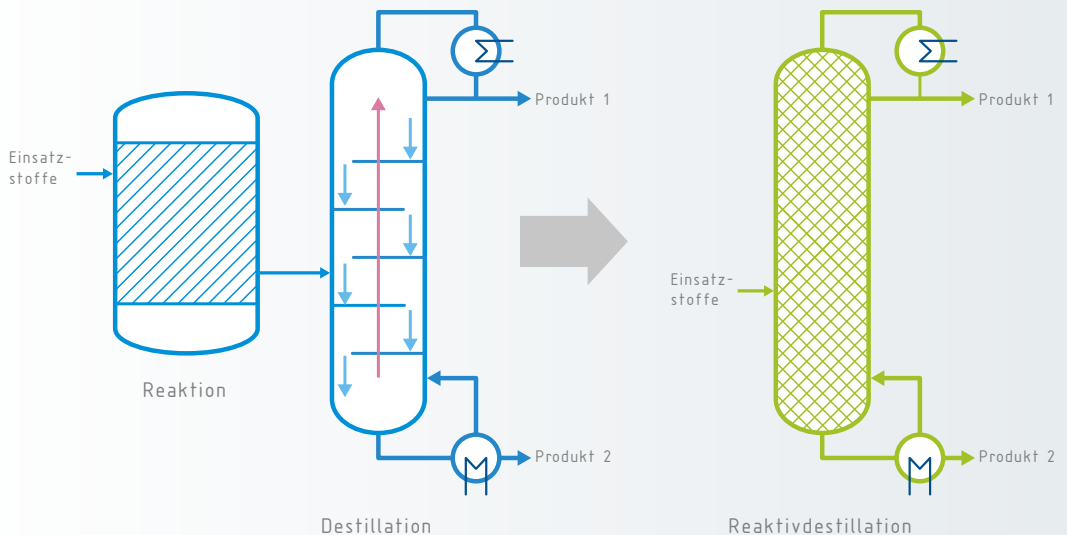


VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 24

Ressourceneffizienz durch
Prozessintensivierung

VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 24: Ressourceneffizienz durch Prozessintensivierung

Autorin:

Dr.-Ing. Katja Saulich, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir danken Herrn Dr. rer. nat. Patrick Löb, stellv. Bereichsleiter Energie- und Chemietechnik, Fraunhofer-Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme IMM, für seine fachliche Unterstützung.

Die Kurzanalyse wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit erstellt.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Bertolt-Brecht-Platz 3

10117 Berlin

Tel. +49 30-27 59 506-0

Fax +49 30-27 59 506-30

zre-info@vdi.de

www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © VDI ZRE

Druck: Bonifatius GmbH, Karl-Schurz-Straße 26, 33100 Paderborn

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen:
Kurzanalyse Nr. 24

Ressourceneffizienz durch
Prozessintensivierung

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
TABELLENVERZEICHNIS	5
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
1 EINLEITUNG	7
2 POTENZIALE VON PROZESSINTENSIVIERUNG	9
2.1 Definition	9
2.2 Abgrenzung zu klassischen Strategien	12
2.3 Wissenschaftliches Fundament	14
2.4 Ökologische und ökonomische Vorteile	17
2.5 Anwendung	21
2.5.1 Ganzheitlicher Ansatz	23
2.5.2 Reaktionstechnischer Ansatz	25
2.6 Wege zu einem intensivierten Prozess	25
3 VORSTELLUNG DER TECHNOLOGIEBANDBREITE	28
3.1 Verfahrenstechnische Apparate und Technologien	30
3.2 Modulare Anlagen	34
4 UMSETZUNG IN DIE INDUSTRIELLE PRAXIS	38
4.1 Vorgehen bei der Umsetzung	38
4.2 Herausforderungen bei der Umsetzung	41
4.3 Umsetzungsbeispiele	44
4.3.1 Verfahrenstechnische Apparate und Technologien	45
4.3.2 Modulare Anlagen	51
5 FAZIT	56
LITERATURVERZEICHNIS	58
ANHANG A	65
ANHANG B	66

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Konventioneller und intensivierter Prozess bei (a) Prozessverstärkung (Verkleinerung des Apparates) und (b) Prozessintegration	11
Abbildung 2: Wesentliche Merkmale von drei Strategien zur Verbesserung der Prozesseffizienz	13
Abbildung 3: Ökologische und ökonomische Vorteile von Prozessintensivierung	18
Abbildung 4: Anwendungsschwerpunkte der Prozessintensivierung im chemischen Herstellungsprozess	22
Abbildung 5: Elemente der Prozessintensivierung und ausgewählte Beispiele	24
Abbildung 6: Vier Entwicklungsstufen: von der Forschung bis zur industriellen Anwendung	38
Abbildung 7: Hindernisse bei der Einführung von PI-Technologien in die industrielle Praxis	41

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Prozessbezogene Vor- und Nachteile von Intensivierungstechnologien	17
Tabelle 2:	Ressourcen-, prozess- und wirtschaftsbezogene Vorteile von PI	19
Tabelle 3:	Zuordnung von Intensivierungstechnologien zu prozessbezogenen Wirkungsbereichen	29
Tabelle 4:	Anwendungsbereiche, Vor- und Nachteile prozessintensivierter Reaktoren	31
Tabelle 5:	Computergestützte Werkzeuge zur Entwicklung von PI-Technologien	40
Tabelle 6:	Ausgewählte Begriffsdefinitionen der letzten 25 Jahre von Prozessintensivierung nach Keil	65
Tabelle 7:	PI-Technologien mit hohem und mittlerem Energieeinsparpotenzial	66

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CO₂	Kohlenstoffdioxid
dt.	deutsch
engl.	englisch
EU	Europäische Union
fl	flüssig
fl/fl	flüssig/flüssig
LCA	Lebenszyklusanalyse (life cycle assessment)
m²	Quadratmeter
m³	Kubikmeter
μ	Micro (10 ⁻⁶)
PI	Prozessintensivierung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 EINLEITUNG

Prozessintensivierung (PI) ist eine zentrale Strategie zur Steigerung der Effizienz und Flexibilität verfahrenstechnischer Prozesse in der stoffwandelnden Industrie. Aus ihr gehen innovative Apparate und Technologien hervor, die eine Prozessführung in anderen Prozessparameterbereichen (z. B. höhere Produktkonzentration) ermöglichen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren können die Prozessgrenzen bei intensivierten Prozessen überwunden werden. Dies resultiert in einer deutlichen Steigerung der Prozesseffizienz und -flexibilität.

Unternehmen der stoffumwandelnden Industrie stehen in Zeiten steigender Rohstoffkosten, verstärkten Wettbewerbs, kürzerer Produktlebenszyklen und variierenden Nachfrageverhaltens von Konsumenten vor einer besonderen Herausforderung. Eine Steigerung von Prozesseffizienz und -flexibilität in der Herstellung chemischer Produkte ist eine Strategie, um diese Herausforderungen zu meistern.

Die Anwendung von Methoden und Maßnahmen der Prozessintensivierung führt zu kleineren oder kompakteren Anlagen. Diese sind flexibler nutzbar, was geringere Material- und Energieverbräuche, reduzierte Abfallmengen, geringere Betriebs- und Investitionskosten sowie höhere Betriebssicherheiten nach sich zieht. Der hieraus resultierende effizientere Umgang mit Rohstoffen und Energie sowie eine Kostenreduktion sichern und erhöhen die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen der stoffumwandelnden Industrie. Damit ergeben sich zugleich ökologische und ökonomische Vorteile.

Mit dem Ziel, chemische und biotechnologische Produktionsprozesse zu verbessern, wurden bisher zahlreiche intensivierte Technologien, Anlagen und Verfahren in der Industrie und in wissenschaftlichen Einrichtungen entwickelt. Ein Teil davon wird in der industriellen Praxis, in erster Linie als Pilot- oder Demonstratoranlage, angewendet. Für Entwickler und Anwender ist die Prozessintensivierung wie eine „Toolbox“ (dt.: Werkzeug-

kasten), die zahlreiche Anwendungsbeispiele für innovative chemische, thermische und mechanische Verfahrenstechniken versammelt.¹

Die Entwicklung neuer Technologien kann grundsätzlich zu innovativen Lösungen führen, die ressourceneffizientere² Prozesse und Produkte hervorbringen.³ Das Ressourceneffizienzpotenzial intensivierter Prozesse und Technologien wird als hoch eingestuft.⁴ Dies begründet sich in erster Linie durch den minimierten Rohstoff- und Energieeinsatz im Produktionsprozess, den reduzierten Materialeinsatz bei kompakteren Apparaten und Anlagen sowie eine Verringerung des Abfallaufkommens.

Ziel der Kurzanalyse ist es, Anwender und Entwickler von Technologien und Apparaten in kleineren und mittleren Unternehmen bezüglich der Methoden und Maßnahmen von Prozessintensivierung und deren Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz zu informieren. Dies umfasst

- die Vorstellung ökologischer und ökonomischer Vorteile,
- das Umreißen der Technologiebandbreite,
- die Darlegung möglicher Herausforderungen bei der Umsetzung sowie
- die Vorstellung von Ressourceneffizienzpotenzialen anhand von Umsetzungsbeispielen.

¹ Vgl. Barecka et al. (2018), S. 17.

² Der Begriff Ressourceneffizienz wird in dieser Kurzanalyse nach der Definition der VDI Richtlinie 4800 Blatt 1 (S. 12 f.) verwendet. Danach ist Ressourceneffizienz das Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Einsatz natürlicher Ressourcen. Unter natürlichen Ressourcen werden erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, Energieressourcen, Luft, Wasser, Fläche und Ökosystemleistungen verstanden.

³ Vgl. Lang-Koetz (2016), S. 54.

⁴ Vgl. Rohn et al. (2009), S. 22.

2 POTENZIALE VON PROZESSINTENSIVIERUNG

2.1 Definition

In den 1970er Jahren ist die Prozessintensivierung als Strategie zur Entwicklung komplett neuer, bahnbrechender Technologien in der Verfahrenstechnik zum ersten Mal aufgekommen.⁵ Die Hauptmotivation der Entwicklung erster Prozessintensivierungstechnologien lag dabei in der Reduktion der Größe und der Investitionskosten von Produktionsanlagen in der chemischen Industrie.⁶

Mit dem einhergehenden Fortschritt der Technologieentwicklung in den darauffolgenden Dekaden wurden zahlreiche unterschiedliche Begriffsdefinitionen der Terminologie Prozessintensivierung in der Literatur veröffentlicht. Bis jetzt konnten sich allerdings Wissenschaftler und Anwender nicht auf eine einheitliche Definition einigen.⁷ Eine chronologisch geordnete Auswahl definitorischer Aussagen der letzten 25 Jahre nach Keil⁸ findet sich im Anhang A (Tabelle 6, S. 65).

In den Anfangsjahren der Entwicklung von Prozessintensivierungstechnologien beschränkten sich die Definitionen auf die Reduzierung der Anlagengröße (100- bis 1000-fach) und die damit einhergehende Verringerung von Investitionskosten bei gleichbleibender Produktionsmenge.^{9, 10} In späteren Definitionen kamen die Aspekte Steigerung der Prozesseffizienz und Entwicklung innovativer Technologien und Apparate/Anlagen¹¹ hinzu.¹² Werden alle in Anhang A aufgeführten Definitionen betrachtet, lassen sich folgende Kernaspekte der Prozessintensivierung herausstellen:

⁵ Vgl. Barecka et al. (2018), S. 17.

⁶ Vgl. Boodhoo und Harvey (2013), S. 2.

⁷ Vgl. Keil (2018), S. 135.

⁸ Vgl. Keil (2018), S. 136.

⁹ Vgl. Ramshaw und Arkley (1983), S. 29 ff.

¹⁰ Vgl. Cross und Ramshaw (1986), S. 293 ff.

¹¹ Eine Anlage setzt sich i. d. R. aus mehreren Apparaten zusammen. Die Anwendung von Prozessintensivierungskonzepten kann sich auf einen Apparat, mehrere Apparate oder eine Anlage beziehen. Um die Lesbarkeit zu erhöhen, ist in dieser Kurzanalyse bei allgemeinen Betrachtungen nur von Apparaten die Rede.

¹² Vgl. Stankiewicz und Moulijn (2002), S. 1920.

Durch die Anwendung von Prozessintensivierung

- (1) werden i. d. R. **geringere Apparatvolumina** bei gleichbleibender Produktionsmenge erzielt,
- (2) wird eine **Effizienzsteigerung** von Prozessen oder Prozessketten erzielt,
- (3) werden **innovative Technologien** und Apparate entwickelt.

Die Apparatvolumina in einer Anlage können auf zwei Wegen verringert werden (Abbildung 1):

- **Prozessverstärkung:** Es wird der Stoff- und Wärmeaustausch durch eine deutliche Verkleinerung eines Apparates oder durch Verwendung von Apparateeinbauten¹³ intensiviert.
- **Prozessintegration:** Es werden zwei oder mehrere Grundoperationen¹⁴ in einem Apparat durchgeführt. Dadurch wird die Anzahl der insgesamt benötigten Prozessschritte reduziert.¹⁵

Eine deutliche Effizienzsteigerung von einem Prozess oder einer Prozesskette bewirkt meistens eine ökologische und ökonomische Verbesserung. Beispielsweise kann eine Verminderung des Rohstoff- und Energieverbrauchs, der Reaktionszeit, der Flächen-/Raumnutzung und der Abfallmenge erzielt werden. In vielen Fällen werden zudem die Prozesssicherheit und die Produktqualität erhöht.

Die durch die Umsetzung der Prozessintensivierungsstrategie hervorgehenden Technologien oder Apparate stellen eine Innovation dar. Sie bilden demnach ein völlig neues und vorher noch nie da gewesenes Technologie- oder Apparatkonzept ab.

¹³ Vgl. VDE (2007), S. 10.

¹⁴ Eine Grundoperation (engl.: Unit Operation) besteht aus nur einem physikalischen oder chemischen Vorgang. Die Grundoperationen lassen sich in drei verschiedene Klassen unterteilen: Änderung der Stoffeigenschaften (z. B. Kühlen, Trocknen), Änderung der Stoffzusammensetzung (z. B. Destillieren, Filtrieren) und Änderung der Stoffart (z. B. Polymerisieren, Oxidieren).

¹⁵ Vgl. Albert et al. (2007), S. 29.

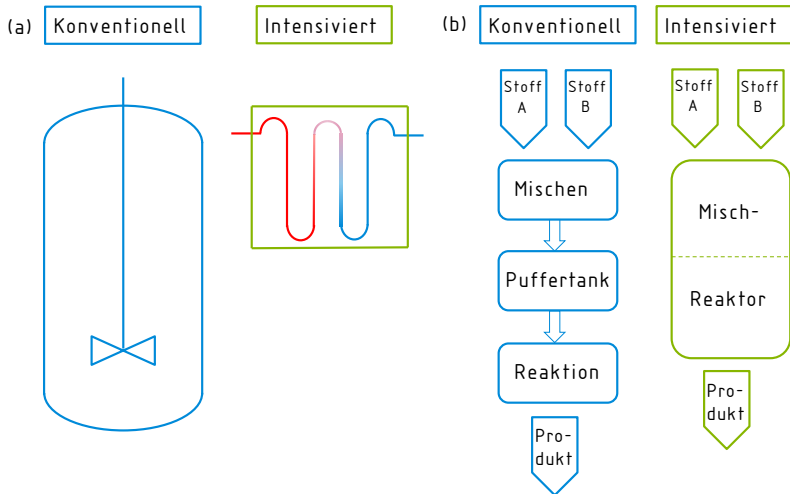


Abbildung 1: Konventioneller und intensivierter Prozess bei (a) Prozessverstärkung (Verkleinerung des Apparates) und (b) Prozessintegration

Die Definition der Europäischen Roadmap für Prozessintensivierung umfasst die wesentlichen definitorischen Aspekte von Prozessintensivierung und weist einen hohen Informationsgehalt auf. Daher wird für das Verständnis und die Verwendung in dieser Kurzanalyse diese Definition zugrunde gelegt.

Definition von Prozessintensivierung nach der Europäischen Roadmap für Prozessintensivierung:¹⁶ „Prozessintensivierung ist eine Zusammenstellung **radikal innovativer Prinzipien** (Paradigmenwechsel) für **Apparate und Prozesse**, welche hinsichtlich der **Effizienz** von Prozessen oder Prozessketten, **Investitions- und Betriebskosten, Qualität, Abfall, Prozesssicherheit** (und andere Aspekte) eine **signifikante Verbesserung** mit sich bringen kann.“

¹⁶ Anxionnaz et al. (2007a), S. 9.

2.2 Abgrenzung zu klassischen Strategien

Eine Prozessverbesserung und die damit einhergehende Effizienzsteigerung hat i. d. R. immer das Ziel, die stoffliche und energetische Nutzung zu verbessern sowie die Prozesssicherheit und -stabilität zu erhöhen. Zu den klassischen Strategien zur Verbesserung eines Prozesses oder einer Anlage zählen Prozessoptimierung und Prozesssystemtechnik. Als weitere innovative Strategie mit enormen Effizienzsteigerungspotenzialen ist die Prozessintensivierung hinzugekommen. In ihren Merkmalen (Ziel, Methodik und Interdisziplinarität) unterscheiden sich die drei Strategien voneinander (Abbildung 2).

