

Trends der chemischen Prozessindustrie

Bernhard Schäfer* and Jörg Sauer

DOI: 10.1002/cite.201900178

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Aktuelle Trends aus der chemischen Prozesstechnik im Rahmen der Begleitforschung des Forschungsnetzwerkes Energie in Industrie und Gewerbe (EE4InG) werden vorgestellt. Wir gehen davon aus, dass die Trends zirkuläre Wirtschaft und beschleunigte globalisierte Innovation (Modularisierung, Prozessintensivierung und Digitalisierung) bis 2030 auf die Chemieindustrie wirken. Die Technologieentwicklung anhand dieser Trends erlaubt es dem Chemieingenieurwesen, zukünftig entscheidende Beiträge zur Flexibilisierung und Defossilisierung der Wertschöpfungsketten zu leisten.

Schlagwörter: Circular economy, Digitalisierung, Modularisierung, Prozessintensivierung

Eingegangen: 29. November 2019; *akzeptiert:* 14. Januar 2020

Trends in Chemical Process Industry

Current trends in chemical process technology as part of the accompanying research of the research network Energie in Industrie und Gewerbe (EE4InG) are presented. We assume that the trends circular economy and accelerated globalized innovation (modularization, process intensification and digitalization) will have an impact on the chemical industry by 2030. Technology development based on these trends will enable chemical engineering to make decisive contributions to the flexibilization and defossilization of value chains in the future.

Keywords: Circular economy, Digitalization, Modularization, Process intensification

1 Einleitung

Die zukünftigen Herausforderungen der chemischen Industrie für die nächsten 10–15 Jahre werden in einer Reihe von Veröffentlichungen behandelt. Aus den Ergebnissen der Studien [1–4] wurde die SWOT-Analyse in Tab. 1 abgeleitet.

Die zitierten Veröffentlichungen beschäftigten sich neben der Situation der Chemiebranche auch mit den Trends, die vom Umfeld auf die Chemieindustrie wirken und von denen auszugehen ist, dass sie die chemische Industrie bis 2030 nachhaltig verändern werden. Besonders ausführlich wurden diese Umfeldtrends in der Studie Chemie 4.0 untersucht, die im Auftrag des Verbands der chemischen Industrie erstellt wurde [4].

In Abb. 1 sind diese sogenannten Umfeldtrends in einer Matrix angeordnet, die diese auf der Abszisse hinsichtlich ihrer eher inkrementellen bzw. disruptiven Innovationsnatur einteilt. Disruptive Innovationen ersetzen die Erfolgsserie einer bereits bestehenden Technologie oder eines Produkts und verdrängen diese vollständig vom Markt, während inkrementelle Innovationen mit schrittweisen Verbesserungen einhergehen. Die Ordinate differenziert den einflussnehmenden Treiber, der entweder unternehmerisch/ökonomischer oder gesellschaftlich/politischer Natur sein kann. Bei vielen der dargestellten Trends handelt es sich um inkrementelle Innovationen in wichtigen Geschäftsfeldern,

wie z. B. der Automobil- und Bauindustrie. Ein auffallend großer Anteil der absehbaren Veränderungen hat jedoch tatsächlich einen disruptiven Charakter.

Eine Vielzahl der in Abb. 1 abgebildeten Entwicklungen stehen unmittelbar im Zusammenhang mit der zunehmenden Digitalisierung von Gesellschaft und Wirtschaft (z. B. Additive Fertigung, Digitalisierung der Landwirtschaft, Medizintechnik). Einem weiteren, zweiten Schwerpunkt können gesellschaftlich-politisch getriebene Trends aus Abb. 1 zugeordnet werden, die sich mit Nachhaltigkeitsthemen und zirkulären Wirtschaftskonzepten (z. B. CO₂ als Grundstoff, Bioraffinerien, Kunststoff-Recycling) beschäftigen.

Überträgt man die Umfeldtrends auf die chemische Prozessindustrie, so können als Trends zirkuläre Wirtschaft und beschleunigte globalisierte Innovation benannt werden. Letzteres manifestiert sich in Modularisierung, Prozessintensivierung und Digitalisierung, die eine Antwort auf eine schnelllebige Welt des globalen Wettbewerbs mit kürzeren Produktzyklen und unsicherer Rohstoffversorgung sein können.

Dr. Bernhard Schäfer, Prof. Dr.-Ing. Jörg Sauer
bernhard.schaefer@kit.edu
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Katalyseforschung & -technologie (IKFT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland.

Tabelle 1. SWOT-Analyse aus den Ergebnissen verschiedener Studien, die sich mit der Situation und den Trends in der deutschen Chemieindustrie beschäftigen [1–4].

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> – hoher Umsatz (weltweit steht die deutsche Chemieindustrie an vierter Stelle) – hohe Exportquote 	<ul style="list-style-type: none"> – hoher Energieverbrauch (25 % des Energieverbrauchs des verarbeitenden Gewerbes) – Abhängigkeit von der Energiepreisentwicklung – mögliche Produktionseinschränkung durch europäische oder deutsche Energieeffizienzregulierungen
Möglichkeiten	Gefahren
<ul style="list-style-type: none"> – Spezialchemikalien und Pharmaka als strategischer Fokus der Branche – hohes Innovationspotenzial – hohes Innovationstempo, neben Produkt- und Prozessinnovationen auch neue Geschäftsmodelle und disruptive Innovationen einbeziehen – nachhaltige Unternehmensstrategien – Anwendung erneuerbarer Energien und nachwachsender Rohstoffe auf dem Weg in eine zirkuläre, biobasierte zukünftige Wirtschaft 	<ul style="list-style-type: none"> – Verlagerungen der Märkte und Produktionsstätten nach Asien – starker internationaler Wettbewerb – Importdruck bei Basischemikalien, Produktion nur für den eigenen Bedarf in Europa

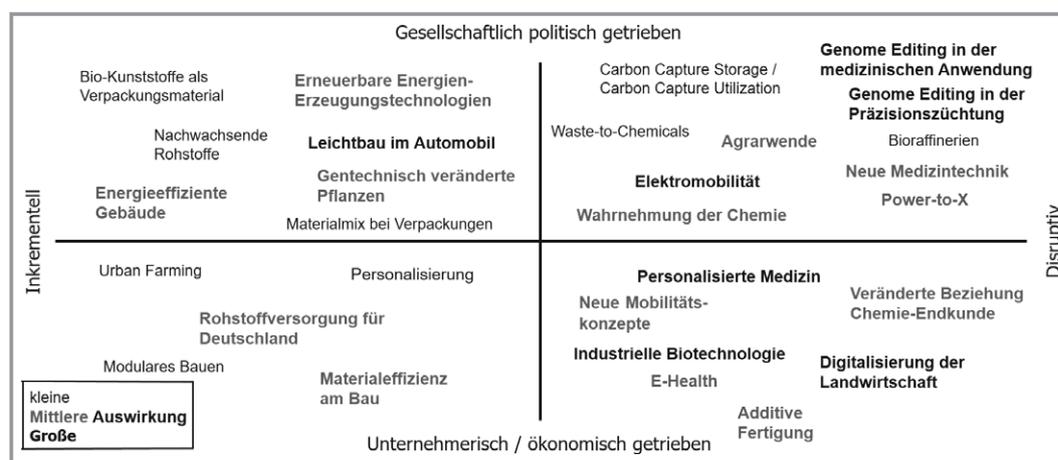


Abbildung 1. Einordnung der Umfeldtrends der Chemieindustrie nach der Studie Chemie 4.0 [4].

