritte einen sehr unterschiedlichen Strom- und Wärmebedarf (Quadrant III). Das bedeutet, dass der Bedarf zeitlich stark variiert, jedoch nicht deckungsgleich ist mit dem fluktuierenden Angebot aus erneuerbaren Energien (Quadrant IV). Bislang richtet sich der Start eines Batchprozesses nach arbeitsorganisatorischen Gesichtspunkten (z. B. dem Schichtplan) in den häufig dezentralen oder mittelständischen Produktionsstandorten nach der Anlagenverfügbarkeit oder vorliegenden Kundenaufträgen. Der Produktionsprozess wird dann in der Regel nach festgelegten Rezepturen durchgeführt. Daher wird bei der Planung und Durchführung der Batchprozesse nicht das Angebot von elektrischem Strom berücksichtigt, sondern es wird davon ausgegangen, dass sowohl der Strombedarf als auch Erdgasbedarf (z. B. zur Bereitstellung von Prozesswärme) jederzeit für den Batchprozess zur Verfügung steht (Quadrant III).

Um vorwiegend erneuerbare Energien nutzen zu können und somit unabhängig von fossilen Brennstoffen zu sein, müssen die Batchprozesse auf eine mehrheitlich strombasierte Energieversorgung umgestellt werden (Quadrant IV). Aus diesem Grund müssen sie sich auf das schwankende Stromangebot einstellen, um wirtschaftlich und nachhaltig produzieren zu können. Dafür ist ein Paradigmenwechsel sowohl in der Prozessindustrie als auch bei der Energieversorgung notwendig, die Batchprozesse müssen flexibilisiert werden.

Flexibilisierung der Batchproduktion anhand von Demonstratoren

Die Flexibilisierung industrieller Batchprozesse kann grundsätzlich auf zwei Ebenen erfolgen: Zum einen auf der verfahrenstechnischen Ebene und zum anderen auf der elektrotechnischen Ebene. Auf der verfahrenstechnischen Ebene wird der Prozess – zum Beispiel durch Einsatz robuster Katalysatoren oder toleranter Mikroorganismen – ertüchtigt, unter zeitlich variierender Stromversorgung Produkte mit der gewünschten Qualität zu erzeugen. Auf der elektrotechnischen Ebene hingegen wird versucht, die Schwankungen in der Energieversorgung durch holistisches Energiemanagement- und Speicherstrategien (z. B. Batterien, thermische und fluidische Speicher) vom Prozess fernzuhalten. In der Praxis wird in den meisten Fällen eine Kombination der beiden Ebenen notwendig sein.

Neben der Flexibilität muss der gesamte Produktionsprozess darüber hinaus energieeffizient sein, um insgesamt eine nachhaltige und kostengünstige Produktion zu ermöglichen. Dies verstehen wir unter dem Begriff „smarter Prozess“.

Ein anschauliches Beispiel für einen smarten Batchprozess ist das Wäschewaschen im Haushalt. Zunächst ist der Waschvorgang in einer modernen Waschmaschine ein sehr effizienter Batchprozess. In den vergangenen 80 Jahren konnte der Energiebedarf von Waschmaschinen um bis zu 80 % gesenkt werden (Stiftung Warentest 2017). Neben der Anwendung von Waschmitteln, die auch bei niedrigen Temperaturen eine hohe Reinigungswirkung entfalten, ist der umfangreiche Einsatz von Prozesssensoren für die Effizienzsteigerungen ausschlaggebend. Während früher der Waschvorgang oft nach dem Prinzip „Viel hilft viel“ gefahren wurde, sorgen heutzutage Sensoren dafür, dass nur genau so viel Wasser und Energie eingesetzt wird, wie es zur Erreichung der gewünschten Reinheit notwendig ist.