Prozessoptimierung

Bei der Durchführung von Maßnahmen zur Prozessoptimierung werden bestehende einzelne Prozesse oder Apparate verbessert. Basierend auf bestehenden oder zu erstellenden Prozessmodellen werden die Prozessparameterwerte hin zu optimalen Werten verändert. Die Interaktion mit anderen Fachbereichen ist dabei gering. Bei der Lösung numerischer Probleme ist in einigen Anwendungsfällen eine Zusammenarbeit mit Mathematikern notwendig.

Prozesssystemtechnik

Bei Maßnahmen zur Verbesserung eines Gesamtprozesses oder einer gesamten Anlage werden die Parameteroptima über den gesamten Prozess oder den kompletten Anlagenbereich ermittelt. Dabei basiert die Ermittlung der globalen Parameteroptima auf bestehenden Prozess- und Anlagenkonzepten. Die dazu notwendigen Modelle sind i. d. R. sehr komplex und erfordern eigene Softwarelösungen. Die dafür notwendige interdisziplinäre Zusammenarbeit erstreckt sich von Mathematikern, Informatikern bis hin zu Naturwissenschaftlern.

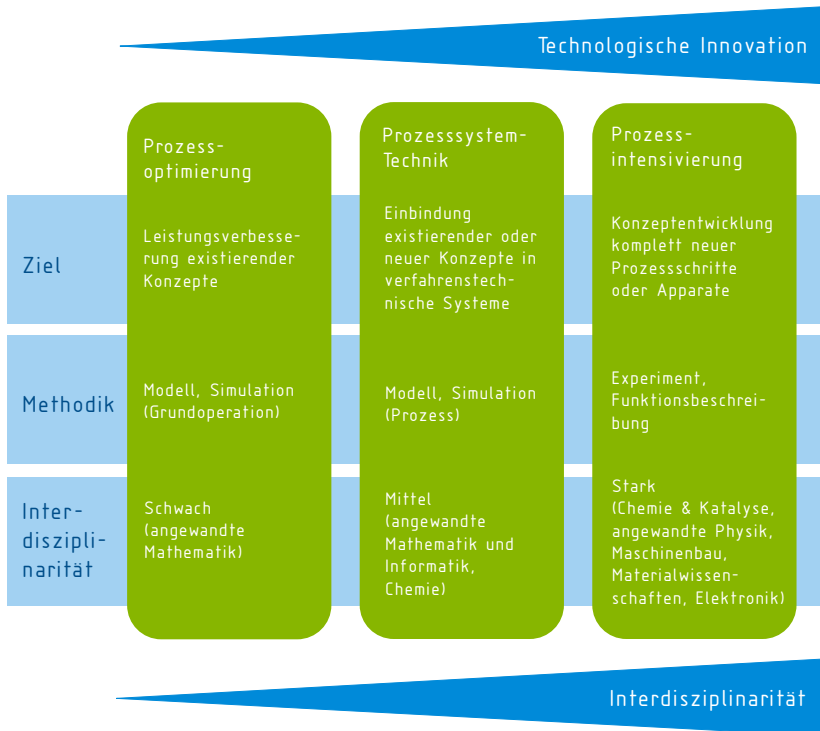


Abbildung 2: Wesentliche Merkmale von drei Strategien zur Verbesserung der Prozesseffizienz^{17, 18}

Prozessintensivierung

Prozessverbesserungen erfolgen durch komplett neue Prozessschritte oder neue Apparate/Anlagen. Diese verfahrenstechnischen Konzepte, die sich durch ein hohes Innovationspotenzial auszeichnen, werden durch experimentelle Untersuchungen in Labor und Technikum entwickelt. Dazu werden zunächst neue Funktionalitäten beschrieben und erste Überlegungen zu einem Modell angestellt. Zur Entwicklung dieser komplett neuen verfahrenstechnischen Konzepte ist eine interdisziplinäre und enge Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren in hohem Maße

¹⁷ Vgl. Anxionnaz et al. (2007a), S. 24.

¹⁸ Vgl. Van Gerven und Stankiewicz (2009), S. 2471.

notwendig. Dabei gilt es, jeweils die Fachsprache der eigenen Disziplin in die Sprache einer anderen Fachdisziplin als Grundlage für eine gemeinsame, störungsfreie Kommunikation zu übersetzen.

2.3 Wissenschaftliches Fundament

Nahezu jeder chemische Prozess wird durch reaktionskinetische oder Energie-/Stofftransport-Phänomene limitiert.¹⁹ Dies wirkt sich ungünstig auf die Prozessökonomie aus: längere Reaktionszeiten, geringere Ausbeuten und verminderte Selektivitäten. Prozessintensivierung kann hier Abhilfe schaffen. Sie bildet ein methodisches Fundament und ermöglicht, die angesprochenen Beschränkungen zu überwinden oder diese zumindest drastisch zu reduzieren.²⁰ Van Gerven und Stankiewicz haben vier Hauptprinzipien identifiziert, auf denen das methodische Fundament basiert:²¹

- (1) **Maximiere die Effektivität von intra- und intermolekularen Ereignissen.** Die Mikrokinetik einer Reaktion beschreibt die intra- und intermolekularen Ereignisse eines chemischen Prozesses. Sie bestimmt maßgeblich die Höhe der umgesetzten Stoffmenge im Rahmen einer bestimmten Selektivität mit. Bei einer für das Produktionsziel nicht optimalen Reaktionskinetik können mit Nebenprodukten und nicht umgesetzten Einsatzstoffen verunreinigte Produkte entstehen, die aufwendig gereinigt werden müssen. Eine optimale Reaktionskinetik bildet die Grundlage für eine Maximierung von Ausbeute und Selektivität und minimiert den Reinigungsaufwand.
- (2) **Gib jedem Molekül die gleiche Prozesserrfahrung.** Wenn alle Moleküle die gleiche Historie aufweisen, entspricht das Prozessergebnis einer gewünschten und zeitlich konstanten Produktqualität bei minimalem Abfallaufkommen. Folgende Faktoren müssen betrachtet werden, um eine gleiche Prozesserrfahrung von Molekülen zu erreichen: Meso- und Mikrovermischung, Temperaturgradienten, makroskopische Verweilzeitverteilung, Totzonen oder Bypassströmungen.

¹⁹ Vgl. Stankiewicz und Moulijn (2000), S. 22 ff.

²⁰ Vgl. Grützner et al. (2018), S. 1823.

²¹ Vgl. Van Gerven und Stankiewicz (2009), S. 2466 f.

- (3) **Optimiere die Triebkräfte (auf jeder Ebene) und maximiere die spezifische Oberfläche.** Dieses Prinzip bezieht sich auf den Stoff- und Wärmetransport zwischen zwei Phasen. Um die Stoff- und Wärmetransportmenge bei optimierten oder vorgegebenen Triebkräften (Konzentrationsunterschied oder Temperaturgradient zwischen den beiden Phasen) zu erhöhen, muss die Phasengrenzflächengröße vergrößert werden. Eine Möglichkeit, eine größere Austauschfläche bzw. eine höhere spezifische Oberfläche (m^2/m^3) zu erzielen, ist die deutliche Reduzierung des Reaktorvolumens ($\text{m}^3 \rightarrow \mu\text{m}^3$). Beispielsweise ergibt ein kreisrunder Mikrokanal von $400 \mu\text{m}$ eine spezifische Austauschfläche von ca. $15.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$.
- (4) **Maximiere die synergetischen Effekte von Teilprozessen.** Synergetische Effekte von Teilprozessen sollten, wann immer möglich, beansprucht und verwendet werden. Dies lässt sich insbesondere durch multifunktionale makroskalige Apparate erzielen, wie beispielsweise bei einem reaktiven Trennapparat. Durch die kontinuierliche Abtrennung der Produkte aus der Reaktionsumgebung wird das Reaktionsgleichgewicht in eine ökonomisch günstige Richtung verschoben.

Die vier genannten Prinzipien sind für die Verfahrenstechnik nicht neu. Im verfahrenstechnischen Teilgebiet Prozessintensivierung ist die Umsetzung der vier Prinzipien allerdings Voraussetzung für die Gestaltung eines Prozesses. Durch ihre Anwendung können Prozessgrenzen der „klassischen“ Verfahrenstechnik²² überwunden werden und es sind neue Prozessfenster realisierbar.²³ Beispielsweise sind Ausbeuten und Selektivitäten in einer Höhe möglich, an die bei konventionellen Verfahren nicht zu denken wäre.

Es wird von einem komplett intensivierten Prozess gesprochen, wenn alle vier Prinzipien umgesetzt sind. Bei der Konzeption und Auslegung intensivierter Prozesse finden neben den vier Prinzipien zudem sicherheitstechnische Aspekte Beachtung. Mit dem Hauptziel einer erhöhten Prozesssicherheit geht mit diesen Aspekten gleichzeitig eine verminderte Ressourcenin-

²² Vgl. Kiss (2016), S. 222.

²³ Vgl. Hessel (2009), S. 1655 ff.

anspruchnahme einher. Die sicherheitstechnischen Aspekte werden durch sicherheitsgerichtetes Ausfallverhalten und „safety-by-design“ umgesetzt.²⁴

- **Vermeiden:** keine extra Chemikalien, keine Lösungsmittel, kein Strip-Gas, keine extra Behälter, keine extra Pumpen,
- **Verkleinern:** kleinere Füllmengen, weniger Apparate und geringere Kopplungen,
- **Kontrollieren:** kontinuierliche und sicherheitsgerichtete Prozesskontrolle.

Aufgrund geringerer Weglängen bei der Molekulardiffusion und Wärmeleitung an Grenzflächen, kombiniert mit verbesserten Fluiddynamikeigenschaften, werden durch Prozessintensivierung geringere Stoff- und Wärmetransportwiderstände erzielt. Die dadurch verbesserten Mischungsverhältnisse auf der Molekularebene führen zu verringerten Reaktionsvolumina. Die damit einhergehende Verbesserung des Stoff-/Wärmetransports und der Makrokinetik zieht Umsatzsteigerungen und höhere Selektivitäten bis hin zu maximal möglichen Werten nach sich.²⁵ Zusammenfassend sind die durch Prozessintensivierung hervorgerufenen positiven Effekte für das Reaktionssystem inklusive der damit verbundenen negativen Wechselwirkungen in Tabelle 1 aufgeführt.

Diese positiven Prozesseigenschaften bewirken eine verringerte Apparateanzahl, einen verbesserten Apparatefußabdruck²⁶, eine damit verbundene Minimierung der Investitions- und Betriebskosten sowie ein vermindertes Betriebsrisiko der chemischen Anlage.²⁷ Weitere ökologische und ökonomische Vorteile werden in Kapitel 2.4 erläutert.

²⁴ Vgl. Kiss (2016), S. 222.

²⁵ Vgl. Boodhoo und Harvey (2013), S. 2.

²⁶ Mit einem Apparatefußabdruck sind die von einem oder mehreren Apparaten im Laufe ihres Lebensweges verbundenen stofflichen und energetischen Aufwendungen gemeint.

²⁷ Vgl. Segovia-Hernández und Bonilla-Petriciolet (2016), S. 2.

Tabelle 1: Prozessbezogene Vor- und Nachteile von Intensivierungstechnologien²⁸

Prozesseffekt	Vorteile	Nachteile
Verbesserter Stofftransport	<ul style="list-style-type: none"> • Schnellere Reaktionsgeschwindigkeiten → kleine Apparategrößen • Reduzierung von Nebenproduktmengen → verringerte Abfallmengen • I. d. R. höhere Selektivitäten, Ausbeuten und Produktqualitäten 	-
Verbesserter Energietransport	<ul style="list-style-type: none"> • Verringerter Auftreten von „Hot Spots“ (dt.: Bereiche höherer thermischer Energie) → verbesserte Kontrolle der Temperaturverteilung • Reduzierung des Energiebedarfs • Verringerung der Nebenreaktionen 	-
Verringerter Lösemiteleinsatz	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhter Stoffwirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • Potenzielles Risiko für eine abnehmende Anlagensicherheit • Potenzielles Risiko für eine durchgehende Reaktion bei unzureichendem Wärmetransport
Verringerte Apparategröße	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierte Mengen gefährlicher Stoffe in der Produktionsanlage • Vereinfachte Maßstabsvergrößerung des Apparates • Geringere Anzahl an Reinigungszyklen 	<ul style="list-style-type: none"> • Potenzielles Risiko für stoffbezogene Verstopfungen in der Produktionsanlage • Weniger Anreiz, bei der Prozessentwicklung gefährliche Stoffe zu entfernen • Potenziell kompliziertere Reinigungs- und Wartungsmöglichkeiten

2.4 Ökologische und ökonomische Vorteile

Hauptsächliche Ziele der Prozessintensivierung sind eine Steigerung der ökologischen und ökonomischen Effizienz bei chemischen und biotechnologischen Verfahren sowie die Erhöhung der Betriebssicherheit und die Erzeugung qualitativ hochwertigerer Produkte (Abbildung 3).²⁹ Dies führt

²⁸ Vgl. Jiménez-González und Constable (2011), S. 414.

²⁹ Vgl. Agar et al. (2017), S. 29.

zu kleineren, günstigeren, saubereren, sichereren sowie material- und energieeffizienteren verfahrenstechnischen Anlagen.^{30, 31}

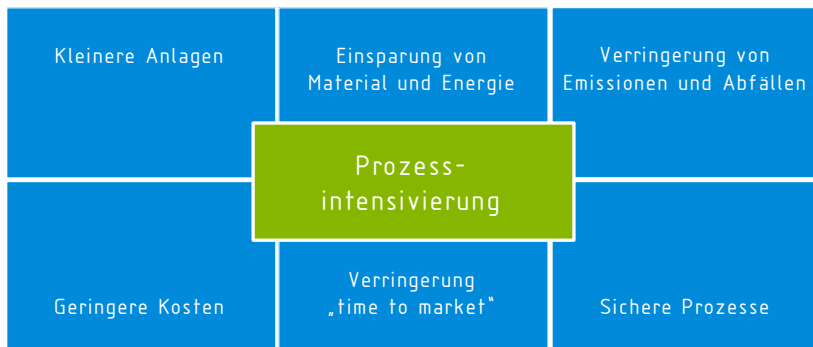


Abbildung 3: Ökologische und ökonomische Vorteile von Prozessintensivierung³²

Die BHR-Gruppe, ein Anbieter für Ingenieurleistungen im Bereich Prozessintensivierung, macht quantitative Angaben zu Einsparungen von natürlichen Ressourcen und Kosten, die in bereits umgesetzten Intensivierungsprojekten erzielt wurden:^{33, 34}

- Reduktion des Energieverbrauchs um 70 %,
- höhere Ausbeuten verglichen mit komplett optimierten Batchprozessen,
- Verringerung der Verunreinigungen in den Produkten um 90 %,
- Reduktion der Kapitalkosten um 60 %,
- Erhöhung der Anlagensicherheit bei potenziell umweltgefährdenden Prozessen um 99,8 % durch Reduktion des Reaktorvolumens.

³⁰ Vgl. Segovia-Hernández und Bonilla-Petriciolet (2016), S. 2.

³¹ Vgl. SUSCHEM (2019).

³² Vgl. Anxionnaz et al. (2007a), S. 23.

³³ Vgl. Jiménez-González und Constable (2011), S. 437.

³⁴ Vgl. BHR Group (kein Datum).

Die in diesem Anwendungsbeispiel erzielten Einsparungen sind im höheren zweistelligen Bereich angesiedelt. Diese Einsparungen beziehen sich jedoch nur auf die untersuchten Projekte, denn die ressourcen- und kostenbezogenen Einsparungen müssen stets in Abhängigkeit zur Anwendung individuell bestimmt werden, da sie von dem jeweiligen Einsatzfall und der eingesetzten Prozessintensivierungstechnologie abhängen.

In Tabelle 2 ist die positive Wirkung von Prozessintensivierung bezogen auf die Ressourceninanspruchnahme, den Prozess und die Ökonomie zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 2: Ressourcen-, prozess- und wirtschaftsbezogene Vorteile von PI³⁵

Vorteile der Prozessintensivierung		
Natürliche Ressourcen	Prozess	Ökonomie
<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion Materialverbrauch (Rohstoffe, Hilfs- und Betriebsstoffe) • Reduktion Energieverbrauch • Reduktion von CO₂-Emissionen • Geringere Abfallmenge • Geringerer Flächenverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Reaktionsraten • Höhere Produktreinheit und -eigenschaften • Höhere Prozesssicherheit • Flexiblere Prozessbedingungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Investitionskosten • Geringere Betriebskosten • Höhere Produktqualität • Höhere Anlagensicherheit • Flexiblere Produktion (Modularisierung)
Produktion		
ressourceneffizienter	schneller, sicherer, effizienter	flexibler, wettbewerbsfähiger

Ökologische Vorteile

Wie in Kapitel 2.3 dargelegt, führt die Prozessintensivierung zu einer deutlichen Verbesserung des Stoff- und Wärmetransports im Reaktionssystem. Des Weiteren wird eine Verbesserung bis hin zur Maximierung der Effektivität molekularer Prozesse und Triebkräfte erzielt.³⁶ Dies bedeutet: höherer stofflicher Umsatz, eine höhere Produktausbeute und eine verbesserte Selektivität der Reaktion. Die Rohstoffe, Hilfs-/Betriebsstoffe sowie die

³⁵ Vgl. Boodhoo und Harvey (2013), S. 22.