2 Beschleunigte globalisierte Innovation

Die Chemiebranche in Deutschland und Europa erlebt in zunehmendem Maße eine globale Verschiebung von Nachfragestrukturen und Wertschöpfungsketten, die Lebenszyklen chemischer Produkte werden gleichzeitig immer kürzer und die Gesellschaft verlangt nach höherer Energie- und Ressourceneffizienz (s. Tab. 1). Um die Konkurrenzfähigkeit bei Spezialitäten und Pharmaka zu verbessern, sind Digitalisierung, Prozessintensivierung und Modularisierung die Trends, die die chemische Prozesstechnik in den nächsten Jahrzehnten prägen und gestalten werden.

2.1 Digitalisierung

Die Veränderung kompletter Geschäftsmodelle durch die Digitalisierung und der mit ihr verbundenen Industrie 4.0 wird zukünftig neue Effizienzpotenziale in der chemischen

Prozessindustrie aufzeigen und die Wettbewerbsfähigkeit stärken. Die Digitalisierung eines Unternehmens der Chemieindustrie kann in verschiedene Dimensionen gegliedert werden:

- 1) Die horizontale Wertschöpfungskette vom Ausgangsstoff bis zum Kunden (Supply Chain und neue Geschäftsmodelle).
- 2) Die vertikale Integration umfasst die im Rahmen der digitalen Transformation eintretenden Veränderungen von der Prozessentwicklung über Planung und Produktionskonzept bis zur Produktion.
- 3) Smartes Equipment beinhaltet als Dimension intelligente Apparate und Anlagen sowie Sensoren und Automatisierungskonzepte.
- 4) Datenkonzepte, Datenanalyse, Big Data und künstliche Intelligenz (Machine Learning).

Diese Digitalisierungsdimensionen werden in der Wissenschaft, in Verbänden und Unternehmen der chemischen Prozessindustrie diskutiert und erforscht. Das von der ProcessNet-Fachgemeinschaft Prozess-, Apparate- und

Anlagentechnik (PAAT) ausgerichtetes Tutzing-Symposium 2018 thematisierte die Digitalisierung der Prozessindustrie in Workshops zu den oben vorgestellten Dimensionen [5].

In weiterführenden Veranstaltungen verstetigte sich die Digitalisierung-Offensive [6] und setzte Schwerpunkte auf die Digitalisierung des vorhandenen Anlagenbestands und der Vision des gläsernen Trennapparats (Separation Units 4.0, zeitlich, räumlich und methodisch dichtes Monitoring der Betriebszustände für eine daten- und modellbasierte Optimierung transienter oder instationärer Prozesse) [7, 8].

Unter einem Digitalen Zwilling (DZ) versteht man eine digitale Repräsentanz eines materiellen oder immateriellen Objektes oder Prozesses aus der realen Welt [9]. Der DZ spiegelt einen bidirektionalen dynamischen Abbildungsprozess wider; er überwindet die Barrieren im Produktlebenszyklus und bietet einen vollständigen digitalen Fußabdruck der Produkte [10]. Dabei nimmt der DZ eine besondere Rolle ein. Er ist das Modell für Ressourcen und Anlagen unter Einbeziehung einer prädiktiven Wartung. Der DZ vereinigt gleichberechtigt Prozess-, Produkt- und Ressourcenmodelle und spannt aus diesen Partialmodellen in Zukunft einen gemeinsamen Informationsraum auf. Dieser entsteht durch die Zusammenarbeit aller beteiligten Akteure (Innovation, Produkt- und Anwendungsentwicklung, Vertrieb, Marketing, Supply Chain Management) [11].

Ein Beispiel der Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet ist die Innovationsplattform „KEEN – Künstliche-Intelligenz-Inkubator-Labore in der Prozessindustrie“ [12]. Das Ziel der 25 KEEN-Partner aus Industrie und Wissenschaft ist es, die Technologien und Methoden der künstlichen Intelligenz in der chemisch-pharmazeutischen Prozessindustrie einzuführen.

Eine international konkurrenzfähige vorausschauende Produktion muss kürzere Produktlebenszyklen mit einem hohen Bedarf an Nachhaltigkeit und verantwortungsbewusster Ressourceneffizienz verbinden. In diesem Spannungsfeld geraten die traditionelle Anlagenplanung und Prozessführung an Grenzen. Künstliche Intelligenz (KI) hat das Potenzial, diese spezifischen Konflikte aufzulösen. Sie kann Muster in komplexen Prozessen erkennen und helfen, Ähnlichkeiten aber auch statistische Auffälligkeiten in Simulationen einzubinden, um daraus Entscheidungsempfehlungen abzuleiten. Das gewonnene gesteigerte Prozessverständnis ist die Grundlage für eine verbesserte Prozessführung. Anfallende Prozessdaten werden genutzt, um selbstlernende Algorithmen zu trainieren. Der erlernte Parameterraum mit seinen nun bekannten Ursache-Wirkung-Beziehungen erlaubt die optimale Nutzung des sicheren Betriebsbereichs einer Anlage und ihre präzisere Auslegung.

Das KEEN-Konsortium forscht an der Implementierung von KI-Verfahren in den drei Themenbereichen:

- Modellierung von Prozessen, Produkteigenschaften und Anlagen,
- Engineering (besonders Unterstützung komplexer Planungsprozesse und Sicherheitsengineering) sowie
- Realisierung selbstoptimierender Anlagen.

Ergänzt werden diese Bereiche durch die Entwicklung von KI-Lebenszyklusmodellen und Aspekten von KI-Elementen in der Aus- und Fortbildung. Vorarbeiten zur KEEN-Plattform beschäftigten sich mit interaktivem Sequenzmining, diskreten Prozessen und Steuerlogistik.