Wie lässt sich aus diesem energieeffizienten Prozess ein smarter Batchprozess gestalten? Moderne Waschmaschinengeräte ermöglichen in der Regel verschiedene Betriebsmodi, zum Beispiel den Intensiv-Modus mit kurzen Waschzeiten und vergleichsweise hohem Energie- und Wasserbedarf oder den Sparmodus mit langer Waschzeit und geringem Energie- und Wasserbedarf. Der Nutzer hat die Möglichkeit, je nach Verfügbarkeit von elektrischem Strom, zum Beispiel über eine hauseigene Photovoltaik-Anlage, das Programm so zu wählen, dass die Energiekosten für eine gewünschte Menge an Produkt und gewünschter Qualität (in diesem Fall sauberer Wäsche) minimiert werden. Durch den Einsatz etwa von Batteriespeichern kann der Prozess sogar noch weiter von schwankendem Stromangebot und -preisen entkoppelt werden.

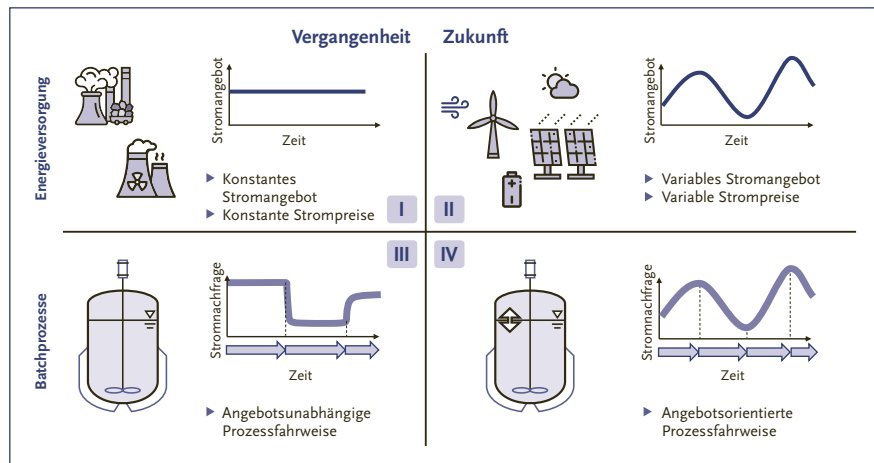


Abbildung 1: Energieversorgung im Wandel: Anpassung der Industrieprozesse an erneuerbare Energien
Quelle: eigene Darstellung

Das Beispiel verdeutlicht, dass eine Kombination von verfahrenstechnischen Methoden, Methoden der Prozessanalyse und -regelung sowie Methoden des Energiemanagements erforderlich ist, um einen smarten Batchprozess zu erhalten. Wie diese Kombination exakt aussehen wird, wird sehr stark von den konkreten Eigenschaften des betrachteten Batchprozesses abhängen. Darin besteht eine der zentralen Forschungsfragen des Projektes, da es nicht den einen idealtypischen Batchprozess gibt, sondern sehr viele verschiedene in der Praxis etablierte und langjährig optimierte Batchprozesse. Beispielsweise existieren Prozesse mit Zykluszeiten im Bereich von Minuten bei chemischen Synthesen und solche im Bereich von Tagen oder sogar Wochen wie bei biotechnologischen Fermentationen sowie Prozessen zur Erzeugung von Lebensmitteln oder von Pharmazeutika. Aus diesem Grund soll die Entwicklung der Methoden zur Flexibilisierung von Batchprozessen im Projekt anhand von vier verschiedenen Demonstratoren durchgeführt werden.

Drei der im Rahmen des Projekts an der RPTU aufgebauten Demonstratoren bilden chemische und biotechnologische Produktionsprozesse ab, der vierte Demonstrator beschäftigt sich mit dem Energiesystem. Die Produktionsprozesse wurden dabei so ausgewählt, dass sie ganz unterschiedliche Charakteristiken aufweisen und somit verschiedene Herausforderungen für die Flexibilisierung darstellen. Zum Beispiel werden sowohl anaerobe als auch aerobe fermentative Produktionsverfahren untersucht. Aerobe biologische Produktionsverfahren stellen andere Anforderungen an eine flexible, anbieterorientierte Prozessführung als die anaeroben Produktionsprozesse oder chemische Synthesen, weil eine Mangelversorgung lebender biologischer Systeme mit Sauerstoff schnell zu irreversiblen Schädigungen führt.