³⁶ Vgl. Kiss (2016), S. 257.

Energie können effizienter eingesetzt werden, d. h., bei geringerem Material- und Energieverbrauch wird die gleiche Menge von Produkten produziert und es werden zusätzlich CO₂-Emissionen eingespart.^{37, 38} Ein gleichwertiges oder besseres Produktionsergebnis (z. B. Produktmenge und -qualität) bedeutet damit eine Steigerung der Ressourceneffizienz im Produktionsprozess.

Aufgrund der verbesserten Selektivitäten entstehen weniger Nebenprodukte, die das Produkt verunreinigen. Infolgedessen sinken die Reinigungsaufwände, sodass die Reinigungsanlagen kleiner ausfallen können. Gleichzeitig wird die zu entsorgende Abfallmenge reduziert.

Verglichen mit konventionellen Anlagen weisen prozessintensivierte Anlagen in der Regel ein geringeres Verhältnis aus Apparategröße und Produktionskapazität auf.³⁹ Dies resultiert in einem geringeren Bedarf der natürlichen Ressource Fläche.⁴⁰

Ökonomische Vorteile

Bei Produktionsanlagen intensivierter Prozesse fallen geringere Investitions- und Betriebskosten an. Die niedrigeren Investitionskosten begründen sich durch die Reduzierung der Anlagengröße und -komplexität. Beispielsweise werden weniger Infrastrukturelemente wie Rohre benötigt. Die Kostenersparnis bei den Betriebskosten ergibt sich durch den geringeren Verbrauch von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie Energie. Zudem sinken die Kosten für die Abfallbeseitigung infolge des verringerten Abfallstroms.^{41, 42, 43, 44}

³⁷ Vgl. Segovia-Hernández und Bonilla-Petriciolet (2016), S. 2.

³⁸ Vgl. Boodhoo und Harvey (2013), S. 23 f.

³⁹ Vgl. Segovia-Hernández und Bonilla-Petriciolet (2016), S. 2.

⁴⁰ Vgl. Stankiewicz und Moulijn (2002), S. 1920 f.

⁴¹ Vgl. Kiss (2016), S. 257.

⁴² Vgl. Stankiewicz und Moulijn (2002), S. 1920.

⁴³ Vgl. Jiménez-González und Constable (2011), S. 416.

⁴⁴ Vgl. Boodhoo und Harvey (2013), S. 25.

Als ökonomische Vorteile prozessintensivierter Anlagen sind neben der Kostenreduktion weitere, die Ökonomie betreffende Aspekte zu nennen:^{45, 46, 47}

- **Höhere Prozesssicherheit:** Durch eine bessere Prozesskontrolle, beispielsweise durch bessere Wärmeabfuhr oder -zufuhr oder geringere Mengen möglicher gesundheitsgefährdender Stoffe, wird die Anlagensicherheit deutlich erhöht. Kostenintensive Anlagenhavarien werden somit vermieden.
- **Höhere Produktqualität:** Geringere Verunreinigungen und stabilere Prozesse führen zu einer besseren Qualität der hergestellten Produkte. Anlagen- und personalintensive Aufreinigungsanlagen werden vermieden. Höhere und konstante Produktqualitäten entsprechen dem Kundenwunsch und unterstützen eine stabile Nachfrage.
- **Flexiblere Produktion:** Eine flexiblere Produktionsweise trifft nicht auf alle intensivierten Prozesse zu. Insbesondere bei Anlagen mit mikrostrukturierten Apparaten ist ein Erhöhen der Produktionsmenge oder ein Produktwechsel prinzipiell nicht so komplex wie bei konventionellen Anlagen.
- **Verbessertes Unternehmensimage:** Die Öffentlichkeit und die Kunden honorieren das Bemühen von Unternehmen, innovative, ressourceneffiziente Herstellungsverfahren zu entwickeln und umzusetzen, um nachhaltiger zu produzieren.

2.5 Anwendung

Prozessintensivierung ist ein Teilgebiet der Verfahrenstechnik und wird in verfahrenstechnischen Anlagen umgesetzt. Sie kann praktisch in jedem Prozessschritt eines chemischen oder biotechnologischen Herstellungsver-

⁴⁵ Vgl. Jiménez-González und Constable (2011), S. 416.

⁴⁶ Vgl. Stankiewicz und Moulijn (2002), S. 1921.

⁴⁷ Vgl. Kiss (2016), S. 257.

fahrens angewendet werden.⁴⁸ Die Prozessschritte Reaktion, Wertstofftrennung und Produktaufreinigung bilden hier einen Anwendungsschwerpunkt (Abbildung 4).

Mit prozessintensivierten Apparaten und Technologien sollen die stofflichen und energetischen Prozessinputströme bei gleichzeitiger Erzeugung maximal möglicher Produktmengen und -qualitäten minimiert werden. Zudem sollen die Mengen nicht verwertbarer Stoffe (z. B. Verunreinigungen, Nebenprodukte) sowie stoffliche und energetische Emissionen (z. B. Abgase, Wärmeverluste über Wände) reduziert werden. Bis dato gibt es hierzu eine große Anzahl von Equipment- und Technologieentwicklungen.

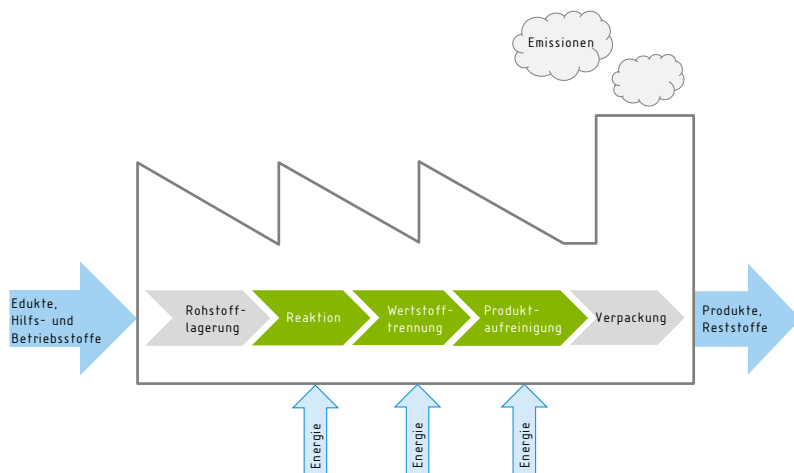


Abbildung 4: Anwendungsschwerpunkte der Prozessintensivierung im chemischen Herstellungsprozess

Um diese Vielzahl von Entwicklungen zu systematisieren, gibt es verschiedene Ansätze. Zwei Ansätze sollen in dieser Kurzanalyse kurz vorgestellt werden.

⁴⁸ Vgl. Pask et al. (2012), S. 2698.

2.5.1 Ganzheitlicher Ansatz

Die Technologieentwicklungen der Prozessintensivierung werden grundsätzlich in die zwei Bereiche prozessintensivierte Apparate und Produktionsmethoden differenziert.⁴⁹ Neuerdings wird diese Einteilung durch den Bereich Anlagenkonzeption ergänzt.^{50, 51} Abbildung 5 zeigt alle drei Bereiche neben Unterbereichen und Beispielen im Überblick.

Prozessintensivierte Apparate

Prozessintensivierte Apparate lassen sich in neuartige Reaktionsapparate und in Apparate mit nichtreaktiven Operationen unterteilen. Die neuartigen Reaktionsapparate (z. B. Millireaktoren oder Spaltrohrreaktoren) verfügen über neuartige Reaktorkonzepte, die einen intensivierten Stoff- und Wärmeaustausch während der Reaktion begünstigen. Die Apparate für nichtreaktive Operationen (z. B. statische Mischer oder Rotating-Packed-Beds) zeichnen sich neben intensivierten Stoff- und Wärmeübertragungsprozessen ebenfalls durch hervorragende Mischeigenschaften aus.⁵²

Prozessintensivierte Produktionsmethoden

Prozessintensivierte Produktionsmethoden lassen sich im Wesentlichen in drei Kategorien unterteilen:

- **Multifunktionale Reaktionsverfahren:** In einem Apparat sind neben der Reaktion noch eine oder mehrere weitere Grundoperationen integriert (z. B. Reaktivdestillation oder Reaktivkristallisation).
- **Hybride Trennverfahren:** Es werden zwei oder mehrere Trennoperationen in einem Apparat realisiert (z. B. Membrandestillation, adsorptive Destillation oder Trennwandkolonnen).

⁴⁹ Vgl. Stankiewicz und Moulijn (2000), S. 23 f.

⁵⁰ Vgl. Hüther et al. (2005), S. 1832.

⁵¹ Vgl. Keil (2018), S. 137.

⁵² Vgl. Stankiewicz und Moulijn (2000), S. 23 f.

- **Verfahren mit alternativen Energiequellen:** Verfahren, die alternative Energiequellen oder Wärmeübertragungswege verwenden (z. B. Plasma oder Ultraschall).

Darüber hinaus gibt es Sonderverfahren, bei denen alternative und neue Methoden zur Prozesskontrolle zum Einsatz kommen (z. B. überkritische Medien).^{53, 54}

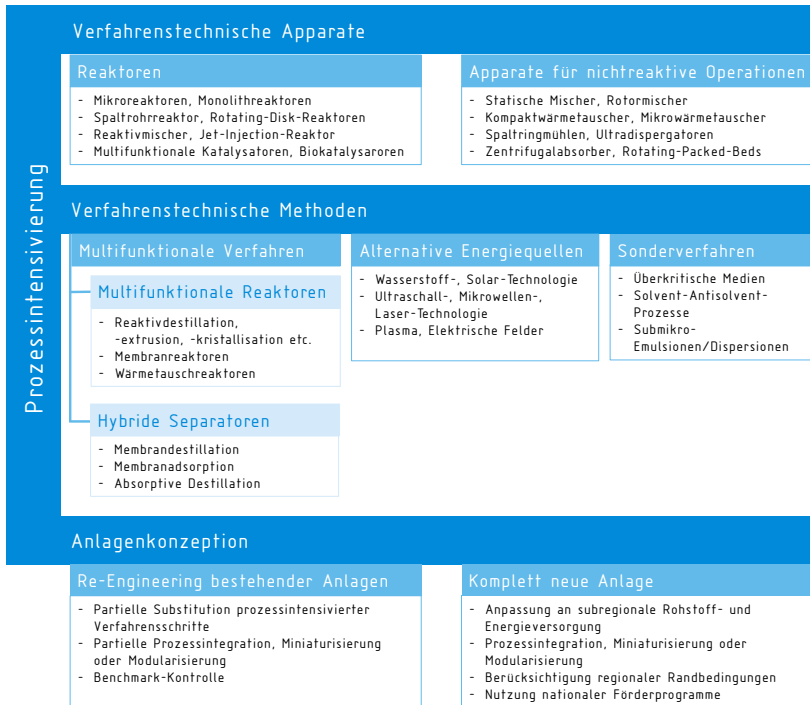


Abbildung 5: Elemente der Prozessintensivierung und ausgewählte Beispiele⁵⁵

⁵³ Vgl. Stankiewicz und Moulijn (2000), S. 24 und 27.

⁵⁴ Vgl. Kiss (2016), S. 223.

⁵⁵ Vgl. Keil (2018), S. 137.

Prozessintensivierte Anlagenkonzeption

In diesem Bereich werden alle Aktivitäten zusammengefasst, die sich auf die Planung und Auslegung komplett neuer prozessintensivierter Anlagen oder auf die Modernisierung bestehender Anlagen beziehen.

2.5.2 Reaktionstechnischer Ansatz

Aus der Perspektive der Reaktionstechnik erfolgt die Unterteilung von Prozessintensivierungstechnologien und -apparaten nach Prozessintensivierungsmaßnahmen. Diese Maßnahmen begünstigen eine räumliche, thermodynamische, funktionelle und zeitliche Gestaltung der Reaktionsführung:^{56, 57}

- Miniaturisierung von reaktionstechnischen Apparaten (Mikro- und Millimetermaßstab),
- Hybridisierung der Reaktionsführung mit Trennoperationen,
- Strukturierung des Reaktionsraums oder eines Feststoffkatalysators,
- Dynamisierung des Reaktorbetriebs,
- neuartige Reaktionsmedien (z. B. überkritische Fluide) und alternative Energiezufuhr (z. B. Plasma),
- Integration und Rationalisierung.

2.6 Wege zu einem intensivierten Prozess

Um den aktuellen und zukünftigen Herausforderungen in einem globalisierten Wettbewerb und den Forderungen nach einer umweltfreundlichen und nachhaltigen Produktion nachzukommen, können für die künftige Prozessplanung und Anlagenauslegung Idealziele formuliert werden.⁵⁸

⁵⁶ Vgl. ProcessNet Fachsektion Prozessintensivierung (2008), S. 5.

⁵⁷ Vgl. Agar et al. (2017), S. 29 ff.

⁵⁸ Vgl. Segovia-Hernández und Bonilla-Petriciolet (2016), S. 1 f.

Darunter sind zwei Ziele, die einen direkten Bezug zur Prozessintensivierung aufweisen:

- (1) Erhöhung der Produktivität und Selektivität durch Intensivierung ausgewählter Schlüsselprozesse und ein mehrskaliger Ansatz (Makro- bis Nanoebene) in der Prozesskontrolle,
- (2) Entwicklung und Anwendung von neuen Apparaten und neuem Anlagenequipment basierend auf wissenschaftlichen Prinzipien und neuen Methoden der Prozessintensivierung (z. B. Einsatz multifunktionaler Reaktoren oder Mikroreaktoren).

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten, ein Produkt in einer prozessintensivierten Anlage herzustellen: Entweder wird eine Anlage komplett für einen intensivierten Prozess neu geplant, ausgelegt und in Betrieb genommen oder es werden in einer bestehenden Anlage ineffiziente Apparate ausgetauscht und durch prozessintensivierte Komponenten ersetzt. In der industriellen Praxis erfolgen die kosten-, zeit- und personalaufwendige Entwicklung und Umsetzung einer prozessintensivierten Anlage oder die Modernisierung einer bestehenden Anlage nur, wenn die ökonomischen Vorteile deutlich überwiegen.⁵⁹

Um eine Einführung prozessintensivierter Verfahren in die industrielle Praxis in großem Umfang zu ermöglichen, müssen diverse grundlegende Forschungsarbeiten, insbesondere im Bereich Reaktionstechnik, durchgeführt werden. Dazu zählen folgende Themen:⁶⁰

- Erarbeitung einer universellen Methodik zur Einbeziehung von Prozessintensivierungsmaßnahmen in Prozesssynthese und Prozessentwicklung,
- Entwicklung von zuverlässigen Parallelisierungsstrategien für die Mikroreaktionstechnik,

⁵⁹ Vgl. Becht et al. (2009), S. 329 ff.

⁶⁰ Vgl. Agar et al. (2017), S. 31.

- Entwicklung einer geeigneten Mikroverfahrenstechnik zur Ergänzung der Mikroreaktionstechnik,
- Entwicklung systematischer Ansätze zur räumlichen und zeitlichen Strukturierung verschiedener Funktionalitäten im Reaktionsraum,
- Entwicklung störungsarmer dynamischer Reaktorfahrweisen,
- Erarbeitung besserer Möglichkeiten der Maßstabsvergrößerung (engl.: Scale-up) von neuartigen Energiequellen,
- Entwicklung robuster Katalysatoren (z. B. keine Deaktivierung durch bio- oder wasserbasierte Verunreinigungen in den Einsatzstoffen).

3 VORSTELLUNG DER TECHNOLOGIEBANDBREITE

Experten haben in der 2007 veröffentlichten Europäischen Roadmap für Prozessintensivierung (engl.: European roadmap for process intensification) 72 prozessintensivierte Technologien identifiziert. Hiervon wurden 46 Technologien in sogenannten technischen Reports genauer beschrieben und charakterisiert. Ein Augenmerk wurde auf die potenziellen Vorteile wie Steigerung der Energieeffizienz und Absenkung von CO₂-Emissionen gelegt.⁶¹ In Anhang B (Tabelle 7, S. 66) sind Technologien, die im Rahmen dieser Untersuchung mit einem hohen und mittleren Energieeinsparpotenzial identifiziert wurden, aufgeführt. Dabei weisen folgende prozessintensivierte Technologien neben einem hohen Energieeinsparungspotenzial gleichzeitig ein hohes bis mittleres Potenzial bezogen auf Wettbewerbsfähigkeit und Erfolgswahrscheinlichkeit auf: statische Mischer für kontinuierliche Reaktionen, eine wärmeintegrierte Destillation, Reaktivdestillation, membrangestützte Reaktivdestillation, Mikrowellen-Heizung und zentrifugaler Flüssig-flüssig-Kontaktor.