KI-basierte Lösungen aus dem KEEN-Projekt sollen direkt in die Anwendung überführt werden. Es wird damit gerechnet, dass bis 2025 erste kommerzielle KI-Produkte für die Prozessindustrie bereitgestellt werden können [12].

2.2 Modularisierung

Die Anwendung der Modularisierung wird eine Schlüsselperspektive einer chemischen Prozessindustrie sein, die mit den oben genannten Transformationen konfrontiert ist, da sie die Flexibilität in Bezug auf Kapazität (Numbering-up oder Parallelisierung), Produktmix (z. B. durch Austausch von Reaktions- oder Downstream-Verarbeitungsmodulen nach einem Plug-and-Produce-Konzept) sowie Ausgangsmaterial und Standort (z. B. Mobilität der Module) erhöhen kann (Abb. 2) [13]. Konzepte für den modularen Anlagenbetrieb werden von den beteiligten Akteuren gemeinsam entwickelt. Sie basieren auf standardisierten (vorkonstruierten, -automatisierten und -gefertigten) Prozessmodulen (PM) mit standardisierten Schnittstellen und dezentraler Intelligenz. Das Prozessdesign der einzelnen Schritte wie z. B. Feed, Reaktion und Reinigung, verwendet diese PMs. Einzeloperationen können dadurch schnell und zu einem kompletten Prozess zusammengestellt werden. Eine prozessführende Einheit orchestriert alle beteiligten Module im gesamten Produktionsprozess. Der Standardisierungsansatz von Modulen und Schnittstellen ermöglicht eine flexible, schnelle und effiziente Anpassung des gesamten Prozesses zu einem späteren Zeitpunkt [14, 15].

Die Technologie im modularen Anlagenbau und -betrieb ist mit dem Aufbau von modularen Anlagen verknüpft. Prinzipiell kann man zwischen Prozess- und Automatisierungstechnik auf vier verschiedenen Ebenen/Hierarchien unterscheiden [13]:

- 1) Die *Komponenten* (Apparate, Maschinen, Rohrleitungen, Armaturen) bilden die Basisschicht modularer Anlagen.
- 2) Die *modulare Funktionseinheit* besteht aus diesen Komponenten (Anlagen und Maschinen), die nach den Prozessfunktionen gruppiert werden.
- 3) Die *modulare Prozesseinheit* (MPE) bildet einen eigenen Prozessschritt (z. B. Feed) ab und besteht aus mindestens einer modularen Funktionseinheit. Ein wesentliches Merkmal der MPE ist eine eigene Automatisierungstechnik, die alle notwendigen Funktionen für einen sicheren dezentralen Betrieb bereitstellt. Der Datenaustausch zwischen den MPEs erfolgt über eine herstellerunabhängige standardisierte Schnittstelle MTP (*module type package*).

4) Die modulare Anlage wird aus mehreren MPEs (Feed, Produktion, Downstream Processing) gebildet. Die dezentrale Automatisierung der MPEs ist in einer *Process Orchestration Layer* integriert.

In verschiedenen öffentlich geförderten Projekten ist es gelungen, die Vorzüge der Modularisierung im Bereich von kleinen und mittleren kontinuierlichen Produktionsanlagen zu belegen. Es konnten Vorteile in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz erzielt werden [17]. Abb. 3 zeigt eine zeitliche Übersicht ausgewählter geförderter Forschungsprojekte mit Bezug zum Thema Modularisierung.

Das F³ Factory-Projekt untersuchte einen Ansatz zur Planung und Konzeption von modularen Produktionsanlagen mit schneller Prozessentwicklung und der Implementierung neuartiger, flexibler und nachhaltiger Prozesse. In den Fallstudien des Projekts wurde erfolgreich das Potenzial von Prozessintensivierung durch Modularisierung für die Chemieindustrie belegt [17, 18]. Die Zahlen aus Abb. 4 stellen die über alle Fallstudien des Projekts gewonnenen besten

Ergebnisse dar. Die Ergebnisse von einzelnen Prozessen bestimmter Fallstudien können jedoch auch abweichend ausfallen.

Die Entwicklung modularer Anlagen befindet sich noch in einem frühen Stadium der Implementierung. Für Anlagen, die kommerzielle Produktion im kleinen Format durchführen, sind containerbasierte Technologien entwickelt worden [19].

Bestehende individuelle Modularisierungskonzepte haben in der Zeit nach ihrer Einführung in mancherlei Hinsicht schon Beiträge zur Verbesserung von (Ressourcen-/Energie-)Effizienz und Flexibilität geleistet. Es gibt jedoch noch immer offene Themen, die besser adressiert werden müssen, um die Stärken modulare Anlagen vollständig und erfolgreich ausspielen zu können (s. Abb. 5) [19, 20].

Nationale Entwicklungsrichtlinien für die erfolgreiche Anwendung von modularen Anlagen (u. a. einen gemeinsamen Schnittstellenstandard) werden in der Richtlinienreihe VDI/VDE/NAMUR 2658 erarbeitet. In ihr werden HMI-

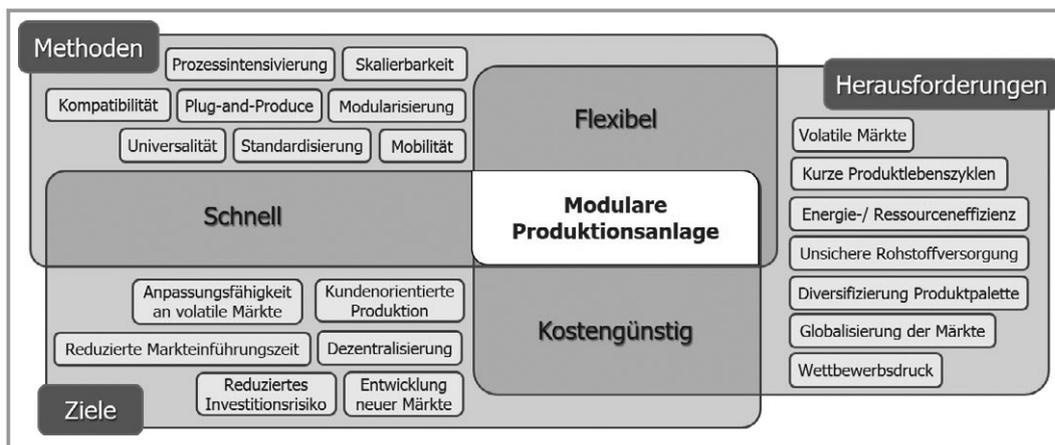


Abbildung 2. Ziele, Herausforderungen und Methoden von modularen Produktionsanlagen, eigene Abb. nach [16].