Im Demonstrator, welcher sich auf die elektrotechnische Ebene der Flexibilisierung der Batchprozesse fokussiert, wird ein Mittelspannungs-Gleichstrom-Netz (MVDC) untersucht. Für chemische und biotechnologische Produktionsstandorte

bieten sich gleichstrombasierte Versorgungsnetze an, da sowohl die aufkommenden strombasierten Produktionsprozesse (z. B. Elektrolyse oder elektrische Heizungen) als auch die regenerativen Energieerzeuger in der Regel auf der Gleichstromebene arbeiten. Ein auf die Charakteristika eines chemischen oder biotechnologischen Produktionsstandorts ausgelegtes MVDC-Netz weist ein erhebliches Potenzial für eine multikriterielle Optimierung im Hinblick auf die Flexibilität, die effiziente Integration strombasierter Produktionsverfahren und regenerativer Energien sowie die Installationskosten auf. Beispielsweise werden leistungselektronische Komponenten entwickelt, die eine effiziente Transformation des elektrischen Stroms von der Mittelspannung auf die niedrige Spannung, wie sie für elektrochemische Prozesse (Elektrolyse und Brennstoffzellen) benötigt wird, ermöglichen.

Betriebswirtschaftliche Fragestellungen

Neben der Ertüchtigung der einzelnen Prozessschritte (wie Synthese und Aufreinigung) und der Energiesysteme stellt die Flexibilisierung neue Anforderungen an die gesamte Produktionskette. Die Umstellung von Batchprozessen auf einen angebotsorientierten Stromverbrauch (Quadrant IV) ist somit nicht nur eine technische Herausforderung, sondern erfordert auch ein unternehmerisches Umdenken in Hinblick auf die Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Unter dem Begriff PPS wird allgemein die Planung, Steuerung und Kontrolle des gesamten Produktionsgeschehens in räumlicher, zeitlicher und mengenmäßiger Hinsicht verstanden (Drexler et al. 1994). Auf der Basis vorliegender Kundenaufträge und prognostizierter Nachfragemengen sollen kostenminimale Produktions- und Ablaufpläne erstellt werden, welche die knappen Kapazitäten der Produktionsressourcen berücksichtigen. Neben der Knappheit der Produktionskapazitäten muss jedoch nun auch das zeitlich schwankende und weitgehend unsichere Stromangebot der erneuerbaren Energien sowie die schwankenden Strompreise explizit bei der Produktionsplanung und -steuerung Berücksichtigung finden. Die klassische PPS muss daher zu einer energieorientierten PPS weiterentwickelt werden. In der Literatur wurden in der jüngeren Vergangenheit bereits einige Ansätze zur Entscheidungsunterstützung im Rahmen einer energieorientierten PPS vorgestellt (Bänsch et al. 2021). Diese Ansätze sollen im Rahmen des Projektes weiterentwickelt werden, um die entwickelten Flexibilisierungsarten bei der Planung von Batchprozessen zu berücksichtigen.

Ganz entscheidend für die Umsetzung der neuen energieeffizienten Produktionsverfahren – und letztendlich der Energiewende – ist die Frage, ob es gelingt, für diese Verfahren und deren Produkte nachhaltige Geschäftsmodelle zu entwickeln. Die Circular Economy gilt in diesem Kontext als vielsprechendes Konzept, um nachhaltige Geschäftsmodelle aktiv umzusetzen. Dieses Konzept basiert auf Ideen wie der „Industrial Ecology“ und hat sich seit 2013 als Rahmenkonzept durchgesetzt, mit dem Ziel, Ressourcen effizient zu nutzen, Abfall zu

minimieren und Produkte sowie Materialien möglichst lange im Wertschöpfungskreislauf zu halten (Blomsma/Brennan 2017). Ein solcher Ansatz ermöglicht es, nicht nur ökologische Vorteile zu realisieren, sondern auch wirtschaftliche Chancen zu erschließen. Zudem gibt es auch auf regulatorischer Seite durch Maßnahmen wie den *Circular Economy Action Plan* zunehmend Anreize und Aufforderungen an die Industrie, sich verstärkt in Richtung Kreislaufwirtschaft zu bewegen. Aus diesem Grund befassen sich Arbeitspakete im Projekt auch damit, inwiefern kreislaufwirtschaftsorientierte Strategien und Geschäftsmodelle angewendet werden können. Es zeigt sich bislang ein großer Nachholbedarf in diesem Bereich bei produzierenden Unternehmen. In diesem Kontext soll daher gemeinsam mit der Praxis an Lösungen geforscht und gearbeitet werden, indem Potenziale identifiziert und Strategien zur Förderung einer zirkulären Wirtschaft gezielt entwickelt werden.