Tabelle 3 gibt eine Übersicht zu den bisher entwickelten prozessintensivierten Technologien und zeigt deren Vielfalt auf. Die vorgestellten Technologien sind entweder in der Industrie als Pilot- oder Demonstrationsanlage umgesetzt oder noch Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.⁶² Sie sind nach den Wirkungsbereichen Struktur, Energie, Synergie und Zeit sortiert und durch die Angabe der zugehörigen Eigenschaften im Kern charakterisiert. Die vorgestellte Technologieliste stellt eine Auswahl dar und hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

⁶¹ Vgl. Anxionnaz et al. (2007a), S. 15.

⁶² Vgl. Kiss (2016), S. 223 f.

Tabelle 3: Zuordnung von Intensivierungstechnologien zu prozessbezogenen Wirkungsbereichen^{63, 64}

Wirkungsbereich	Eigenschaften	PI-Beispiele
Struktur Strukturiertes Reaktionsumfeld (Interne Geometrie)	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Stoff- und Wärmeübertragungsraten • Maximale spezifische Oberflächen • Minimale Energieverluste • Definierte Geometrien ermöglichen mathematische Beschreibungen • Einfaches Scale-up • Einfache Prozesskontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> • Strukturierte Katalysatoren • Kompakte Wärmeübertrager (Platte, Spirale, Minikanal etc.) • Statische und Mikro-Mischer • Monolith-Katalysatoren/-Reaktoren • Mikro- und Millikanalreaktoren/Wärmeübertrager
Energie (Alternative) Energieformen und Übertragungsmechanismen	<ul style="list-style-type: none"> • Anregung bestimmter ausgewählter Moleküle • Neue Prozessfenster • Selektive, gradientenfreie und lokale Energiebereitstellung • Sehr große Grenzflächen für Stoff- und Wärmetransport 	<ul style="list-style-type: none"> • Mikrowellenreaktoren • Ultraschallchemiereaktoren • Gas-flüssig-Überschallreaktoren • Plasma-/Photochemische Reaktoren • Ultraschall-unterstützte Kristallisation • Spinning-Disk-Reaktoren • Rotierende Festbettreaktoren
Synergie Integration von Funktionen und (Prozess-)Schritten	<ul style="list-style-type: none"> • Synergetische Effekte • Besseres Wärmemanagement • Erhöhte Produktausbeuten • Erhöhung der gesamten Anlageneffizienz • Kompaktere Apparate 	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeübertragungsreaktoren • Wärmeintegrierte Destillationskolonne • Reaktive Destillation • Trennwandkolonnen-Technologie • Membranreaktoren/-kristallisation • Membrandestillation/-absorption • Membranextraktion • Extraktive Destillation/Kristallisation
Zeit Zeitlicher Verlauf von Ereignissen, dynamisches Verhalten	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhte Produktausbeuten • Beeinflussung des hydrodynamischen Verhaltens • Kontrollierter Energieeintrag • Verbesserte Produktqualität • Erhöhte Energieeffizienz • Minimierung nicht gewünschter Phänomene wie Nebenreaktionen oder Verstopfung 	<ul style="list-style-type: none"> • Periodische Destillation • Millisekundenreaktor • Gegenstromreaktor • Gepulster Multiphasenreaktor • Gepulster Kompressionsreaktor

⁶³ Vgl. Kiss (2016), S. 223 f.⁶⁴ Vgl. Europic (2019).

3.1 Verfahrenstechnische Apparate und Technologien

Wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt, sind die Bandbreite und Anzahl von prozessintensivierten Apparaten und Technologien groß. In der Literatur finden sich einige informative Ausarbeitungen, welche einen Technologieüberblick geben, wie beispielsweise Kiss⁶⁵, Keil⁶⁶ oder Grützner et al.⁶⁷ Sie führen in ihren Ausarbeitungen für den industriellen Einsatz relevante prozessintensivierte Technologien auf und erläutern ihre Funktion und Eigenschaften.

Im Rahmen dieser Kurzanalyse wird im Folgenden exemplarisch auf prozessintensivierte Reaktoren und statische Mischer eingegangen. Sie weisen eine besonders große potenzielle Anwendungsbreite sowie ein hohes Prozess- und Ressourceneffizienzpotenzial auf.

Reaktoren

Die Reaktion ist der Prozessschritt in einem chemischen oder biotechnologischen Herstellungsverfahren, der vorhergehende und vor allem nachfolgende Prozessschritte entscheidend beeinflusst. Obwohl die reaktionstechnischen Anlagenteile nur durchschnittlich 10 % der gesamten Anlage ausmachen, bestimmt der Reaktionsprozess die Anzahl und Größe nachfolgender Anlagenteile, insbesondere die Trenntechnik, maßgeblich mit. Zudem beeinflusst der Reaktionsprozess auch sicherheitstechnische und gesundheitsgefährdende Aspekte.⁶⁸

Verbesserungen in der Reaktortechnologie führen zu einer gesteigerten Produktselektivität, folglich zu einer reduzierten Anzahl und/oder verringerten Menge an Nebenprodukten. Daraus resultieren deutlich geringere Trennaufwände in den nachfolgenden Produktaufreinigungsstufen, sodass auch eine geringere Anzahl von Trennapparaten und kleinere Apparategrößen notwendig sind.

⁶⁵ Vgl. Kiss (2016), S. 221 ff.

⁶⁶ Vgl. Keil (2018), S. 135 ff.

⁶⁷ Vgl. Grützner et al. (2018), S. 1823 ff.

⁶⁸ Vgl. Pask et al. (2012), S. 2699.

Tabelle 4 gibt einen Überblick zu Vor- und Nachteilen sowie potenziellen Anwendungsgebieten bisher entwickelter prozessintensivierter Reaktoren.

Tabelle 4: Anwendungsbereiche, Vor- und Nachteile prozessintensivierter Reaktoren⁶⁹

Reaktortyp	Vorteile	Nachteile	Anwendung
Mikroreaktor	<ul style="list-style-type: none"> + Hohes Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis + Kurze Verweilzeit + Einfache Skalierbarkeit (Erhöhung der Modulanzahl) 	<ul style="list-style-type: none"> – Geringe Strömungsgeschwindigkeiten (turbulent sowie laminar) – Rückvermischung durch molekulare Diffusion – Verschmutzung und Verstopfung durch Feststoffe 	<ul style="list-style-type: none"> • Exotherme Reaktionen • Metallorganische Reaktionen • Mehrkomponenten-Reaktionen
Reaktor-“on-a-chip”	<ul style="list-style-type: none"> + Sehr kompakt + Auch für kleine Stoffmengen geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> – Schwierig in der Handhabung von Feststoffen, Niederschlag oder Kristallen 	<ul style="list-style-type: none"> • Katalysator-/Enzymscreening • Arzneimittelforschung
Oszillatorströmungsreaktor	<ul style="list-style-type: none"> + Vermischung heterogener Phasen + Geeignet für empfindliche Stoffe bei hoher mechanischer Beanspruchung 	<ul style="list-style-type: none"> – Verringerte Reaktionsgeschwindigkeit aufgrund Rückvermischung 	<ul style="list-style-type: none"> • Synthese/Behandlung mechanisch empfindlicher Verbindungen: Biomoleküle (Enzyme, Proteine) oder Kristalle
Plattenreaktor	<ul style="list-style-type: none"> + Hohes Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis + Geeignet für stark exotherme Reaktionen 	<ul style="list-style-type: none"> – Feststoffablagerung 	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidationsreaktionen
Spinning-tube-in-a-tube-Reaktor	<ul style="list-style-type: none"> + Hohes Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis + Große Scherkräfte 	<ul style="list-style-type: none"> – Oberflächenverschmutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaktionen zwischen Flüssigkeiten mit stark unterschiedlicher Viskosität • Temperaturempfindliche Reaktionen

⁶⁹ Vgl. Kiss (2016), S. 229 f.

Reaktortyp	Vorteile	Nachteile	Anwendung
Rotierender Festbettreaktor	<ul style="list-style-type: none"> + Hohe Stofftransportgeschwindigkeit zwischen Gas- und Flüssigphase + Kurze Kontaktzeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Ungleichmäßige Flüssigkeitsverteilung 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaktionen mit Gas-flüssig-Absorption • Reaktionen, die zu einer Ausfällung oder Abscheidung führen • Oxidationsreaktionen mit Ozon
Spinning-basket-Reaktor	<ul style="list-style-type: none"> + Hohe Stofftransportgeschwindigkeit zwischen Feststoff und Flüssigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Katalysatorverlust durch Abrieb 	<ul style="list-style-type: none"> • Katalytische Reaktionen
Spinning-Disk-Reaktor	<ul style="list-style-type: none"> + Flüssigkeitsfilm im μ-Bereich + Hohe Wärmetransportrate + Hohe Stofftransportgeschwindigkeit zwischen Feststoff und Flüssigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Herausfordernde Auslegung - Geringer Durchsatz 	<ul style="list-style-type: none"> • Lebensmittelverarbeitung • Reaktionen mit hochviskosen Flüssigkeiten • Schnelle exotherme Reaktionen • Reaktionen mit Nanopartikeln
Mikrowellenreaktor	<ul style="list-style-type: none"> + Einsparung von Kosten und Energie + Höhere Betriebssicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Auslegungsroutine bei Skalierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaktionen mit Mikrowellensensitiven Chemikalien
Ultraschallreaktor	<ul style="list-style-type: none"> + Einsparung von Kosten und Energie + Höhere Produktionskapazität + Höhere Betriebssicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Auslegungsroutine bei Skalierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr schnelle Oxidierungsprozesse
Photochemischer Reaktor	<ul style="list-style-type: none"> + Hohe Ausbeute und Selektivität + Möglichkeit für einen Niedrigtemperaturbetrieb + Kostenfreie Reaktionsenergie 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufwand für Strahlungseinbringung 	<ul style="list-style-type: none"> • Photochemische Reaktionen • Lichtinduzierte Polymerisation (z. B. für die Herstellung von Tinten, Beschichtungen)

Aufgrund der zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen und des hohen Potenzials für industrielle Anwendungen werden Mikroreaktoren im Folgenden kurz vorgestellt.

Mikroreaktoren

Mikroreaktoren sind miniaturisierte Reaktoren für chemische Reaktionen. Dabei werden mehrere Lagen mikrotechnisch bearbeiteter Komponenten

gestapelt. Alleinstellungsmerkmal der Mikroreaktoren ist die exzellente Wärmetransferleistung, die besonders für den isothermen Betrieb mit stark exothermen Prozessen relevant ist. Das geringe Reaktionsvolumen-zu-Oberfläche-Verhältnis macht Mikroreaktoren auch interessant für die Durchführung von Reaktionen gesundheitsgefährdender oder explosiver Stoffe. Manche Mikroreaktoren verfügen über einen integrierten Mikromischer, der für die Vermischung mehrerer Komponenten verwendet wird. Die Kanaldurchmesser variieren dabei zwischen 20 bis 500 μm .⁷⁰

Im Vergleich zu konventionellen Wärmetauschreaktoren ist die Wärmedissipation deutlich höher. Erreicht wird das durch Kleinströhen aus thermisch hochleitfähigem Material, durch die der Stoff zur Erwärmung oder Kühlung geleitet wird. Die Nachteile der höheren Wärmeleistung sind allerdings ein potenziell hoher Druckabfall innerhalb des Systems sowie hohe Stückkosten und Verstopfungsanfälligkeit. Dadurch sind Mikroreaktoren nur bedingt für den Massenmarkt geeignet, bergen aber ein enormes Potenzial für die Produktion innovativer und hochwertiger Produkte, vorausgesetzt, die Kosteneffizienz lässt sich signifikant erhöhen.⁷¹

Vorteile auf technischer Ebene:⁷²

- Sehr schnelles Vermischen
- Hocheffiziente Wärmeübertragung
- Kurze definierte Verweilzeiten
- Einfache Prozesssteuerung durch geringe Systemträgheit
- Hohe Betriebssicherheit
- Kurze Entwicklungszeiten

⁷⁰ Vgl. Anxionnaz et al. (2007b), S. 17.

⁷¹ Vgl. Anxionnaz et al. (2007b), S. 17.

⁷² Vgl. Heck und Kaaden (2018).

Ressourceneffizienzpotenziale und wirtschaftliche Vorteile:⁷³

- Effiziente Rohstoffnutzung durch hohe Ausbeute
- Geringerer Energieverbrauch, dadurch günstigere CO₂-Bilanz
- Verringerter Reinigungsaufwand aufgrund des geringen Anteils an Nebenprodukten
- Verbesserte Produktqualität
- Nachhaltige Anlagensicherheit

Statische Mischer

Statische Mischer sind Bauteile im Inneren einer Leitung, welche radiale Vermischungen beim Durchströmen der Leitung generieren. Die Komplexität der Mischelemente nimmt mit steigenden Anforderungen zu. Am besten eignet sich dieser Typ für Durchlaufmischverfahren. Die zur Durchmischung notwendige Energie stammt aus dem Stoffstrom innerhalb der Leitung. Strömungsverluste müssen ggf. durch Pumpen ausgeglichen werden. Größter Nachteil der statischen Mischer ist die hohe Verstopfungsanfälligkeit.⁷⁴

In der Prozessindustrie, speziell für die Vermischung zweier Flüssigkeiten oder eines Gases mit einer Flüssigkeit, sind statische Mischer weit verbreitet. Im Vergleich zu anderen Mischsystemen weisen statische Mischer eine sehr hohe Energiedissipation auf, die durch die äußerst kompakte Bauweise begünstigt wird.⁷⁵

3.2 Modulare Anlagen

Die Mehrzahl entwickelter Prozessintensivierungstechnologien erfordert neue Konzepte zur Integration dieser Technologien in bestehende Anlagen oder zur Gestaltung neuer Anlagen. In den letzten Jahren wurde ein Konzept entwickelt, das sich insbesondere mit der Integration von kompakten

⁷³ Vgl. Heck und Kaaden (2018).

⁷⁴ Vgl. Anxionnaz et al. (2007b), S. 12.

⁷⁵ Vgl. Anxionnaz et al. (2007b), S. 12.

und kleinen prozessintensivierten Technologien in ein neuartiges flexibles Anlagenumfeld beschäftigt: das Konzept der modularen Anlage.⁷⁶

Die modulare Anlage ist aus verschiedenen Funktionseinheiten, sogenannten Modulen, aufgebaut und besteht beispielsweise aus Reaktions- und Stofftrennmodulen. Dieses modulare Anlagenkonzept ermöglicht ein Design von chemischen Verfahren auf kleinem Raum und im kontinuierlichen Betriebsmodus. Durch den modularen Aufbau ist eine flexible Anpassung an neue Prozessrahmenbedingungen realisierbar. Dadurch können die Einschränkungen hinsichtlich der Anlagenflexibilität überwunden werden, die sich bei der Auslegung des prozessintensivierten Apparates auf den optimalen Arbeitspunkt ergeben.⁷⁷

Eine Prozessintensivierung ermöglicht insgesamt flexiblere Produktionsanlagen. Durch eine Modularisierung von Anlagen oder Anlagebereichen kann die Produktionsmenge an variable Bedarfe individuell angepasst werden. Zudem sind neue Produktionskonzepte (z. B. verteilte Produktion) möglich.⁷⁸

Modulare Produktionseinheiten sind aufgrund ihrer Größe und Konzeption für die Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien sowie pharmazeutischen Wirkstoffen geeignet.^{79, 80} In Projekten wie f³-Factory, CoPIRIDE und POLYCAT (siehe Kapitel 4.3.2) wurden aus diesen Anwendungsbereichen erfolgreich Produkte hergestellt. Die Funktionsfähigkeit von modularen, intensivierten Anlagen wurde somit belegt (engl.: proof of concept).⁸¹

Bei der Entwicklung modularer Anlagen handelt es sich noch um einen „jungen“ Trend. Allerdings wird er bereits von einigen Unternehmen auf-

⁷⁶ Vgl. Wachsen et al. (2015), S. 687.

⁷⁷ Vgl. Wachsen et al. (2015), S. 687.

⁷⁸ Vgl. ProcessNet Fachsektion Prozessintensivierung (2008), S. 5.

⁷⁹ Vgl. Iser (2014).

⁸⁰ Vgl. Bieringer et al. (2016), S. 6.