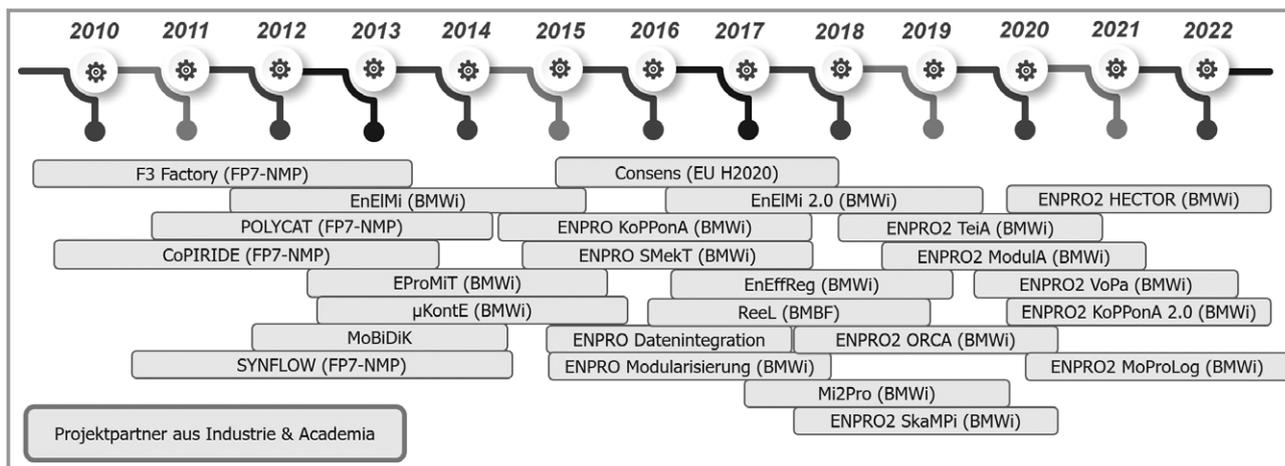


Abbildung 3. Zeitliche Übersicht ausgewählter geförderter Forschungsprojekte mit Bezug zur Modularisierung in der chemischen Prozesstechnik.

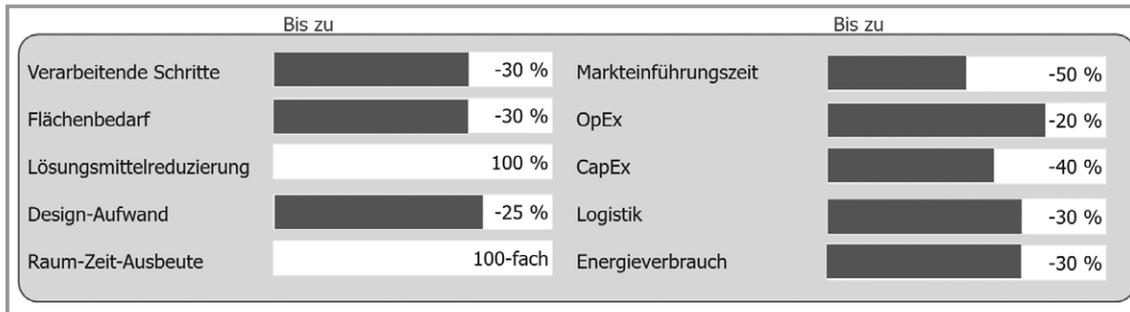


Abbildung 4. Im F³ Factory-Projekt bestimmte Auswirkungen auf Kenngrößen durch Modularisierung und Prozessintensivierung [17].

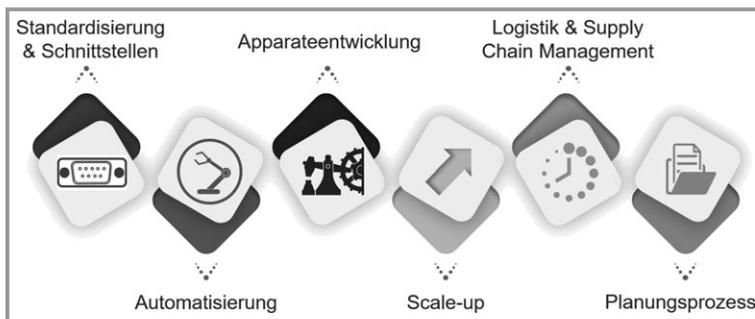


Abbildung 5. Bereiche, die im Rahmen zukünftiger (Forschungs-)Aktivitäten adressiert werden müssen [15, 19].

Integrationsaspekte und Voraussetzungen für die Orchestrierung von werksweiten Prozessbetriebs- und Steuerstrategien geregelt. Eine erfolgreiche Anwendung des modularen Anlagenkonzepts in der Prozessentwicklung sowie in der Engineering- und Betriebsphase entlang des Anlagenlebenszyklus beschreibt die Richtlinie VDI 2776.

2.3 Prozessintensivierung

Die Prozessintensivierung (PI) ist eine Strategie, um Effizienz und Flexibilität in den Prozessen der Stoffumwandlung der chemischen Verfahrenstechnik zu steigern. Die Entwicklung von innovativen Apparaten und Technologien durch PI ermöglicht eine Prozessführung in neuen Prozessfenster- und Prozessparameterbereichen. Die PI kann im Rahmen der Verfahrenstechnik in Anlagen in praktisch

jedem der Prozessschritte Reaktion, Stofftrennung und Produktreinigung umgesetzt werden [21]. Eine direkte Folge davon ist ein geringerer Verbrauch von Rohstoff, Material und Energie, die Reduktion der Abfallmenge, geringere Betriebs- und Investitionskosten, aber auch die Erhöhung der Betriebssicherheit. Die effizientere Nutzung von Energie und (stofflichen) Ressourcen ist oft mit einer Kostenreduktion verbunden und bietet ökonomische sowie ökologische Vorteile [15].

Die Verbesserung und die Neuentwicklung von Technologien kann prinzipiell zu innovativen ressourceneffizienteren Prozessen und Produkten führen (Abb. 6) [22, 23]. Das Ressourceneffizienzpotenzial prozessintensivierender Technologien wird als hoch eingeschätzt und bezieht sich auf [24]:

- minimierten Rohstoff- und Energieeinsatz (Produktionsprozess),
 - reduzierten Materialeinsatz (kompaktere Anlagen und Apparate) und
 - verringertes Abfallaufkommen.
- Die Anwendung von PI ermöglicht:
- geringere Apparatevolumen bei gleichbleibender Produktmenge,
 - Effizienzsteigerungen von Prozessen und Prozessketten sowie
 - Entwicklung von innovativen Technologien und Apparaten.