Fazit

Die Flexibilisierung energieintensiver Batchprozesse ist entscheidend für eine nachhaltige Industrieproduktion in einer von erneuerbaren Energien geprägten Zukunft. Durch die Kombination verfahrenstechnischer und elektrotechnischer Ansätze sowie die Integration in energieorientierte Produktionsplanung können Prozesse effizienter und unabhängiger von fossilen Brennstoffen gestaltet werden. Gleichzeitig erfordert dies ein Umdenken in der Industrie hin zu zirkulären Geschäftsmodellen und neuen Produktionsstrategien. Das vorgestellte Forschungsprojekt zeigt, wie innovative Technologien und Kooperationen zwischen Wissenschaft und Industrie dazu beitragen können, die Energiewende voranzutreiben und zugleich wirtschaftliche Chancen zu erschließen.

Anmerkung

Das Projekt *Smarte Batchprozesse im Energiesystem der Zukunft* wird von der Carl-Zeiss-Stiftung im Rahmen des Programms *Durchbrüche* gefördert. Das Projekt hat im April 2023 begonnen und eine Laufzeit von 6 Jahren. Die Fördersumme beträgt 5 Millionen Euro.

Das Projekt wird von Forscher/innen der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau durchgeführt. Das Team ist sehr interdisziplinär aufgestellt und setzt sich aus Mitgliedern der vier Fachrichtungen Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Elektrotechnik und Informationstechnik, Chemie sowie Wirtschaftswissenschaften zusammen. Die Autor/innen des vorliegenden Beitrags sind Mitglieder des Leitungskreises und wurden bei der Erstellung von Marco Kiehl unterstützt.

Ein wichtiges Element des interdisziplinären Forschungsprojekts ist die Einbindung eines Industriebeirats. Die beteiligten Unternehmen im Industriebeirat spiegeln die gesamte Bandbreite des Projektes wider: vom Energieversorger über den Anlagenbauer bis hin zum Anlagenbetreiber und Produzenten. Die Aufgabe des Industriebeirats ist es, wichtige Impulse für die Forschung zu liefern und damit sicherzustellen, dass die Aspekte der Anwendung früh in der Forschung berücksichtigt werden. Angestrebt wird daher auch, Forschungsergebnisse in den Unternehmen zum Teil direkt umzusetzen. Darüber hinaus haben die Mitglieder des Industriebeirats die Möglichkeit, an dem jährlichen Symposium teilzunehmen. Hier werden zum einen die Forschungsergebnisse aus den einzelnen Forschungsbereichen der RPTU vorgestellt und diskutiert, zum anderen bietet sich die Gelegenheit, ergän-

zende Vorträge von externen und Industriebeiratsmitgliedern zu verfolgen, beispielsweise zu Herausforderungen bei der Entwicklung effizienter Batchprozesse in der chemischen Industrie oder bei der Kaffeeröstung, sowie die Integration von Batchprozessen in Energiemanagementsysteme. Das Projekt ist offen für weitere Teilnehmer im Industriebeirat. Sollten Sie Interesse haben, sich einzubringen und von den Erkenntnissen sowie dem Austausch zu profitieren, freuen wir uns über Ihre Kontaktaufnahme.