⁸¹ Vgl. Bieringer et al. (2016), S. 11.

gegriffen. Hier kommen containerbasierte Lösungen im kleinen Produktionsmaßstab (Pilotanlagen) zum Einsatz.⁸²

Die Vorteile, die sich für prozessintensivierte Apparate und Technologien ergeben, sind auch auf modulare, intensivierte Anlagen übertragbar. Dazu zählen in erster Linie eine Steigerung der Ressourceneffizienz und gleichzeitige Verringerung der Betriebs- und Investitionskosten, die insbesondere auf eine höhere chemische Ausbeute und einen effizienteren Energieeinsatz zurückzuführen sind. Als weiterer Vorteil wird die Flexibilisierung des Produktionsbetriebes gesehen. Durch diese können wettbewerbsbedingte Ziele wie Berücksichtigung des Kundenbedarfes oder eine Anpassung an die Rohstoffsituation bei der Erschließung neuer Märkte mitverfolgt werden.⁸³ Nach Meinung von Experten könnten die Planung, Beschaffung und der Bau modularer Anlagen zukünftig einfacher und schneller werden.⁸⁴

Allerdings sind noch einige Herausforderungen zu bestehen, bis modulare Anlagen im Produktionsprozess zum Standard werden. Die Herausforderungen auf technischer Ebene liegen in den Bereichen Entwicklung von Apparatemodulen, Scale-up-Verfahren, Analytik, Automatisierung sowie Standardisierung von Modulen, Infrastrukturelementen und Schnittstellen.⁸⁵ Um diese Hürden zu meistern, müssen Hersteller von modularem Equipment, Anlagenerrichter, Anlagenbetreiber (Produkthersteller) sowie wissenschaftliche Einrichtungen eng zusammenarbeiten.

Einen guten Überblick zu Potenzialen, aktuellen Entwicklungen sowie Handlungs- und Entwicklungsfeldern zur Bewältigung der Herausforderungen modularer Anlagen geben Bieringer et al.⁸⁶ Im Folgenden werden einige Handlungsfelder exemplarisch vorgestellt.

⁸² Vgl. Bieringer et al. (2016), S. 12.

⁸³ Vgl. Wachsen et al. (2015), S. 687 f.

⁸⁴ Vgl. Iser (2014).

⁸⁵ Vgl. Bieringer et al. (2016), S. 13 ff.

⁸⁶ Vgl. Bieringer et al. (2016).

- Die Entwicklung von neuen oder die Adaption von bereits bestehenden prozessintensivierten Apparaten ist für den Erhalt betriebssicherer und -stabiler modularer Anlagen notwendig. Dies betrifft insbesondere das Hauptmodul Reaktor. Neue Reaktorgeometrien und -designs sind erforderlich, um beispielsweise eine gute Temperaturkontrolle (Vermeiden von Bereichen mit Temperaturmaxima) innerhalb der kleinen Geometrien des Apparateräumes zu gewährleisten oder um Verstopfungsverhalten (Fouling) zu unterbinden. Darüber hinaus sind effektive Isolierungskonzepte gefragt, um Wärmeverluste zu unterbinden, die bei kleinen Geometrien verstärkt auftreten.⁸⁷
- Für eine gute Prozesskontrolle und als Voraussetzung für einen hohen Automatisierungsgrad in einem kontinuierlichen intensivierten Prozess ist eine leistungsfähige Prozessanalysetechnik notwendig. Die Entwicklung neuartiger Sensoren ist dabei entscheidend. Die neuen Sensoren müssen in kleinen Volumina zuverlässig messen können und das eingestellte und gewünschte Strömungsverhalten nicht oder nur minimal beeinflussen. Des Weiteren müssen geeignete Messpunkte für den Sensoreinsatz oder Probeentnahmestellen identifiziert werden. Die Messungen sollten mit einer hohen Genauigkeit und Frequenz erfolgen.⁸⁸
- Um die Flexibilität intensivierter modularer, kontinuierlicher Anlagen nicht durch übergeordnete Prozesssteuerungen einzuschränken, wird eine Modularisierung von Automatisierungslösungen angestrebt. Änderungen der Prozessbedingungen oder der eingebauten Module sollten leicht in der Prozesssteuerung abbildbar sein.⁸⁹
- Eine Standardisierung von Apparatemodulen, Prozessinfrastrukturkomponenten und Schnittstellen ist nicht trivial und erfordert ein hohes Maß an Kommunikation zwischen den Akteuren, gewährleistet aber den unkomplizierten Austausch von Modulen zwischen verschiedenen modularen Anlagen und unterstützt damit die flexible Produktion.⁹⁰

⁸⁷ Vgl. Bieringer et al. (2016), S. 16.

⁸⁸ Vgl. Wachsen et al. (2015), S. 688.

⁸⁹ Vgl. Wachsen et al. (2015), S. 688 f.

⁹⁰ Vgl. Bieringer et al. (2016), S. 25.

4 UMSETZUNG IN DIE INDUSTRIELLE PRAXIS

4.1 Vorgehen bei der Umsetzung

Von der Entwicklung über die Marktreife bis zur Einführung einer innovativen Technologie in einen kommerziellen Produktionsprozess werden i. d. R. vier verschiedene Stufen durchlaufen (Abbildung 6). Um von einer Stufe zur nächsten zu springen, müssen für die Anwendung im Vorfeld definierte Kriterien zur Anlagensicherheit, technischen Umsetzbarkeit, Umweltverträglichkeit sowie verbesserten Leistungsfähigkeit erfüllt und eventuelle Marktrisiken bedacht werden. Mit jedem Entwicklungsschritt nehmen die Informationsanzahl und -dichte zu. Technologiebeschreibung und -verständnis werden immer konkreter.

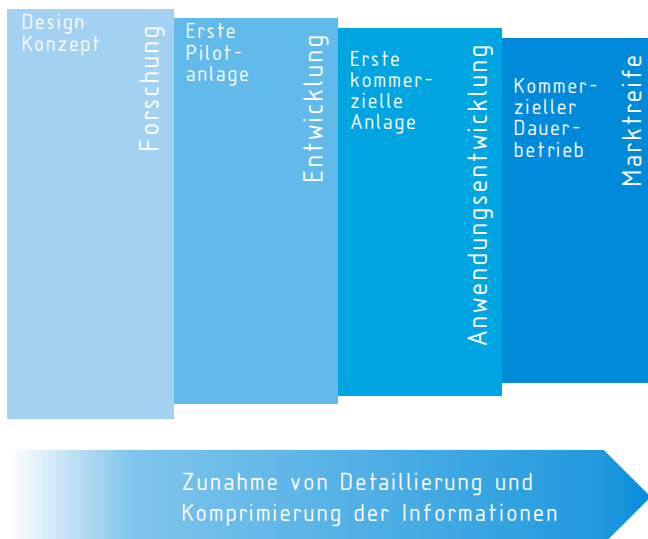


Abbildung 6: Vier Entwicklungsstufen: von der Forschung bis zur industriellen Anwendung⁹¹

⁹¹ Vgl. Harmsen (2013), S. 394.

Die vier Stufen zeichnen sich durch folgende Aspekte aus:⁹²

- (1) **Forschungsstadium:** Konzepterstellung, experimentelle Forschung im Labormaßstab, Datenerzeugung als Grundlage für die Anlagenauslegung,
- (2) **Entwicklungsstadium:** Scale-up zur Pilotanlage,
- (3) **Demonstrationsstadium:** detailliertes Design, Konstruktion, Demonstratoranlage,
- (4) **kommerzielles Stadium:** sicherer Betrieb.

Für alle prozessintensivierten Technologieentwicklungen ist eine Laboranlage notwendig und muss eine grundlegende Datenbasis für eine gute Anlagenauslegung erhalten bleiben. Bei einigen Technologien wie Reaktivdestillation oder Mikroreaktoren wird der Scale-up-Prozess zwischen Pilot- und Demonstrationsanlage verkürzt und gleichzeitig etwas einfacher und risikoärmer gestaltet, indem alle Scale-up-kritischen Apparateaspekte sowohl in der Pilotanlage als auch in der Demonstrationsanlage die gleichen Abmessungen aufweisen. Bei einer Reaktivdestillation wären dies beispielsweise die Kolonnenhöhe, Packungsart und der -aufbau, Gas- und Flüssigkeitsgeschwindigkeiten sowie Ort der Reaktionszone und Eingangsströme. Bei einem Mikroreaktor hingegen ginge es um die Abmessungen des Mikrokanals und die Strömungsbedingungen.⁹³

Bei der Entwicklung prozessintensivierter Technologien ist die Forschungsphase durchaus arbeitsintensiv. Die erste Phase ist hier entscheidend für eine effektive Gesamtentwicklung und eine erfolgreiche Überführung in die industrielle Praxis beziehungsweise in den kommerziellen Dauerbetrieb. In der Forschungsphase werden durch zahlreiche Experimente Basisdaten ermittelt. Basierend auf diesen Daten wird in den meisten Fällen ein Modell zur Beschreibung des betrachteten technischen Systems erstellt. Zu dessen Simulation gibt es diverse computergestützte

⁹² Vgl. Harmsen (2013), S. 393 f.

⁹³ Vgl. Harmsen (2013), S. 394.

Werkzeuge. Neben technologischen Eigenschaften können ebenfalls ökologische und ökonomische Eigenschaften abgebildet werden. Tabelle 5 gibt einen Überblick über verfügbare Simulationsprogramme zur Entwicklung nachhaltiger prozessintensivierter Technologien.

Tabelle 5: Computergestützte Werkzeuge zur Entwicklung von PI-Technologien⁹⁴

Aufgabenstellung	Methode	Werkzeugname/-typ	Merkmale
Gebrauch von Phasendiagrammen zum Verständnis von Reaktion und Separation	Modell-eigenschaften	ICAS-utility ^a / Analyse	Gruppenabhängige Eigenschaftsmodelle (beitragsbasiert)
Selektion von umweltfreundlichen Lösungsmitteln, die bei der Stofftrennung eingesetzt werden	CAMD; Datenbanksuche	ProCAMD ^a / Selektion	Suche und Selektion von Lösungsmitteln für verschiedene lösungsmittelbasierte Trennprozesse
Gebrauch von Triebkraftdiagrammen zur optimalen Auslegung von hybriden/intensivierten Grundoperationen	Triebkraftbasiert; gleichgewichtsbasiert	PDS ^a / Design, Analyse	Erzeugung von Phasen- und Triebkraftdiagrammen zur Auslegung von Destillationskolonnen
Ökonomische Auswertung von Prozessen zur Identifizierung von ökonomischen Auslegungszielen in Bezug auf intensivierete Technologien	Auf Modell/ Heuristik basierend	ECON ^a / Analyse	Ökonomische Berechnung und Auswertung auf Basis des Modells von Peters et al. ⁹⁵
Ökologische Auswertung von Prozessen zur Identifizierung nachhaltiger Auslegungsziele in Bezug auf intensivierete Technologien	Modellbasiert	SustainPro ^a / Analyse	Indikatorbasierte Methode ⁹⁶
	Modellbasiert	LCSoft ^a	Indikatorbasierte Methode unter Verwendung eines „Cradle-to-gate“-Konzeptes für die LCA-Analyse ⁹⁷
Auswertung der chemischen Verbindungseigenschaften zur Identifizierung von möglichen hybriden/intensivierten Grundoperationen	Modellbasiert	CAPSS ^a / Analyse	Analyse der chemischen Verbindungseigenschaften ⁹⁸

⁹⁴ Vgl. Babi et al. (2016), S. 24.

⁹⁵ Vgl. Peters et al. (2003).

⁹⁶ Vgl. Carvalho et al. (2013), S. 8 ff.

⁹⁷ Vgl. Kalakul et al. (2014), S. 98 ff.

⁹⁸ Vgl. Jaksland et al. (1995), S. 511 ff.

Aufgabenstellung	Methode	Werkzeugname/-typ	Merkmale
Vorhersage von chemischen Verbindungseigenschaften	Modellbasiert	ProPred ^a	Gruppenabhängige Eigenschaftsmodelle (beitragsbasiert) ⁹⁹
Modellbasierte Auswertung und Auslegung von intensivierten/hybriden Grundoperationen	Gleichungsorientierte Problemlösung	MoT ^a , Aspen Custom Modeller/Analyse	Prozess- und Eigenschaftsmodelle werden erzeugt und gelöst
Modellbasierte Simulation und Analyse von (mehrfach) intensivierten Prozessalternativen	Modellbasierte Berechnungen	Aspen Plus, PROII/Analyse	Modelle für bekannte und hybride/intensivierte Grundoperationen

^a Teil von ICAS¹⁰⁰

4.2 Herausforderungen bei der Umsetzung

Trotz der zahlreichen Entwicklungen von Prozessintensivierungstechnologien seit den 1970er Jahren haben nur wenige Technologien Einzug in industrielle Produktionsverfahren erhalten. Dies liegt an technologischen und betriebswirtschaftlichen Hindernissen, die einen Transfer von dem Entwicklungsstadium zur industriellen Umsetzung erschweren.¹⁰¹ Eine Übersicht einiger zu überwindender Hürden ist in Abbildung 7 gegeben.

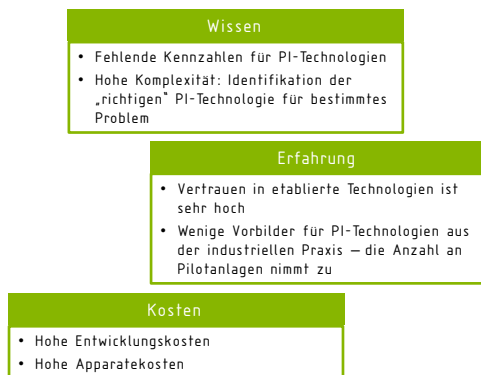


Abbildung 7: Hindernisse bei der Einführung von PI-Technologien in die industrielle Praxis¹⁰²

⁹⁹ Vgl. Marrero und Gani (2001), S. 183 ff.

¹⁰⁰ Vgl. Gani et al. (1997), S. 1135 ff.

¹⁰¹ Vgl. Boodhoo und Harvey (2013), S. 24 f.

¹⁰² Vgl. Barecka et al. (2018), S. 18.

Zu den Hindernissen zählen:

- **Hohes technisches und wirtschaftliches Risiko:** Die Entwicklung neuer Prozessintensivierungstechnologien und die Umsetzung von einem ersten Prototyp bis zu einer Produktionsanlage sind für Unternehmen mit einem hohen technischen und wirtschaftlichen Risiko verbunden. Die Apparate- und Entwicklungskosten liegen hoch und die Entwicklungszeit (Labor- und Technikumanlage, Simulation) ist zu lang. Dies widerspricht der Forderung nach einer schnellen Technologieentwicklung, um auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig zu sein. Hieraus ergibt sich die Forderung nach schnelleren Verfahren in der Technologieentwicklung.^{103, 104}

Zudem sind der personelle und zeitliche Aufwand sehr hoch, um eine gute Prozesskontrolle und einen sicheren Betriebszustand bei neuen, nicht etablierten Technologien zu erzielen.¹⁰⁵ Ein ähnlich hohes Risiko gilt für die Implementierung von Prozessintensivierungstechnologien in eine bestehende Anlage.¹⁰⁶

- **Hohes Vertrauen in etablierte Technologien:** In der Prozessindustrie werden etablierte Produktionstechnologien so lange wie möglich betrieben. Deswegen fallen das Interesse und die Motivation auf der Managementebene, innovative, insbesondere prozessintensivierte Technologien zu etablieren, etwas zurückhaltend aus. Zuweilen sind die Vorteile von Prozessintensivierungstechnologien auf der Managementebene nicht immer bekannt. Das liegt auch daran, dass es nicht genügend Vorbilder gibt.^{107, 108}

Die Anlagenverantwortliche stehen neuen Technologien meistens sehr kritisch gegenüber. Sie versuchen stets, die Anlage so stabil und sicher wie möglich zu fahren. Neue Apparateentwicklungen werden erst in die Anlage integriert, wenn diese mehrere positive Referenzen in anderen

¹⁰³ Vgl. Keil (2018), S. 137.

¹⁰⁴ Vgl. Barecka et al. (2018), S. 18.

¹⁰⁵ Vgl. Barecka et al. (2018), S. 18.

¹⁰⁶ Vgl. Anxionnaz et al. (2007a), S. 21.

¹⁰⁷ Vgl. Stankiewicz und Moulijn (2002), S. 1921.

¹⁰⁸ Vgl. Anxionnaz et al. (2007a), S. 21.

Anlagen aufweisen können. Viele prozessintensivierte Apparate können diese Prozess Erfahrung aber nicht bieten und gelten daher nicht als etabliert.¹⁰⁹

- **Geringes Wissen und wenig Erfahrung:** Oftmals weisen Verfahreningenieure in Unternehmen ein unzureichendes Wissen und geringe Erfahrungen bezüglich prozessintensivierter Apparate und Methoden auf. Dies liegt daran, dass das Thema Prozessintensivierung eher selten an den Universitäten behandelt wird.^{110, 111} Die Entscheidung, wie und an welcher Stelle einer Anlage prozessintensivierte Apparate einsetzbar sind, ist herausfordernd und nicht trivial. Es erfordert ein hohes Maß an Wissen über diese Technologie, um die passende Prozessintensivierungstechnologie zu identifizieren, damit Limitierungen chemischer und physikalischer Phänomene einer konventionellen Anlage überwunden werden können.¹¹²
- **Fehlende PI-Kennzahlen:** Es fehlen PI-spezifische Kennzahlen, um ein Benchmark für verschiedene Technologien durchzuführen.¹¹³ Damit könnten Vorteile, die der Einsatz von prozessintensivierten Technologien birgt, identifiziert und verifiziert werden.¹¹⁴
- **Begrenzte Einsatzbereiche:** Kontinuierlich betriebene prozessintensivierte Apparate und Anlagen können teilweise nur in einem engen Parameterbereich betrieben werden. Die damit einhergehende verringerte Flexibilität im Betriebsverhalten grenzt das Einsatzgebiet ein.¹¹⁵ Zudem neigen prozessintensivierte Apparate, insbesondere mikrostrukturierte, zu Verstopfungen und Anhaftungen.¹¹⁶

¹⁰⁹ Vgl. Anxionnaz et al. (2007a), S. 21.