In einem ganzheitlichen Ansatz werden die Technologieentwicklungen auf dem Gebiet der PI grundsätzlich in die drei Bereiche: prozessintensierte Apparate, Produk-

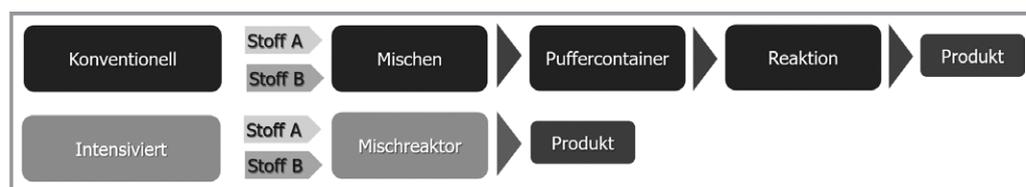


Abbildung 6. Gegenüberstellung von konventionellem und intensiviertem Prozess im Fall von Prozessintegration; direkte Folge sind weniger Prozessschritte.

tionsmethoden und Anlagenkonzeption eingeteilt (Abb. 7) [25–27].

Prozessintensivierte Apparate umfassen neuartige Reaktionsapparate und Apparate für nichtreaktive Operationen. Neuartige Reaktorkonzepte, die einen intensivierten Stoff- und Wärmeaustausch sichern, sind charakteristisch für diese neuartigen Reaktionsapparate (z. B. Millireaktoren). Die hervorragenden Mischeigenschaften der Apparate für nichtreaktive Operationen werden durch den intensivierten Stoff- und Wärmeaustausch ergänzt. Ein Beispiel dafür ist der Miprowa-Produktionsreaktor der Ehrfeld Mikro-technik BTS, der beim chinesischen Wirkstoffhersteller Shaoxing Eastlake High-Tech realisiert wurde [29] und dort 20 Batchreaktoren ersetzt. Ausgeführt wird eine stark exotherme Alkoxylierungsreaktion. Wichtige Argumente für die Umrüstungsentscheidung waren erzielbare Produktqualitäten, signifikant verbesserte Ausbeuten, Sicherheitsaspekte und kurze Kapitalrückflusszeiten. Weitere Beispiele aus der Forschung für Prozessintensivierung in der Verfahrenstechnik sind u. a. rotierende Destillations-, Absorptions- und Extraktionsapparate sowie 3D-gefertigte Wärmetauscher [30, 31].

Im Romeo-Projekt (*reactor optimization by membrane enhanced operation*) wurde ein prozessintensivierter Reaktortyp für die Hydroformylierung von Olefinen entwickelt, der die Anzahl der Prozessschritte auf eins verringert. Der Membranreaktor im Pilotmaßstab ist 70 % energie- sowie ressourceneffizienter und reduziert Treibhausgasemissionen um 45 % verglichen mit dem bisher angewandten Verfahren [32].

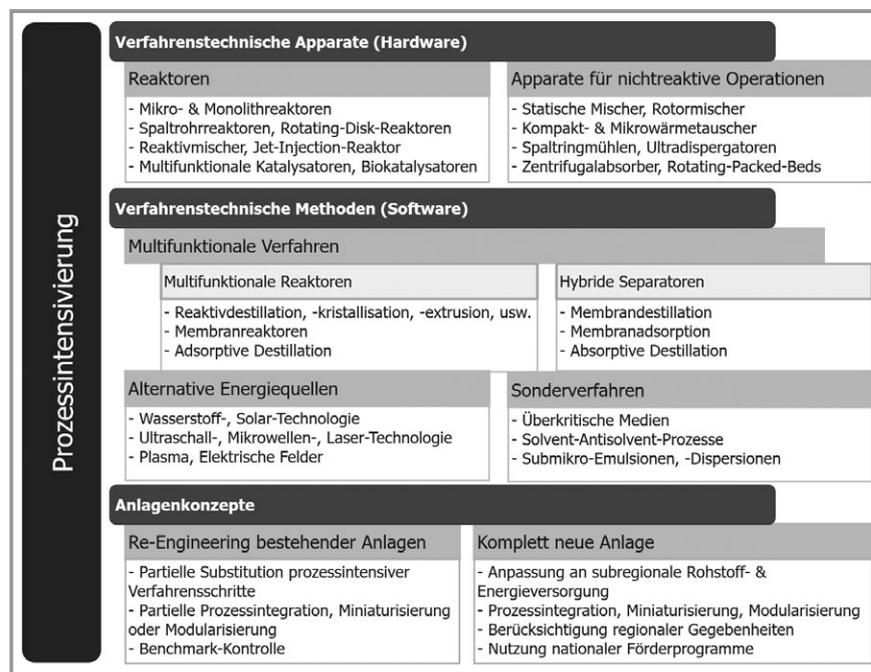


Abbildung 7. Elemente der PI, eigene Darstellung modifiziert nach [27, 28].

3 Zirkuläre Wirtschaft

Die zirkuläre Wirtschaft sollte ermöglichen, dass wichtige Querschnittsaufgaben der nachhaltigen Entwicklung erreicht werden können [33]. Das sind zum einen die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und der CO₂-Emissionen und zum anderen die Verringerung des Abfallaufkommens [34]. Dadurch, dass Produkte und Materialien in Gebrauch gehalten werden, können sich natürliche Systeme regenerieren [35].

In der Chemieindustrie kommt einer Schließung der Kohlenstoff-basierten Wertschöpfungsketten der organischen Chemie eine besondere Bedeutung zu (Abb. 8). 2017 bestand die Rohstoffbasis der organischen Chemie in Deutschland zu 87 % aus fossilen Rohstoffen (75 % Rohbenzin Naphtha, 11 % Erdgas, 1 % Kohle) [36]. Die auf fossilen Rohstoffen aufgebauten Wertschöpfungsketten sind linear angelegt. Das bei der Entsorgung anfallende CO₂ reichert sich in der Atmosphäre an. Um das zu vermeiden, ist es sinnvoll, den Kohlenstoffkreislauf mit den industriellen Mitteln und Technologien der chemischen Industrie im Rahmen einer zu etablierenden zirkulären Wirtschaft zu schließen.