Weiterführende Links:

Projekt-Homepage: <https://rptu.de/projekt/sb>

LinkedIn-Seite: <https://linkedin.com/company/smart-batchprozesse-im-energiesystem-der-zukunft>

Carl-Zeiss-Stiftung: www.carl-zeiss-stiftung.de/themen-projekte/uebersicht-projekte/detail/smart-batchprozesse

Literatur

- Bänsch, K./Busse, J./Meisel, F./Rieck, J./Scholz, S./Volling, T./Wichmann, M. G. (2021): Energy-aware decision support models in production environments: A systematic literature review. In: Computers & Industrial Engineering 159: 107456. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107456.
- Blomsma, F./Brennan, G. (2017): The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. In: Journal of Industrial Ecology 21/3: 603–614. DOI: 10.1111/jiec.12603.
- Brudermüller, M. (2020): Die Formel für die Energiewende: Gastkommentar – BASF-Chef Brudermüller. www.handelsblatt.com/meinung/gastbeitraege/gastkommentar-basf-chef-brudermueller-das-ist-die-formel-fuer-die-energie-wende
- Chemie Technik (2021): Chemiekonzerne wollen ersten Elektro-Steamcracker bauen. www.chemietechnik.de/anlagenbau/chemiekonzerne-wollen-ersten-elektro-steamcracker-bauen-283.html
- Drexel, A./Fleischmann, B./Günther, H. O./Stadtler, H./Tempelmeier, H. (1994): Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS Systeme. In: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 46/12: 1022–1045.
- Stiftung Warentest (2017): 50 Jahre Waschmaschinen-Test: Forscher werten Testergebnisse aus. www.test.de/50-Jahre-Waschmaschinen-Tests-Forscher-werten-Testergebnisse-aus-5243602-0
- Verband der Chemischen Industrie (2024): Energiestatistik: Daten und Fakten. www.vci.de/ergaenzende-downloads/energiestatistik-gesamt.pdf

AUTOR/INNEN + KONTAKT

Daniel Görge ist Professor für Elektromobilität im Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU).

Rheinland-Pfälzische Technische Universität
Kaiserslautern-Landau,
Gottlieb-Daimler-Straße 47, 67663 Kaiserslautern.
E-Mail: daniel.goerges@rptu.de, Tel.: +49 631 2052091

Erik von Harbou ist Professor für Reaktions- und Fluidverfahrenstechnik im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik der RPTU.
Gottlieb-Daimler-Straße 47, 67663 Kaiserslautern.
E-Mail: erik.vonharbou@rptu.de, Tel.: +49 631 2052151

Marco Kiehl ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Sustainability Management im Fachbereich Wirtschaftswissenschaften der RPTU.

Gottlieb-Daimler-Straße 47, 67663 Kaiserslautern.
E-Mail: marco.kiehl@rptu.de, Tel.: +49 631 2055531

Florian Sahling ist Professor für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Produktionsmanagement im Fachbereich Wirtschaftswissenschaften der RPTU.

Gottlieb-Daimler-Straße 47, 67663 Kaiserslautern.
E-Mail: florian.sahling@rptu.de, Tel.: +49 631 2053746

Katharina Spraul ist Professorin für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Sustainability Management im Fachbereich Wirtschaftswissenschaften der RPTU.

Gottlieb-Daimler-Straße 47, 67663 Kaiserslautern.
E-Mail: spraul@rptu.de, Tel.: +49 631 2055510



Nachhaltigkeit

A-Z



Michael W. Bader
**WIRTSCHAFT
OHNE MACHT
UND GIER**

Perspektiven einer postkapitalistischen
Wirtschaftsordnung

Mit einem Essay von Gerhard Schuster
zum Verhältnis von Ökonomie und Ethik

P wie Postkapitalismus

Für eine nachhaltige Zukunft brauchen wir einen Wirtschaftswandel. Kluge Konzepte dazu gibt es genug. Sie brauchen jedoch einen veränderten gesellschaftlichen Rahmen, wie etwa komplementäre Eigentumsformen oder alternative Kapitalbegriffe. Michael W. Bader bietet einen verständlichen Überblick über die gängigen Theorien und die vielversprechendsten Zukunftsvisionen.

M. Bader

Wirtschaft ohne Macht und Gier

Perspektiven einer postkapitalistischen Wirtschaftsordnung

246 Seiten, Broschur, 24 Euro

ISBN 978-3-96238-406-7

Bestellbar im Buchhandel und unter www.oekom.de.
Auch als E-Book erhältlich.

Die guten Seiten der Zukunft

oekom