¹¹⁰ Vgl. Stankiewicz und Moulijn (2002), S. 1921.

¹¹¹ Vgl. Boodhoo und Harvey (2013), S. 24.

¹¹² Vgl. Barecka et al. (2018), S. 18.

¹¹³ Vgl. Curcio (2013), S. 95 ff.

¹¹⁴ Vgl. Barecka et al. (2018), S. 18.

¹¹⁵ Vgl. Boodhoo und Harvey (2013), S. 26.

¹¹⁶ Vgl. Kiss (2016), S. 257.

Die Herausforderungen, die bei der Entwicklung und Umsetzung in die industrielle Praxis von prozessintensivierten Technologien bewältigt werden müssen, sind durchaus beachtlich. Eine Voraussetzung dafür ist eine proaktive Kooperation zwischen Akteuren aus Forschung und Technologieentwicklung, Anlagenbau, Unternehmen und staatlichen Behörden. Folgende Maßnahmen und Lösungsansätze helfen dabei, die Hürden zu überwinden:¹¹⁷

- **Motivation zur Nachahmung:** Veröffentlichung von erfolgreichen Entwicklungen und Umsetzungsbeispielen prozessintensivierter Technologien unter Hervorhebung der ökologischen und ökonomischen Vorteile,
- **Verbesserung der Ausbildung:** Implementierung von Prozessintensivierung in die Ausbildung von Verfahrenstechnikern und Chemieingenieuren an Universitäten und Hochschulen,
- **Beschleunigung von Technologieentwicklungen:** Entwicklung von Screening-Methoden und Kennzahlen für Prozessintensivierungstechnologien,
- **finanzielle Unterstützung bei der Technologieentwicklung:** Förderung von Entwicklung und Prüfung von Prozessintensivierungstechnologien im Labor- und Pilotmaßstab, z. B. durch entsprechende Förderprogramme,
- **finanzielle Unterstützung bei der Überführung in die Praxis:** Unterstützung bei der Kommerzialisierung vielversprechender, aber risikobehafteter Prozessintensivierungstechnologien, z. B. durch entsprechende Förderprogramme.

4.3 Umsetzungsbeispiele

Eine der ersten kommerziellen prozessintensivierten Anwendungen war der statische Mischer. Heutzutage ist er in der chemischen Prozessindus-

¹¹⁷ Vgl. Kiss (2016), S. 258.

trie etabliert. Um eine weitere frühe Umsetzung in die industrielle Praxis handelt es sich bei dem multifunktionalen Verfahren Reaktivdestillation. Darunter befindet sich eine Anwendung, bei der Methylacetat aus Methanol produziert wird. Hier werden fünf Prozessschritte in einem Prozessschritt integriert. Neben der Einsparung von Kapitalkosten erfolgt eine Reduktion des Energieverbrauchs um 80 %.¹¹⁸

Wie Kapitel 4.2 zeigt, gibt es doch einige Hemmnisse bei der Entwicklung und Umsetzung von Prozessintensivierungstechnologien. Dies erschwert eine flächendeckende Einführung in die industrielle Praxis. Dennoch bestehen eine Vielzahl grundlagen- und praxisorientierter Forschungsvorhaben auf diesem Gebiet, denn die potenziellen ökologischen und ökonomischen Vorteile wie Material-, Energie- und Kosteneinsparungen sind hoch und motivieren Unternehmen, die Hemmnisse zusammen mit Forschungsinstituten abzubauen.

Gerade in den letzten zehn Jahren wurden Forschungsvorhaben vorangetrieben, die einen Praxiseinsatz von intensivierten Prozesstechnologien zum Ziel hatten. Mittlerweile sind verschiedenste Mikroreaktoren in unterschiedlichen Bauausführungen auf dem Markt verfügbar. Im Rahmen europäischer Verbundprojekte wurden modularisierte Anlagen mit miniaturisierten Bauteilen entwickelt und als Pilotanlagen umgesetzt.¹¹⁹

Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele mit einem ausgewiesenen Ressourceneffizienzpotenzial vorgestellt. Die in diesen Beispielen entwickelten Technologien wurden in den meisten Fällen in Pilotanlagen umgesetzt.

4.3.1 Verfahrenstechnische Apparate und Technologien

4.3.1.1 Mikroreaktoren in der industriellen Praxis

Der Austausch eines diskontinuierlichen Batchreaktors gegen einen kontinuierlich betriebenen Mikroreaktor kann in vielen Anwendungsfällen di-

¹¹⁸ Vgl. Segovia-Hernández und Bonilla-Petriciolet (2016), S. 3.

¹¹⁹ Vgl. Kralisch und Weyell (2015), S. 9.

verse Vorteile mit sich bringen. Reaktionen in mikrostrukturierten Reaktoren und den damit verbundenen sehr kleinen reaktiven Volumina zeichnen sich durch gute Durchmischungseigenschaften und eine hervorragende Temperaturkontrolle aus.¹²⁰ Eine verbesserte Anpassung von Reaktionsparametern resultiert in höheren Ausbeuten und Produktreinheiten. Weitere Vorteile sind in Kapitel 3.1 aufgeführt.

Insbesondere bei Anwendungen mit schnellen hochexothermen Reaktionen mit explosiven oder gesundheitsgefährdenden Stoffen bieten sich Mikroreaktoren aufgrund der kleinen Reaktionsvolumina, der schnellen Vermischung und des sehr effizienten Wärmeübergangs an. Das Sicherheitsrisiko ist demnach um ein Vielfaches reduziert im Vergleich zu Batchreaktoren.¹²¹

Im Folgenden werden drei Umsetzungsbeispiele in die industrielle Praxis vorgestellt.

Mikroreaktor im industriellen Piloteinsatz

In einer Forschungskoooperation aus großen Chemieunternehmen sowie wissenschaftlichen Forschungs- und Prüfeinrichtungen wurden maßgeschneiderte Konzepte für zweiphasige, hochexotherme Reaktionen entwickelt. Ziel dabei war es, mikroverfahrenstechnische Anlagen schnell, zuverlässig und wirtschaftlich zu entwickeln und in die industrielle Umgebung zu integrieren.¹²²

Basierend auf wissenschaftlichen Untersuchungen an Laborreaktoren wurde eine Pilotanlage anhand von zwei Beispielprozessen entwickelt, umgesetzt und in Betrieb genommen. Das austauschbare mikrostrukturierte Reaktionsmodul ist das zentrale Element der Anlage. Es besteht aus einem Fallfilm-Mikroreaktor, der in einem für Mikroverfahrenstechnik spezialisierten Forschungsinstitut entwickelt wurde. Dieser Reaktortyp ist für zweiphasige exotherme Flüssig-Gas-Reaktionen besonders geeignet. In

¹²⁰ Vgl. Heck und Kaaden (2018).

¹²¹ Vgl. Heck und Kaaden (2018).

¹²² Vgl. Franke et al. (2008), S. 20 f.

halboffenen Kanälen strömt die Flüssigkeit (1. Reaktant) der Schwerkraft folgend kontinuierlich durch den Reaktor und bildet einen Film von wenigen zehn Mikrometern Dicke aus. Das durch den Mikroreaktor strömende Gas (2. Reaktant) hat direkten Kontakt zu dem Fallfilm. Die dabei entstehenden Flüssigkeit-Gas-Grenzflächen können sehr groß ausfallen und betragen bis zu $20.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$.¹²³

Da die Reaktionskanäle im Mikrometerbereich liegen, ist eine gut kontrollierbare Reaktionsführung möglich: Sowohl das Konzentrationsprofil als auch die Verweilzeit sind an die Strömungsgeschwindigkeit gekoppelt, welche über die Kanalabmessung einstellbar ist. Außerdem ist die Temperatur gut steuerbar, da der Wärmetauscher an einer geeigneten Stelle positioniert ist. Basierend auf dem großen Verhältnis von Reaktoroberfläche zu Reaktorvolumen ist eine sehr gute Wärmeabfuhr aus dem Reaktionssystem möglich. Dies hat einen großen sicherheitstechnischen Aspekt, insbesondere bei Verwendung von instabilen und zur Explosion neigenden Prozessen.¹²⁴

Die Intensivierung des Stoff- und Wärmeaustausches führt, u. a. begünstigt durch die hohe spezifische Oberfläche, zu höheren Selektivitäten und/oder Ausbeuten. Bei einem Prozessbeispiel konnte im Rahmen der labortechnischen Untersuchung und reaktionstechnischen Optimierung ein hoher Wert für die Produktselektivität von 95 % erzielt werden. Die Raum-Zeit-Ausbeuten der Produktherstellung konnten im Labor um ca. zwei Größenordnungen erhöht werden.¹²⁵

Nach den Untersuchungen und Reaktoroptimierungen im Labormaßstab wurde eine Pilotanlage entwickelt und umgesetzt. Diese erlaubt einen deutlich höheren Durchsatz verglichen mit der Laboranlage. Die Reaktionsmodule wurden dabei so ausgelegt, dass auf unterschiedliche Durchsatzmengen flexibel reagiert werden kann. Die erfolgreichen Projektergebnisse haben damit die Leistungsfähigkeit der Mikroreaktionstechnik de-

¹²³ Vgl. Franke et al. (2008), S. 21 f.

¹²⁴ Vgl. Franke et al. (2008), S. 22.

¹²⁵ Vgl. Franke et al. (2008), S. 22.

monstriert. Möglichkeiten und Optionen für einen großtechnischen Einsatz wurden deutlich. Des Weiteren wurde im Rahmen der Forschungs Kooperation herausgearbeitet, dass eine Übertragung von Laborergebnissen in den Pilotmaßstab im Rahmen der Mikroverfahrenstechnik einfacher, schneller und mit weniger Risiko behaftet ist als mit konventionellen Methoden.¹²⁶

Mikroreaktor im industriellen Praxiseinsatz

Ein Hersteller eines hochwertigen Produkts für die Kunststoffindustrie hat in seinem Produktionsprozess einen Rührkesselreaktor durch einen Hochleistungsmikroreaktor ersetzt. Dieser Mikroreaktor wurde in einem Forschungszentrum entwickelt und enthält einen Misch- und Reaktionsbereich bestehend aus mehreren Zehntausend Mikrokanälen. Der Mikroreaktor ist aus einer speziellen Nickel-Legierung gefertigt, misst 65 cm in der Länge und ermöglicht einen Durchsatz von 1700 kg flüssigen Chemikalien (Reaktant) in der Stunde.¹²⁷

In der ersten Stufe wurde ein Laborreaktor mit einem Durchsatz von einem Kilogramm Reaktant entwickelt. In der darauffolgenden Entwicklungsstufe wurde eine Skalierung um den Faktor 1700, bezogen auf die Reaktantenmasse, erfolgreich durchgeführt. Der aus dem Scale-up-Prozess hervorgegangene Produktionsreaktor weist ähnlich gute Ergebnisse wie der zuvor entwickelte Laborreaktor auf. In diesem hochskalierten Mikroreaktor wurden innerhalb von zehn Wochen 300 t eines Produkts für die Kunststoffindustrie hergestellt.¹²⁸

Im Vergleich zum konventionellen Verfahren im herkömmlichen Rührkessel weist das Herstellverfahren im Mikroreaktor eine deutlich gesteigerte Produktausbeute auf. Damit verbunden ist ein verringerter Rohstoffverbrauch bei gleichzeitig vermindertem Abfallaufkommen. Weitere Vorteile sind eine höhere Reaktionsgeschwindigkeit und eine größere Prozesssicherheit.¹²⁹

¹²⁶ Vgl. Franke et al. (2008), S. 22.

¹²⁷ Vgl. Hoffmann (2005).

¹²⁸ Vgl. Hoffmann (2005).

¹²⁹ Vgl. Hoffmann (2005).

Die größere Prozesssicherheit beruht auf der Tatsache, dass in dem kontinuierlichen Mikroreaktor eine kleinere Menge korrosiver, umweltgefährdender Chemikalien im Reaktor verweilt verglichen mit dem mehrere tausend Kilogramm Reaktant fassenden Rührkesselreaktor. Bei einem Störfall des Mikroreaktors gelangt deutlich weniger Reaktant in die Umgebung.

Millireaktor im großtechnischen Einsatz

Da Mikroreaktoren zu Verstopfungen neigen, stellt ein großtechnischer Einsatz eine größere Herausforderung dar, denn hier ist ein möglichst langer Betrieb ohne Störungen wünschenswert. Bei einem Reaktor im Millimetermaßstab mit gleichen Kanengeometrien treten diese negativen Effekte nicht auf. Die positiven Eigenschaften wie eine große Wärmeübertragungsleistung und hohe Vermischungsgeschwindigkeiten bleiben dabei erhalten.¹³⁰

Ein etablierter Hersteller für mikroverfahrenstechnische Apparate entwickelte für einen Kunden ein Reaktorsystem im Millimetermaßstab für den großtechnischen Einsatz. Im Rahmen eines integrierten Scale-ups konnten Ergebnisse aus dem Labormaßstab (ermittelte Umsätze, Ausbeuten, Prozessparameter und Produktqualitäten) direkt in den Produktionsmaßstab übertragen werden. Zusätzlich wurden Langzeitversuche zu Verstopfungsverhalten, Reinigungsverfahren, Korrosionsverhalten und Standzeiten unter Verwendung realer Rohstoffqualitäten durchgeführt. Es wurde ein 7,5 m langer Produktionsreaktor mit der Miprowa-Technologie entwickelt. Der Reaktor ist analog zu einem Rohbündelwärmetauscher aufgebaut, allerdings sind anstatt Rundrohren Rechteckkanäle verbaut. In diesen sind zusätzlich statische Mischeinlagen eingebracht, die eine maximal effiziente Durchmischung und einen intensivierten Wärmeübergang bewirken.¹³¹

Die Inbetriebnahme des Miprowa-Produktionsreaktors für den großtechnischen Einsatz konnte in nur einer Woche abgeschlossen werden. Nach sechsmonatigem Dauerbetrieb erfolgte die erste Überprüfung. Dabei wurden keinerlei Verschmutzungen oder Verstopfungen festgestellt, d. h., die

¹³⁰ Vgl. Heck und Kaaden (2018).

¹³¹ Vgl. Heck und Kaaden (2018).

Reaktion läuft bei idealer Selektivität und einer sehr geringen Nebenproduktbildung ab. Nach der Inspektion wurde der Reaktor wieder angefahren, er läuft seitdem problemlos.¹³²

4.3.1.2 Hybrider Festbettreaktor zur Metallrückgewinnung

In metallverarbeitenden Prozessen findet sich im Abfallstrom oftmals eine größere Menge Metallfraktionen. Diese können in einem konventionellen Metallrückgewinnungsverfahren unter Verwendung von Fäll- und Flockungsmitteln zurückgewonnen werden.

Um die Effizienz des Rückgewinnungsprozesses zu steigern, wurde ein prozessintensiviertes biotechnisches Verfahren zur Rückgewinnung von Metallen aus Prozesswässern entwickelt. Die Kernkomponente des intensivierten Verfahrens besteht aus einem Festbett-Umlaufreaktor mit integriertem Hydrozyklon.¹³³

Der größte Vorteil prozessintensivierter Verfahren besteht in der Reduktion mehrerer Prozessschritte. Verglichen mit dem konventionellen Verfahren lässt sich die intensivierte Anlage auch deutlich flexibler betreiben und weist eine geringere Störanfälligkeit auf. Der Energieverbrauch wurde um etwa 40 % und der Flächenbedarf um 50 % verringert. Außerdem müssen aufgrund des biotechnischen Betriebs keine Fäll- oder Flockungsmittel mehr hinzugegeben werden.¹³⁴

4.3.1.3 Prozessintensivierungsmodul zur Proteinhydrolyse

Proteinhydrolysate sind in der industriellen Biotechnologie von Bedeutung und werden meist durch im Batchbetrieb ablaufende Prozesse gewonnen. Eine mögliche Intensivierung erfolgt durch die Kopplung von stofflicher Umsetzung (Reaktion) und Aufarbeitung.¹³⁵

¹³² Vgl. Heck und Kaaden (2018).

¹³³ Vgl. Deerberg et al. (2017), S. 156.

¹³⁴ Vgl. Deerberg et al. (2017), S. 156.

¹³⁵ Vgl. Deerberg et al. (2017), S. 155.