Die Kreislaufführung von Kohlenstoff in chemischen Wertschöpfungsketten kann Lösungen für mehrere aktuelle Problemstellungen in Zusammenhang mit Klimaschutz aber auch zur Reduzierung des Aufkommens an Kunststoffabfall liefern. Für die Chemieindustrie sind zirkuläre Prinzipien mehr als Recycling, z. B. in Bezug auf die Steigerung von Ressourcen- und Energieeffizienz über gesamte Produktlebenszyklen hinweg. Kohlenstoffkreisläufe können am Lebensende von chemischen Produkten auf verschiedene Weise geschlossen werden (s. Abb. 8). Neben dem werkstofflichen bzw.

rohstofflichen Recycling und der energetischen Verwertung sind zukünftig die stoffliche Nutzung von CO₂ als Kohlenstoffbaustein sowie die Nutzung von Biomasse im Rahmen der Bioökonomie Möglichkeiten, die linearen Verarbeitungsketten fossiler Rohstoffe zu beenden [37].

Die vom BDI in Auftrag gegebene Studie „Klimapfade für Deutschland“ [38] zeigt, dass die Klimaziele (Senkung der CO₂-Emissionen im Jahr 2050 um 80 bis 95 % bzgl. 1990) mit der heutigen Technologie zu erreichen sind und wie das sektorale Vorgehen dazu sein sollte. Im Referenzpfad sowie im ambitioniertesten 95%-Pfad wird dabei angenommen, dass fossile Rohstoffe für die stoffliche Nutzung im Jahr 2050 in der Chemieindustrie verwendet werden müssen [38]. Das erfolgt unter der Annahme des heutigen Technologie-Reifegrads verschiedener (Schlüssel-)Technologien.

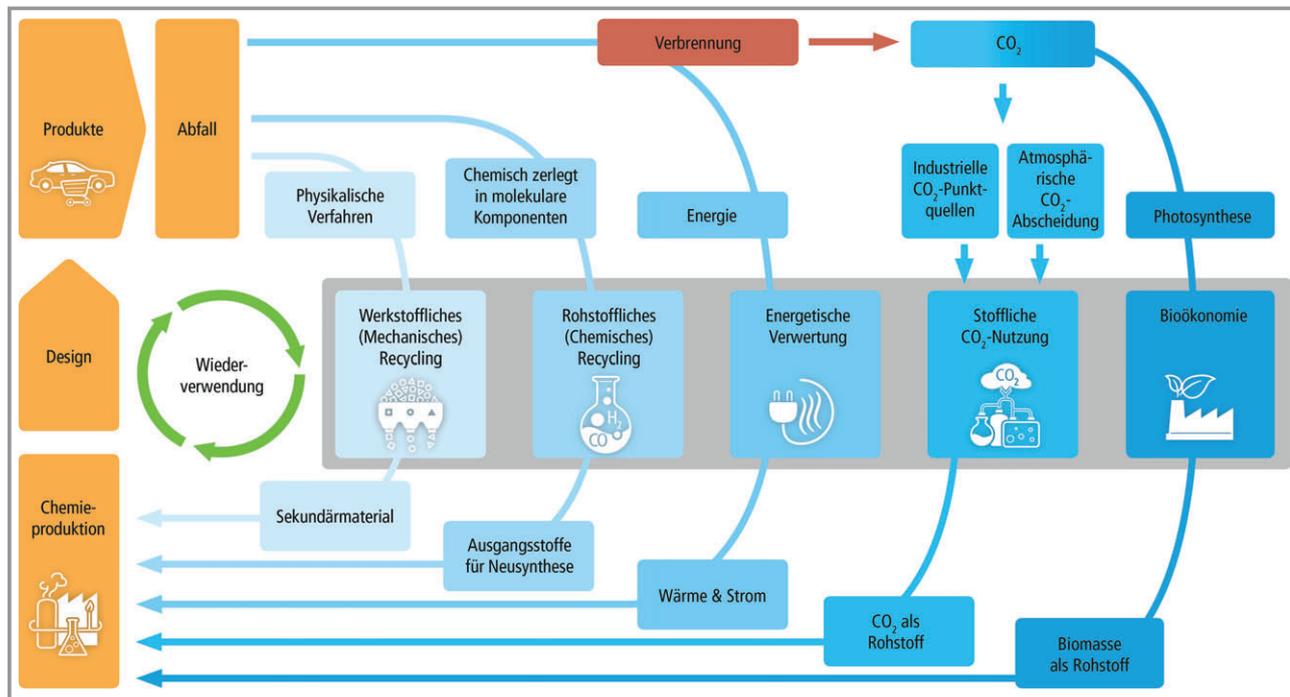


Abbildung 8. Mögliche Kreisläufe von Kohlenstoff in der zirkulären Wirtschaft.

Eine zukünftige klimaneutrale Gesellschaft benötigt: (i) erneuerbare Energiequellen, (ii) CO₂-Recyclingtechnologien und (iii) integrierte Prozessketten, die erneuerbare Energiequellen und CO₂-Recyclingtechnologien miteinander kombinieren. Chemische Energieträger auf Kohlenstoffbasis, die sich durch ihre hohe Energiedichte auszeichnen, werden weiterhin für die chemische Produktion, Kraftstoffe (Langstrecke, Schiff- und Luftfahrt) und die langfristige Energiespeicherung benötigt. In der postfossilen Wirtschaft wird Kohlenstoff aus Biomasse und anthropogenen Abfällen verfügbar sein, die durch Materialrückgewinnung [39] oder durch Abscheidung und Verwertung recycelt werden müssen, um klimaneutrale Produktions- und Energieversorgungssysteme zu entwickeln.

Verschiedene Forschungsprojekte, die sich mit CO₂-Recyclingtechnologien und integrierten Prozessketten von erneuerbaren Energiequellen und CO₂-Recyclingtechnologien beschäftigen, sind in Abb. 9 dargestellt. Sie umfassen u. a. Themen wie:

- CO₂ als Grundstoff (carbon capture and utilization)
- Recycling von Verbundmaterialien und Kunststoffen
 - Kunststoff- und Polymerrecycling
 - Depolymerisation
 - Pyrolyse
 - Vergasung
 - Verbrennung und CO₂-Gewinnung
- Bioökonomie und Bioaffinerie
- alternative synthetische Kraftstoffe
- Carbon-Capture-Technologien
- Industrieller Symbiose
- Elektrolyse und Elektrosynthese

Für die stoffliche Nutzung von CO₂ aus industrieller Punktquellen ist die industrielle Symbiose unverzichtbar. Diese Symbiose zwischen Industrieunternehmen verschiedener Branchen erfordert jedoch eine gewisse Kontinuität hinsichtlich der Bedarfe an Materialien (Neben- und Abfallströme) und Energien (industrieller Abwärme). Dieser symbiotische Austausch wird von vielen Autoren als Vorteil gesehen. Vor dem Hintergrund schnell wechselnder Rahmenbedingungen, die die beschleunigte globale Innovation hervorruft, ist aber bisher nicht klar, ob industrielle Symbiose wirklich ein Ansatz ist, der in Zukunft verstärkt genutzt wird.

Die Implementierung von CO₂ als Ausgangsstoff erfordert eine energetische Aktivierung verbunden mit der Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energien, was zu einer neuen Wirtschaftsstruktur führt. Der Übergang wird als Sektorkopplung bezeichnet und beschreibt die Vernetzung der Sektoren Energiewirtschaft und Industrie, um ihr Zusammenspiel zu optimieren.

Eine nahezu treibhausgasneutrale Chemieproduktion bis 2050 ist technologisch denkbar [40]. Voraussetzung für die Erforschung, Entwicklung und Implementierung alternativer Prozesstechnologien durch Unternehmen ist ihre Wirtschaftlichkeit. Ambitionierte Ziele sind mit hohen Kosten verbunden, die nicht an den Kunden weitergegeben werden können. Zudem produzieren abgeschriebene fossile Bestandsanlagen billiger als zirkuläre defossilisierte Neuanlagen. Die Defossilisierung von Unternehmen kann nur gelingen, wenn diese wettbewerbsfähig bleiben. Die wichtigste Voraussetzung ist jedoch die Verfügbarkeit von kostengünstigem Strom in sehr großen Mengen. Beides kann nur

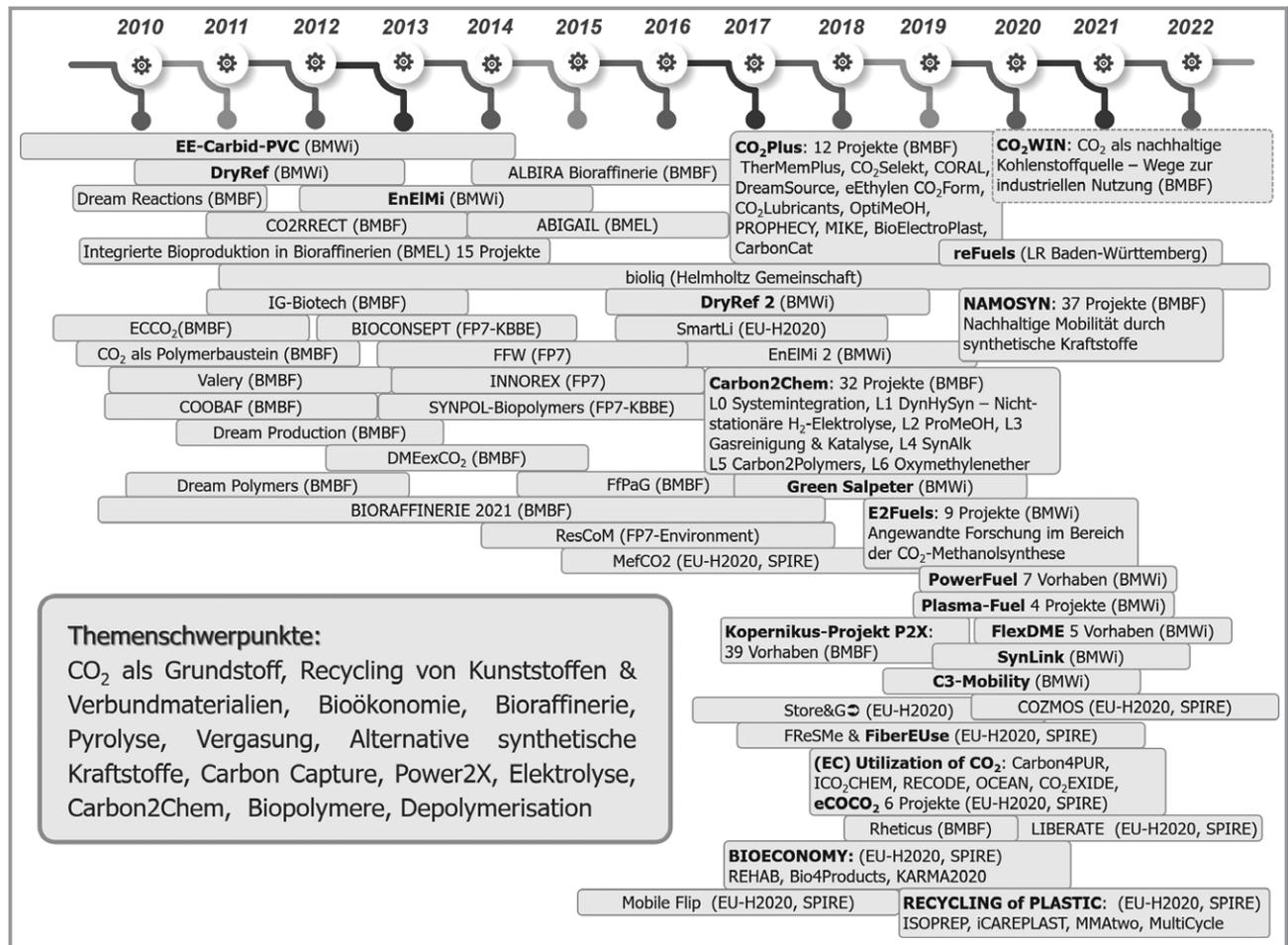


Abbildung 9. Zeitliche Übersicht ausgewählter Forschungsprojekte mit einem Bezug zur Schließung von Stoffkreisläufen bzw. zur zirkulären Wirtschaft in der Prozessindustrie.

durch unterstützende und steuernde staatliche Maßnahmen und Rahmenbedingungen realisiert werden, die diesen Transformationsprozess begleiten, um ihn zu beschleunigen [40].

4 Fazit und Ausblick

Das Chemieingenieurwesen wird zukünftig entscheidende Beiträge auf dem Weg zu defossilisierten und flexibilisierten Wertschöpfungsketten leisten. Wichtig ist es, die nötigen Technologien zu entwickeln und die Entscheidungen für einen Übergang in eine postfossile Ära heute zu treffen. Eine Voraussetzung für den Erfolg dieses Übergangs ist ein ausreichendes Angebot von Elektrizität aus erneuerbaren Quellen sowie die Entwicklung von Prozess-Knowhow, um geschlossene Kohlenstoff-basierte Wertschöpfungsketten zu implementieren.

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi.IIC6) für die Förderung der Begleitforschung des Forschungsnetzwerkes Energie in Industrie und Gewerbe (EE4InG, FKZ: 03ET1630B) sowie allen beteiligten Kollegen und Kooperationspartnern.

Literatur

- [1] *Branchenporträt der deutsch. chem.-pharm. Industrie 2017*, Verband der chemischen Industrie, Frankfurt **2018**.
- [2] *Von den Megatrends zum Geschäftserfolg*, Provadis School of International Management and Technology AG, Frankfurt **2015**.
- [3] *Die deutsche chemische Industrie 2030 – VCI-Prognos-Studie – Update*, Verband der chemischen Industrie, Frankfurt **2017**.
- [4] *Chemie 4.0 – Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch*, Verband der chemischen Industrie, Frankfurt **2017**.
- [5] N. Kockmann, *Chem. Ing. Tech.* **2018**, *90* (11), 1621–1627. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201800135>
- [6] *Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaften PAAT und SuPER*, Dortmund, November **2019**.
- [7] *58. Tutzing-Symposion Separation Units 4.0*, Tutzing, Oktober **2019**.
- [8] *Whitepaper "Digitalisierung in der Chemieindustrie"*, DECHEMA e.V., Frankfurt **2016**.
- [9] T. Kuhn, *Digitaler Zwilling*, Lexikon Gesellschaft für Informatik, Springer, Berlin **2017**. <https://gi.de/informatiklexikon/digitaler-zwilling>
- [10] F. Tao, Q. Qi, L. Wang, A. Y. C. Nee, *Engineering* **2019**, *5* (4), 653–661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- [11] A. Bamberg, L. Urbas, S. Bröcker, *Was den digitalen Zwilling zum genialen Kompagnon macht*, Jahrestreffen der FG PAAT, Dortmund, November **2019**.
- [12] *KEEN-Ergebnisworkshop: KI-Inkubator-Labore in der Prozessindustrie*, DECHEMA e.V., Frankfurt **2019**.
- [13] *Status Report Process INDUSTRIE 4.0 – The Age of Modular Production*, ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V., Frankfurt, März **2019**.
- [14] *Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 4.0“*, VDI-Thesen und Handlungsfelder, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik/NAMUR, Düsseldorf **2015**.
- [15] *Roadmap Chemical Reaction Engineering*, 2nd ed., DECHEMA e.V., Frankfurt **2017**.
- [16] C. Fleischer-Trebes, N. Krasberg, C. Bramsiepe, N. Kockmann, *Chem. Ing. Tech.* **2017**, *89* (6), 785–799. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201600083>
- [17] S. Buchholz, *Final Report Summary – F³ FACTORY*, **2014**.
- [18] *Fast, flexible, modular production technology provides platform for future European growth*, F3 Factory, **2014**. <https://cordis.europa.eu/docs/results/228867/final1-f3-factory-keymessages-and-casestudy-summaries.pdf> (abgerufen am 21. Januar 2020)
- [19] *Modulare Anlagen: Flexible chemische Produktion durch Modularisierung und Standardisierung*, DECHEMA e.V., Frankfurt **2017**.
- [20] J. Bernshausen, A. Haller, T. Holm, M. Obst, J. Ladiges, *atp edition* **2016**, *58* (01–02), 72. DOI: <https://doi.org/10.17560/atp.v58i01-02.554>
- [21] S. D. Pask, O. Nuyken, Z. Cai, *Polym. Chem.* **2012**, *3*, 2698. DOI: <https://doi.org/10.1039/c2py20237a>
- [22] C. Lang-Koetz, in *Die frühe Phase des Innovationsprozesses* (Eds: T. Abele), Vol. 22, Springer Fachmedien, Wiesbaden **2016**.
- [23] VDI 4800 Blatt 1:2016-02, *Ressourceneffizienz – Grundlagen, Prinzipien & Strategien*, Beuth Verlag, Berlin **2016**.
- [24] H. Rohn et al., *Identifikation von Technologien, Produkten und Strategien mit hohem Ressourceneffizienzpotenzial – Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses*, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal **2009**.
- [25] A. L. Stankiewicz, J. A. Moulijn, *Chem. Eng. Prog.* **2000**, *96* (1), 22–34.
- [26] A. Hüther, A. Geißelmann, H. Hahn, *Chem. Ing. Tech.* **2005**, *77* (11), 1829–1837. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.200500144>
- [27] F. J. Keil, *Rev. Chem. Eng.* **2018**, *34* (2), 135–200. DOI: <https://doi.org/10.1515/revce-2017-0085>
- [28] K. Saulich, *VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 24: Ressourceneffizienz durch Prozessintensivierung*, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin **2019**.
- [29] M. Kleiber, *Chem. Ing. Tech.* **2018**, *90* (12), 1897–1909. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201800152>
- [30] Z. Wang, T. Yang, Z. Liu, S. Wang, Y. Gao, M. Wu, *Chem. Eng. Process.* **2019**, *139*, 78–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2019.03.020>
- [31] E. Hansjosten, A. Wenka, A. Hensel, W. Benzinger, M. Klumpp, R. Dittmeyer, *Chem. Eng. Process.* **2018**, *130*, 119–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2018.05.022>
- [32] Pressemitteilung, *Evonik gelingt mit Entwicklung eines neuartigen Reaktors eine kleine Revolution*, Evonik, Essen, 07. November **2019**.
- [33] *Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung*, Vereinte Nationen, New York **2015**.
- [34] *Sustainable Development Goals*, Vereinte Nationen, New York **2015**.
- [35] J. D. Sachs, G. Schmidt-Traub, M. Mazzucato, D. Messner, N. Nakicenovic, J. Rockström, *Nat. Sustainability* **2019**, *2* (9), 805–814. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0352-9>
- [36] *Energiestatistik für die chem.-pharm. Industrie in Deutschland: Verbrauch, Rohstoffbasis, Preise, Kosten, Klimaschutz*, Verband der chemischen Industrie, Frankfurt **2019**.
- [37] *Argumente und Positionen – Chemie 4.0 – Zirkuläre Wirtschaft vorantreiben*, Verband der chemischen Industrie, Frankfurt **2019**.
- [38] P. Gerbert et al., *Klimapfade für Deutschland*, Boston Consulting Group, München, Prognos, Basel **2018**.
- [39] *Waste framework directive, 2008/98/EC Annex II: Recycling/reclamation of organic substances which are not used as solvents*, Europäische Kommission, Brüssel **2008**.
- [40] R. Geres et al., *Roadmap Chemie 2050 - Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland*, FutureCamp Climate GmbH, München, DECHEMA e.V., Frankfurt **2019**.