Durch den integrierten Prozess konnte die Produktionsrate um 30 % gesteigert werden bei gleichzeitiger Reduzierung des Energie- und Flächenverbrauchs um 30 % bzw. 50 %. Beachtlich ist die Einsparung an Biokatalysatoren (Enzyme) um 85 %.¹³⁶

4.3.2 Modulare Anlagen

4.3.2.1 Entwicklung einer modularen Produktionsplattform zur Herstellung von Feinchemikalien (CoPIRIDE)

In dem EU-Projekt CoPIRIDE¹³⁷ wurden zwei modulare, containerbasierte Anlagen für die Herstellung von Feinchemikalien entwickelt und als Demonstrator-Anlagen eingesetzt.¹³⁸ Hierbei handelt es sich um eine kabinettartig aufgebaute Produktionsanlage, welche in einen Überseecontainer eingepasst wurde. Jeder Container stellt eine eigene autarke Produktionseinheit dar, die dezentral vor Ort betrieben werden kann.¹³⁹ Der Container fungiert als Produktionsplattform (Evotrainer), die enthaltene universelle Infrastruktur ermöglicht die Integration und den Austausch unterschiedlichster prozessintensivierter Produktionsmodule (z. B. Reaktions- oder Aufreinigungsmodule). Darüber hinaus sind eine komplette Prozessleit- und Sicherheitstechnik, Versorgungseinrichtungen (Daten- und Stromleitungen, Rohrleitungen für Prozesswasser und technische Gase) sowie Lagerflächen für Rohstoffe enthalten.¹⁴⁰

Vorteilhaft ist die schnelle Produktion neuer Produkte in einem Pilotmaßstab. Durch Parallelschaltung mehrerer Container ist eine Steigerung der Produktionsmengen möglich. Die Container sind robust aufgebaut und können flexibel betrieben werden. Ihre Konstruktion entspricht den Richtlinien chemischer Produktionsanlagen und des Explosionsschutzes. Aufgrund der schnellen Produktionsaufnahme vor Ort ist die Zeitspanne für

¹³⁶ Vgl. Deerberg et al. (2017), S. 155.

¹³⁷ Steht für „Combining Process Intensification-driven Manufacture of Microstructured Reactors and Process Design regarding to Industrial Dimensions and Environment“.

¹³⁸ Vgl. Iser (2014).

¹³⁹ Vgl. Landtag Nordrhein-Westfalen Enquetekommission (2015), S. 189 f.

¹⁴⁰ Vgl. Jopp (2012), S. 54.

eine marktreife Produktherstellung bei relativ überschaubarem finanziellem Risiko gering.¹⁴¹

Die entwickelte Produktionsplattform für die Chemikalienherstellung bei kleinen Produktionschargen stellt Labor-, Technikums- und Produktionsanlage in einem dar. Die Verfahrensentwicklung vom Labormaßstab hin zum Produktionsmaßstab kann somit in einer Anlage erfolgen. Dies hat ökonomische und ökologische Vorteile. Zum einen können neue Produkte schneller zur Marktreife gelangen und es kann rascher und flexibler auf sich ändernde Markt- und Kundenanforderungen reagiert werden. Zum anderen werden Material- und Energieaufwendungen, bezogen auf den Anlagenbau und den -betrieb, für die nicht mehr notwendigen Labor- und Pilotanlagen eingespart.¹⁴²

4.3.2.2 Anwendung einer modularen Produktionsplattform zur Herstellung von Feinchemikalien (POLYCAT)

Im Rahmen des EU-Projektes POLYCAT haben 19 Unternehmen, Hochschulen und Forschungsunternehmen mit dem Ziel zusammengearbeitet, innovative und nachhaltige Konzepte für Synthese- und Produktionsverfahren von Feinchemikalien und pharmazeutischen Erzeugnissen zu entwickeln.¹⁴³ Im Zuge der Arbeiten wurde eine Mehrzweckanlage basierend auf mikroverfahrenstechnischen Komponenten entwickelt und in eine flexible containerartige Produktionsinfrastruktur (Evotrainer, siehe Kapitel 4.3.2.1) integriert.¹⁴⁴

Durch den Einsatz neuartiger Katalysatorsysteme und einer mikroverfahrenstechnischen Mehrzweckanlage mit kontinuierlicher Prozessführung, eingebettet in eine kompakte Hochleistungsinfrastruktur, ist eine nachhaltige chemische Produktion mit hoher Wertschöpfung auf kleinem Raum möglich.¹⁴⁵

¹⁴¹ Vgl. European Commission (2013).

¹⁴² Vgl. Jopp (2012), S. 53 f.

¹⁴³ Vgl. Lang et al. (2015), S. 24.

¹⁴⁴ Vgl. Löb et al. (2014), S. 1367.

¹⁴⁵ Vgl. Lang et al. (2015), S. 25.

In der Projektlaufzeit wurden zum einen die Integration und der Betrieb verschiedener Mikroreaktor-konzepte in die modulare Produktionsinfrastruktur durchgeführt.¹⁴⁶ Zum anderen wurde an der sicheren, flexiblen und nachhaltigen Realisierung industrierelevanter Reaktionen in der modularen Anlage gearbeitet. Dabei ist es gelungen, eine mehrphasige Hydrierungsreaktion in der mobilen, modularen Produktionsanlage durchzuführen. Dadurch konnte eine Feinchemikalie erfolgreich synthetisiert werden.¹⁴⁷

4.3.2.3 Entwicklung einer modularen Produktionsplattform für verschiedene Anwendungen (F³ Factory)

Die F³ Factory ist ein EU-gefördertes Projekt, bei dem interdisziplinäre Teams von 26 Partnerorganisationen aus neun Mitgliedstaaten zusammengearbeitet haben. In diesem Projekt wurde eine modulare, kontinuierliche chemische Anlage entworfen und ihre Funktion im Rahmen von Fallbeispielen geprüft. Dazu wurden eine Anlageninfrastruktur und diverses Prozessequipment entworfen. Anhand dieser wurden Entscheidungstools und -methoden sowie die Umsetzung eines ganzheitlichen, flexiblen Prozessdesigns erarbeitet. Ergänzend wurden Richtlinien für modulare, containerbasierte Produktionseinheiten entworfen.¹⁴⁸

Das modulare Anlagenkonzept wurde im Rahmen von sieben Fallbeispielen erfolgreich geprüft und die Grundidee einer schnellen, kontinuierlichen und flexiblen Produktion bestätigt. Die Fallbeispiele waren in der gesamten chemischen Prozessindustrie angesiedelt, von der Herstellung chemischer Zwischenprodukte über Spezialitäten-Kunststoffe, Konsumentenprodukte bis hin zu Arzneimitteln. Zudem wurden neue intensivierete Prozesse und Apparate erfolgreich getestet.¹⁴⁹

Mit dem entwickelten modularen Anlagenkonzept ist eine deutlich ressourceneffizientere Produktionsweise möglich. In den untersuchten Fall-

¹⁴⁶ Vgl. Löb et al. (2014), S. 1367.

¹⁴⁷ Vgl. Rehm et al. (2017), S. 1077.

¹⁴⁸ Vgl. Landtag Nordrhein-Westfalen Enquetekommission (2015).

¹⁴⁹ Vgl. European Commission (kein Datum).

beispielen konnten folgende ressourcenbezogene Einsparungen erzielt werden: Der Energieverbrauch wurde bis zu 30 % reduziert, die Lösemittel-einsparung betrug bis zu 100 % und die Emissionen von CO₂-Äquivalenten konnten um bis zu 50 % gesenkt werden. Als ökonomische Vorteile ergeben sich eine erhöhte Investitionsflexibilität und ein schnellerer Transfer von der Entwicklung bis zur Marktreife.¹⁵⁰

4.3.2.4 Anwendung einer modularen Anlage zur Gewinnung von Gerbstoffen aus Abfallresten (ReeL)

Bisher wurden die meisten Abfallstoffe aus dem Lederhandwerk aufwendig entsorgt und nur teilweise aufbereitet. Ein Teil dieser Abfallstoffe entsteht in vielen kleinen Gerbereien, u. a. aus mit Gerbstoffen verunreinigten Falzspänen und Schnittresten aus Leder. Da es sich hierbei um chemikalienbelastete Abfälle handelt, ist ihre Entsorgung ressourcen- und kostenintensiv.¹⁵¹

In dem BMBF-Projekt „ReeL“ entwickelte ein Verbund aus einem Forschungsinstitut und zwei Unternehmen eine modulare Pilotanlage zur dezentralen und nachhaltigen Gewinnung von Nachgerbstoffen aus verunreinigten Falzspänen und Lederresten.¹⁵² Die auf den Ledermaterialien anhaftenden Gerbstoffe sollen noch vor Ort direkt wiedergewonnen und im innerbetrieblichen Kreislauf zurückgeführt werden. Die Verwertung der Ledermaterialien als Biomasse, die bisher noch extern zugeführt werden muss, ist geplant und wird geprüft.

Die modulare Anlage besteht aus verschiedenen funktionalen Modulen, ist gut auf- und abbaubar und für den Transport geeignet. Sie kann von einem Einsatzort zum nächsten transportiert werden.¹⁵³ Die entwickelte Pilotanlage befindet sich seit November 2017 in einem Praxistest, in dem die verbauten Apparate technisch erprobt sowie das reibungslose Zusammen-

¹⁵⁰ Vgl. European Commission (kein Datum).

¹⁵¹ Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (2018).

¹⁵² Vgl. Hüser (2018).

¹⁵³ Vgl. Hüser (2018).

spiel aller Komponenten geprüft werden. Des Weiteren ist ein vollautomatischer Betrieb geplant.¹⁵⁴

Eine Gerberei könnte so einen erheblichen Teil ihres Eigenbedarfs an Nachgerbstoffen vollautomatisch und weitgehend selbstständig produzieren. Schon bei einem Betrieb mittlerer Größe fallen beispielsweise pro Tag etwa ein bis zwei Tonnen Falzspäne an, die durch diese Anlage zu 100 % verwertet werden könnten. Es werden keinerlei Emissionen erzeugt und es fallen keine weiteren Reststoffe an. Die „Vor-Ort“- und „Just-in-time“-Produktion spart Energie und Material:¹⁵⁵ Kraftstoff für wegfallende Transporte von Abfällen und neue Gerbstoffe, weniger Energiebedarf für Gerbstoffherstellung und Einsparung von Rohstoffen (Gerbstoffherstellung) und Verpackungsmaterialien. Der Einsatz der Anlage ist im Rahmen eines Leasing-Modells vorgesehen.¹⁵⁶

¹⁵⁴ Vgl. Geipel-Kern (2018).

¹⁵⁵ Vgl. Hüser (2018).

¹⁵⁶ Vgl. Geipel-Kern (2018).

5 FAZIT

Die Kurzanalyse zeigt, dass die Prozessintensivierung in der Apparate- und Anlagenentwicklung enorme Ressourceneinsparpotenziale birgt. Die Umsetzung von Methoden und Maßnahmen zur Prozessintensivierung führt zu kleineren und kompakteren Apparaten und Anlagen. Gleichzeitig wird die Prozesseffizienz deutlich gesteigert: Chemische und physikalische Prozesse in den Anlagenelementen laufen effizienter ab. Insbesondere zeigen Stoff- und Wärmetransportprozesse, die die Verbräuche natürlicher Ressourcen signifikant beeinflussen, bessere Eigenschaften auf. Prinzipiell kann festgehalten werden, dass die Prozessintensivierung den Trend von großen, trägen, diskontinuierlichen Batchanlagen hin zu kleineren, flexibleren, kontinuierlichen Anlagen unterstützt und begünstigt.

Durch eine Verbesserung der Prozesseffizienz können eingesetzte Mengen an Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie Energie in intensivierten Anlagen erheblich reduziert werden. Der Einsatz von kleineren und kompakteren Anlagen resultiert zudem in einer Materialeinsparung, da weniger Material für die eingesetzten Apparate verbraucht wird. Dies mindert auch die Betriebs- und Kapitalkosten und kann somit zu einem Wettbewerbsvorteil verhelfen. In den meisten Fällen wird darüber hinaus der Treibhausgas-Fußabdruck positiv beeinflusst. Beispiele zeigen, dass durch Prozessintensivierungsmaßnahmen in Einzelfällen der Energieverbrauch um bis zu 70 % und die Kapitalkosten um 60 % eingespart werden konnten.¹⁵⁷

Wichtig zu wissen ist, dass eine Prozessintensivierung kein „Allzweck-Instrument“ darstellt und nicht jeden Produktionsprozess in der Prozessindustrie verbessern kann. Jeder Prozess ist individuell und muss dahingehend überprüft werden, ob durch Maßnahmen der Prozessintensivierung überhaupt Verbesserungen auf ökologischer und ökonomischer Ebene möglich sind. Eine Basisvoraussetzung dafür ist ein grundlegendes Verständnis hinsichtlich des betreffenden Prozesses.¹⁵⁸

¹⁵⁷ Vgl. BHR Group (kein Datum).

¹⁵⁸ Vgl. Boodhoo und Harvey (2013), S. 26.

Die Entwicklung und Einführung prozessintensivierter Apparate und Technologien ist für ein Unternehmen herausfordernd. Die labortechnische Untersuchung zur Generierung von Basisdaten für die Auslegung sowie die Konzipierung einer Pilotanlage ist personal-, zeit- und kostenintensiv. Das damit verbundene unternehmerische Risiko stellt durchaus die größte Hürde für eine Anwendung in der Praxis dar.

Bisher wurden zahlreiche prozessintensivierte Apparate und Technologien in der Wissenschaft und im unternehmerischen Umfeld entwickelt, wie die Technologieübersicht in der Europäischen Roadmap für Prozessintensivierung beeindruckend veranschaulicht.¹⁵⁹ Trotz der großen Anzahl von Entwicklungen der letzten vierzig Jahre sind verhältnismäßig wenige davon in der industriellen Produktion angekommen. Ein Hauptgrund dafür ist das prinzipiell hohe unternehmerische Risiko. Ein anderer Grund liegt in der technologischen Natur: Zum einen fehlt Scale-up-Wissen, zum anderen gibt es zu wenig Betriebserfahrung mit Pilotanlagen. Dieses Problem lässt sich nur durch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit sowie weitere Pilot- und Demonstrationsanlagen lösen.

Trotzdem gibt es erfolgreiche Prozessintensivierungsbeispiele, die in der industriellen Praxis Einzug gehalten haben, wie beispielsweise statische Mischer. Gerade in letzter Zeit werden industrielle Anwendungen in den Bereichen Mikro- und Milli-Verfahrenstechnik und Membrantrennanlagen in Kombination mit modularen Anlagen entwickelt.¹⁶⁰

¹⁵⁹ Vgl. Anxionnaz et al. (2007b), S. 1 ff.

¹⁶⁰ Vgl. Keil (2018) S. 187.

LITERATURVERZEICHNIS

Agar, D. W. et al. (2017): Roadmap Chemical Reaction Engineering. 2. Auflage, ProcessNet Fachsektion Chemische Reaktionstechnik, DECHEMA e.V., auch verfügbar als PDF:
https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Reaktionstechnik_Roadmap_2017_en.pdf

Albert, B. et al. (2007): Energieversorgung der Zukunft - der Beitrag der Chemie -. DECHEMA; GDCh; DBG; DGMK; VDI-GVC und VCI, auch verfügbar als PDF unter: http://www.energie-und-chemie.de/fileadmin/downloads/Service_und_Informationen/Presse_Oeffentlichkeitsarbeit/Sonstige/psp2.pdf

Anxionnaz, Z. et al. (2007a): European Roadmap for Process Intensification. Creative Energy, auch verfügbar als PDF unter:
https://efce.info/efce_media/Downloads/wppi/European_Roadmap_PI.pdf

Anxionnaz, Z. et al. (2007b): European Roadmap for Process Intensification, Appendix 1, PI Technologies Description and Review. Creative Energy, auch verfügbar als PDF unter:
https://efce.info/efce_media/Downloads/wppi/European_Roadmap_PI+Appendix_1.pdf

Babi, D. B.; Sales Cruz, M. und Gani, R. (2016): Fundamentals of Process Intensification: A Process Systems Engineering View. In: Segovia-Hernández, J. G. und Bonilla-Petriciolet, A.: Process Intensification in Chemical Engineering. Springer International Publishing, Cham, ISBN 978-3-319-28390-6.

Baldea, M. (2015): From process integration to process intensification. Computers & Chemical Engineering, **81**, S. 104 - 114.

Barecka, M. H.; Skiborowski, M. und Górak, A. (2018): Process Intensification in Practice: Ethylene Glycol Case Study. In: Ochowiak, M.; Woziwodzki, S.; Doligalski, M. und Mitkowski, P. T.: Practical Aspects of Chemical Engineering. Springer International Publishing AG, Cham (Switzerland), ISBN 978-3-319-73977-9.

Becht, S.; Franke, R.; Geisselmann, A. und Hahn, H. (2009): An industrial view on process intensification. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, **48**, S. 329 - 332.

BHR Group (kein Datum): Process Intensification - Increase efficiency, reduce costs and gain the competitive edge. BHR Group, Cranfield (UK), auch verfügbar als PDF: <http://www.bhrgroup.com/Portals/5/Documents/Case%20Studies/Refreshed/PILeaflet.pdf>

Bieringer, T. et al. (2016): Modular Plants. Temporärer Arbeitskreis „Modulare Anlagen“, DECHEMA e.V., Frankfurt am Main, auch verfügbar als PDF unter: https://processnet.org/dechema_media/modulareanlagen.pdf

Boodhoo, K. und Harvey, A. (2013): Process Intensification: An Overview of Principles and Practice. In: Boodhoo, K. und Harvey, A.: Process Intensification for Green Chemistry. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, ISBN 978-0-470-97267-0.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2018): ReeL - Ressourceneffiziente Herstellung von Lederchemikalien. Fördermaßnahme r+Impuls - Impulse für industrielle Ressourceneffizienz, Förderkennzeichen 033R157 [abgerufen am 12. Nov. 2018], auch verfügbar unter: <http://www.r-impuls.de>

Carvalho, A.; Matos, H. A. und Gani, R. (2013): Sustain Pro - a tool for systematic process analysis, generation and evaluation of sustainable design alternatives. Computers & Chemical Engineering, **50**, 8 - 27.

Cross, W. T. und Ramshaw, C. (1986): Process intensification - laminar flow - heat transfer. Chemical Engineering Research and Design, **64**, S. 293 - 301.

Curcio, S (2013): Process intensification in the chemical industry: a review. In: Basile, A.; Piemonte, V. und de Falco, M.: Sustainable development in chemical engineering: Innovative technologies. Wiley, Chichester, ISBN 978-1-119-95352-4.

Deerberg, G.; Körner, H.-J. und Schließmann, U. (2017): Integrierte Verfahrenstechnik. In: Neugebauer, R.: Ressourceneffizienz. 1. Auflage, Springer-Verlag GmbH, Berlin-Heidelberg, ISBN 978-3-662-52888-4.

European Commission (2013): Combining Process Intensification-driven Manufacture of Microstructured Reactors and Process Design regarding to Industrial Dimensions and Environment [online]. European Commission, COPIRIDE -project [abgerufen am 3. Jan. 2019], verfügbar unter: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/92652/reporting/en>

European Commission (kein Datum): Fast, flexible, modular production technology provides platform for future European growth. European Commission, f³-factory-project, auch verfügbar als PDF: <https://cordis.europa.eu/docs/results/228867/final1-f3-factory-keymessages-and-casestudy-summaries.pdf>

Europic (2019): PI Technologies [online]. European Process Intensification Centre [abgerufen am 3. Jan. 2019], verfügbar unter: <https://europic-centre.eu/pi-technologies/>

Franke, R.; Löb, P.; Jucys, M. und Rehfinger, A. (2008): Zukunftstechnologie Mikroreaktor – Mikroverfahrenstechnik zur Prozessintensivierung in der Chemieproduktion. Elements22 – Newsletter von Evonik Industries AG, auch verfügbar als PDF: <https://corporate.evonik.com/misc/epaper/elements/30/elements-22-de.pdf>

Gani, R.; Hytoft, G.; Jaksland, C. und Jensen, A. K. (1997): An integrated computer aided system for integrated design of chemical processes. Computers & Chemical Engineering, **21**(10), S. 1135 – 1146.

Geipel-Kern, A. (2018): Dezentral und modular: Wie eine Gerberei ihre eigenen Chemikalien herstellt [online]. PROCESS, 30. Okt. 2018 [abgerufen am 12. Nov. 2018], verfügbar unter: <https://www.process.vogel.de/dezentral-und-modular-wie-eine-gerberei-ihre-eigenen-chemikalien-herstellt-a-770906/>

Grützner, T.; Ziegenbalg, D. und Güttel, R. (2018): Process intensification – an unbroken trend in chemical engineering. Chemie Ingenieur Technik, **90**(11), S. 1823 – 1831.

Harmsen, J. (2013): Implementation of Process Intensification in Industry. In: Boodhoo, K. und Harvey, A.: Process Intensification for Green Chemistry. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, ISBN 978-0-470-97267-0.

Heck, J. und Kaaden, A. (2018): Flow-Chemistry: Chancen für Spezialchemie und Pharmazie – Miprowa Milli-Reaktor bewährt sich im großtechnischen Einsatz [online]. CHEManager, 22. März 2018 [abgerufen am 22. Nov. 2018], verfügbar unter: <https://www.chemanager-online.com/themen/mechanische-verfahrenstechnik/flow-chemistry-chancen-fuer-spezialchemie-und-pharmazie>

Hessel, V. (2009): Novel process windows – gate to maximizing process intensification via flow chemistry. *Chemical Engineering & Technology*, **32**(11), S. 1655 – 1681.

Hoffmann, J. (2005): Mikro in Chemie ganz groß [online]. Informationsdienst Wissenschaft e.V. (idw), 7. Jul. 2005 [abgerufen am 29. Jan. 2019], verfügbar unter: <https://idw-online.de/de/news120575>

Hüser, T (2018): Lanxess erhält Innovationspreis für Modulare Anlage [online]. *PROCESS*, 22. Feb. 2018 [abgerufen am 12. Nov. 2018], verfügbar unter: <https://www.process.vogel.de/lanxess-erhaelt-innovationspreis-fuer-modulare-anlage-a-689131/>

Hüther, A.; Geisselmann, A. und Hahn, H. (2005): Process intensification – a strategic option for the chemical industry. *Chemie Ingenieur Technik*, **77**(11), S. 1829 – 1837.

Iser, R. (2014): Modular in den Wettbewerb [online]. P&A – Verfahren. Prozesstechnik. Automation. publish-industry Verlag GmbH, 16. Sept. 2014 [abgerufen am 29. Jan. 2019], verfügbar unter: <https://www.industr.com/de/modular-in-den-wettbewerb-88183>

Jaksland, C.; Gani, R. und Lien, K. (1995): Separation process design and synthesis based on thermodynamic insights. *Chemical Engineering Science*, **50**, S. 511 – 530.

Jiménez-González, C. und Constable, D. J. (2011): Green chemistry and Engineering – A Practical Design Approach. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, ISBN 978-0-470-17087-8.

Jopp, K. (2012): Chemiefabrik auf Weltreise. *Evonik-Magazin*, Feb. 2012, auch verfügbar als PDF: https://corporate.evonik.de/_layouts/15/evonik/downloadhandler.ashx?fileid=658

Kalakul, S.; Malakul, P.; Siemanond, K. und Gani, R. (2014): Integrated of life cycle assessment software with tools for economic and sustainability analyses and process simulation for sustainable process design. *Journal of Cleaner Production*, **71**, S. 98 – 109.

Keil, F. J. (2018): Process intensification. *Reviews in Chemical Engineering*, **34**(2), S. 135 – 200.

Kiss, A. A. (2016): Process Intensification: Industrial Applications. In: Segovia-Hernández, J. G. und Bonilla-Petriciolet, A.: Process Intensification in Chemical Engineering. Springer International Publishing, Cham, ISBN 978-3-319-28390-6.

Kralisch, D. und Weyell, P. (2015): Ressourceneffizienz im Maschinen- und Anlagenbau - Potenziale der Miniaturisierung. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin, auch verfügbar als PDF unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/VDI-ZRE_Kurzanalyse-14_Miniaturisierung.pdf

Landtag Nordrhein-Westfalen Enquetekommission (2015): Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren. Landtag Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, auch verfügbar als PDF unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/GB_I/I.1/EK/16.WP/EK_II/MMD16-8500_Bericht.pdf

Lang, J.; Löb, P. und Maskos, M. (2015): Mikro macht mobil. Elements - Newsletter von Evonik Industries AG, Dezember 2015, Ausgabe 53, auch verfügbar als PDF: <https://corporate.evonik.com/misc/ePaper/elements/60/elements-53-de.pdf>

Lang-Koetz, C. (2016): Neue Technologien als Befähiger für ressourceneffiziente Produkte und Dienstleistungen. In: Abele, T.: Die frühe Phase des Innovationsprozesses. Springer Fachmedien, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-09722-6.

Löb, P.; Rehm, T. H.; Ghaini, A.; Illg, T.; Lang, J. und Richert, H. (2014): Integration eines Mikroreaktor-basierten Multipurpose-Aufbaus in eine containerartige Produktionsinfrastruktur. Chemie Ingenieur Technik, **86**(9), S. 1367.

Marrero, J. und Gani, R. (2001): Group contribution based estimation of pure component properties. Fluid Phase Equilibria, **183** – **184**, S. 183 – 208.

Pask, S. D.; Nuyken, O. und Cai, Z. (2012): The spinning disk reactor: an example of a process intensification technology for polymers and particles. Polymer Chemistry, **3**, S. 2698 – 2707.

Peters, M. S.; Timmerhaus, K. D. und West, R. E. (2003): Sign and economics for chemical engineers. In: Peters, M. S.; Timmerhaus, K. D. und West, R. E.: Plant Design and Economics for Chemical Engineers. 5. Auflage, Mc Graw Hill, New York, ISBN-10 0071240446.

Portha, J.-F.; Falk, L. und Commenge, J.-M. (2014): Local and global process intensification. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, **84**, S. 1 - 13.

ProcessNet Fachsektion Prozessintensivierung (2008): Prozessintensivierung - Eine Standortbestimmung -. ProcessNet Fachsektion Prozessintensivierung, DECHEMA e.V., Frankfurt am Main, auch verfügbar als PDF unter: https://dechema.de/Publikationen/Status_+und+Positionspapiere/2008+Prozessintensivierung+_+Eine+Standortbestimmung-p-125076.html

Ramshaw, C. und Arkley, K. (1983): Process intensification by miniature mass transfer. Process Engineering, **64**, S. 29 - 31.

Rehm, T. H. et al. (2017): Chemoselective three-phase hydrogenation of an Ombrabulin nitro-stilbene intermediate in a continuous- flow mobile platform. Chemical Engineering Journal, **316**, S. 1069 - 1077.

Rohn, H.; Lang-Koetz, C.; Pastewski, N. und Lettenmeier, M. (2009): Identifikation von Technologien, Produkten und Strategien mit hohem Ressourceneffizienzpotenzial - Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH, Wuppertal, ISSN 1867-0237.

Segovia-Hernández, J. G. und Bonilla-Petriciolet, A. (2016): Introduction. In: Segovia-Hernández, J. G. und Bonilla-Petriciolet, A.: Process Intensification in Chemical Engineering. Springer International Publishing, Cham, ISBN 978-3-319-28390-6.

Stankiewicz, A. L. und Moulijn, J. A. (2000): Process intensification: transforming chemical engineering. Chemical Engineering Progress, **96**(1), S. 22 - 34.

Stankiewicz, A. L. und Moulijn, J. A. (2002): Process intensification. Industrial & Engineering Chemistry Research, **41**, S. 1920 - 1924.

SUSCHEM (2019): Process Intensification [online]. The European Technology Platform for Sustainable Chemistry [abgerufen am 3. Jan. 2019], verfügbar unter: <http://www.suschem.org/technologies/process/process-intensification>

Touris, C. und Porcelli, J. V. (2003): Process intensification – has its time finally come? *Chemical Engineering Progress*, 99, S. 50 – 55.

Van Gerven, T. und Stankiewicz, A. (2009): Structure, Energy, Synergy, Time – The Fundamentals of Process Intensification. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48, S. 2465 – 2474.

VDE (2007): Trends in der Weiterentwicklung und Anwendung der Mikrosystemtechnik (Mikrosystemtechnik-Kongress 2007). Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin, auch verfügbar als PDF: <https://www.vde.com/resource/blob/857254/b8aa311da22ad7638b379c16f6be1d826/mikrosystem-data.pdf>

VDI 4800 Blatt 1:2016-02: Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Wachsen, O.; Bacher, V.; Geisbauer, A.; Appel, J.; Niebuhr, V. und Lade, O. (2015): Anforderungen der zukunftsorientierten Spezialchemie an die angewandte Reaktionstechnik. *Chemie Ingenieur Technik*, 87(6), S. 683 – 693.

ANHANG A

Tabelle 6: Ausgewählte Begriffsdefinitionen der letzten 25 Jahre von Prozessintensivierung nach Keil¹⁶¹

Definition	Quelle
Prozessintensivierung ist das Entwerfen von besonders kompakten Produktionsanlagen , die geringere Apparatevolumina und Installationskosten aufweisen.	Ramshaw und Arkley (1983)
Prozessintensivierung ist eine Strategie zur Reduzierung der Chemieanlagengröße bei gleichbleibendem Produktionsziel.	Cross und Ramshaw (1986)
Unter Prozessintensivierung wird die Entwicklung von innovativen Apparaten und Technologien verstanden , die eine entscheidende Verbesserung in der chemischen Produktion und Verarbeitung (Verringerung von Apparatevolumen, Energieverbrauch oder Abfallmenge) aufweisen und zu kostenreduzierteren, sicheren und nachhaltigeren Technologien führen.	Stankiewicz und Moulijn (2000)
Prozessintensivierung bezieht sich auf Technologien , durch die große, teure, energieintensive Anlagen/Prozesse mit kleineren, weniger kostenintensiven, effizienteren ersetzt werden können oder durch die mehrere Grundoperationen in einem oder wenigen Apparaten umsetzbar sind.	Touris und Porcelli (2003)
Prozessintensivierung ist eine Zusammenstellung radikal innovativer Prinzipien (Paradigmenwechsel) für Apparate und Prozesse , welche hinsichtlich der Effizienz von Prozessen (sowie Prozessketten), Kapital und Betriebskosten, Qualität, Abfall, Prozesssicherheit (und anderer Aspekte) eine signifikante Verbesserung mit sich bringen kann.	Anxionnaz et al. (2007a)
Prozessintensivierung steht für einen integrierten Ansatz für Produkt- und Prozessinnovationen in der Forschung und Entwicklung chemischer Herstellungsverfahren zur Erhaltung der Wirtschaftlichkeit bei zunehmenden Unsicherheitsfaktoren (z. B. Kundennachfrage, verfügbare Rohstoffmenge).	Becht et al. (2009)
Prozessintensivierung ist ein holistischer, ganzheitlicher Intensivierungsprozess (z. B. globale Prozessintensivierung) im Gegensatz zum klassischen Ansatz, welcher nur auf die Effizienzsteigerung einer einzelnen Grundoperation oder eines einzigen Apparates abzielt.	Portha et al. (2014)
Prozessintensivierung bezeichnet jede Entwicklung in der chemischen Technik , die zu wesentlich kleineren, saubereren, sicheren und energieeffizienteren Technologien führt oder die mehrere Grundoperationen in einem oder wenigen Apparaten kombiniert.	Baldea (2015)

¹⁶¹ Vgl. Keil (2018), S. 136.

ANHANG B

Tabelle 7: PI-Technologien mit hohem und mittlerem Energieeinsparpotenzial¹⁶²

PI-Technologie oder Methode	Energie-spar-poten-zial	Wettbe-werbs-poten-zial	CO ₂ -Einspar-poten-zial	Pro-duk-t-reife	Erfolgs-wahr-schein-lichkeit
Wärme-Integrierte Destillation	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
Reaktive Destillation	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
Membrangestützte reaktive Destillation	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Mittel
Mikrowellen Heizung/ Trocknung	Hoch	Hoch	Niedrig	Hoch	Hoch
Statische Mischer für kontinuierliche Reaktionen	Hoch	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch
Pulsed compression reactor	Hoch	Mittel	Hoch	Niedrig	Niedrig
Zentrifugaler fl-fl-Contractor	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch
Rotor-Stator-Apparat	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch
Photochemische Reaktion	Hoch	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel
Reaktive Absorption	Hoch	Niedrig	Hoch	Hoch	Hoch
Elektrofeldverstärkte Extraktion	Hoch	Niedrig	Niedrig	Hoch	Hoch
Superkritische Separatoren	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel	Hoch
Weiterentwickelte Plattenwärmetauscher	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch	Hoch
Rotating packed beds	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch	Mittel
Oszillator	Mittel	Hoch	Niedrig	Hoch	Hoch
Gegenstromreaktor	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Hoch

¹⁶² Vgl. Keil (2018), S. 139.

PI-Technologie oder Methode	Energie-spar-potenzial	Wettbe-werbs-potenzial	CO ₂ -Einspar-potenzial	Pro-duk-t-reife	Erfolgs-wahr-schein-lichkeit
Hochentwickelter Rohrbündelwärmetauscher	Mittel	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch
Statischer Mischer	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel
Monolithischer Reaktor	Mittel	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch
Strukturierte Reaktoren	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel
Membrankristallisationstechnik	Mittel	Mittel	Mittel	Niedrig	Niedrig
Membrandestillationstechnik	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel
Destillationsper-vaporation	Mittel	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel
Ultraschallreaktor mit verbessertem Massentransfer	Mittel	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch
Hydrodynamischer Kavitationsreaktor	Mittel	Mittel	Niedrig	Mittel	Mittel
Impinging streams reactor	Mittel	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel
Sonochemischer Reaktor	Mittel	Mittel	Niedrig	Mittel	Mittel
Ultraschall-verstärkte Kristallisation	Mittel	Mittel	Niedrig	Niedrig	Niedrig
Pulsierte Verbrennungs-trocknung	Mittel	Mittel	Niedrig	Niedrig	Mittel
Adsorbtiv-destillation	Mittel	Niedrig	Mittel	Niedrig	Niedrig
Reaktive Extraktionskolonnen	Mittel	Niedrig	Mittel	Mittel	Hoch
Extraktive Destillation	Mittel	Niedrig	Niedrig	Mittel	Mittel

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin
Tel. +49 30-2759506-0
Fax +49 30-2759506-30
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE