

# Zirkularität – Die Herausforderung des Chemieingenieurwesens

Jörg Sauer\* und Olaf Wachsen

DOI: 10.1002/cite.202500009

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

Die Erreichung der Klimaneutralität der chemischen Industrie erfordert einen grundlegenden Umbau der Wertschöpfungsketten in 20 Jahren. Um den Kohlenstoffkreislauf zu schließen, werden bekannte Technologien wie Pyrolyse oder Vergasung in neuen Wertschöpfungsketten eingesetzt. Die Endprodukte müssen weiterhin den hohen Qualitätsanforderungen der Abnehmerindustrien genügen. Die Herausforderung besteht darin, Prozesse zu entwickeln, die tolerant gegenüber der Vielzahl der Rohstoffe sind. Für eine erfolgreiche Umsetzung ist gründliches Scale-up erforderlich, das in der Regel eine Pilotierung einschließt. In der zur Verfügung stehenden Zeit können die Ziele nur erreicht werden, wenn neue Wege der Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren und Sektoren mit der Wissenschaft, besonders in der Aus- und Weiterbildung, beschritten werden.

**Schlagwörter:** Grüne industrielle organische Chemie, Holistic chemical engineering, Technical Readiness Level (TRL), Toleranz, Wertschöpfungsbaum

*Eingegangen:* 15. Januar 2025; *revidiert:* 12. April 2025; *akzeptiert:* 23. April 2025

## Circularity – A Chemical Engineer's Challenge

Achieving climate neutrality in the chemical industry requires a fundamental restructuring of the value chains in just 20 years. To close the carbon cycle, well-known technologies such as pyrolysis or gasification will be used in new value chains. The end products must continue to meet the high quality requirements of the end user industries. The challenge is to develop processes that are tolerant of the variety of raw materials. Successful implementation requires thorough scale-up, which usually includes piloting. In the time available, the goals can only be achieved if new ways of cooperation between the various players and sectors with science, especially in education and training, are pursued.

**Keywords:** Green industrial organic chemistry, Holistic chemical engineering, Technical Readiness Level (TRL), Tolerance, Value trees

## 1 Einleitung

Die chemische Industrie ist eine der wichtigsten Industriebranchen in Deutschland, insbesondere die Grundstoffindustrie ist dabei energie- und rohstoffintensiv. Der Rohöl einsatz für die chemische Industrie betrug in 2022 11,7 Mio t bezogen auf ein Gesamtaufkommen der Mineralöl erzeugnisse in Deutschland von 129 Mio t/a; damit verbunden ist der Anteil der chemischen Industrie an den Treibhausgasemissionen Deutschlands von 6,5 % [1]. Heutige Produkte der industriellen organischen Chemie basieren auf maßgeschneiderten Technologieplattformen, die entlang der Wertschöpfungskette kontinuierlich weiterentwickelt werden. Die Anstrengungen der Unternehmen zur wirtschaftlichen Optimierung

der Wertschöpfungsketten haben dazu geführt, dass die Prozesse immer stärker auf eine ganzheitlich optimale Nutzung der fossilen Rohstoffe ausgerichtet wurden. Eine sehr schöne Darstellung der Petrochemie bzw. der industriellen

<sup>1</sup>Prof. Dr.-Ing. Jörg Sauer

 <https://orcid.org/0000-0003-3133-4110> (j.sauer@kit.edu),

<sup>2</sup>Dr. Olaf Wachsen

<sup>1</sup>Institut für Katalyseforschung und -technologie (IKFT), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, Eggenstein-Leopoldshafen 76344, Deutschland.

<sup>2</sup>Dr. Olaf Wachsen Consulting & Training GmbH, Waldweg 49, Garching an der Alz 84518, Deutschland.

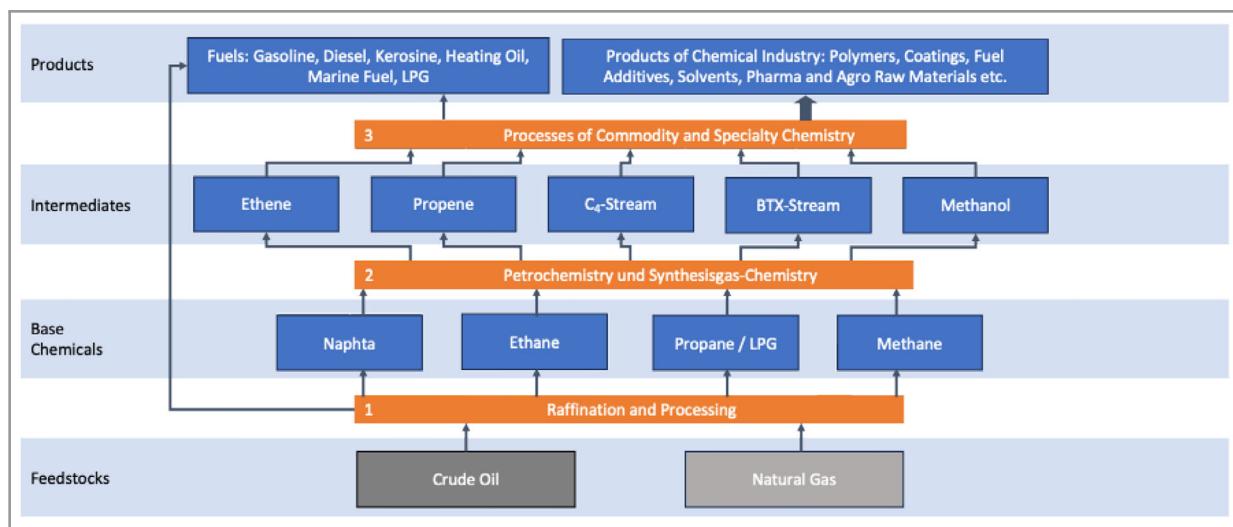


Abbildung 1. Vereinfachte Darstellung des Wertschöpfungsbaums der Petrochemie, vereinfachte Darstellung von [2] und angepasst basierend auf [3].

organischen Chemie kann der Website der Petrochemicals Europe entnommen werden [2].

Abb. 1 zeigt eine stark vereinfachte Darstellung der Wertschöpfungsketten ausgehend von fossilen Rohstoffen [3]. Die Produkte der Petrochemie sind heute stark differenziert auf eine extreme Breite von Anwendungen zugeschnitten, sodass sich der Wertschöpfungsbaum im Bereich der Produkte stark verbreitert. Heute ist die Petrochemie noch immer überwiegend von fossilen Rohstoffen abhängig. Für die Chemieindustrie in Deutschland 2022 gibt der VCI einen Anteil von 15 % nachwachsender Rohstoffe als Kohlenstoffträger an [1].

Bestehende Wertschöpfungsketten und deren Technologien wurden in den letzten Jahrzehnten systematisch darauf optimiert, unzählige und hochspezialisierte Produkte mit größtmöglicher Effizienz hinsichtlich Kosten, Ausbeute, Energieverbrauch, Emissionen etc. bereitzustellen. Die Konsequenz dieser maßgeschneiderten (tailorisierten) Prozesse ist, dass diese entsprechend anfällig gegen kleine Abweichungen durch z. B. Fluktuationen von Rohstoffmengen, Qualitäten und Zusammensetzungen sind. Die erforderliche Toleranz bzw. Resilienz, die durch die Einführung von erneuerbaren Rohstoffen und Energiequellen erforderlich ist, ist oftmals nicht trivial gegeben.

Ein analoger Ansatz in der numerischen Optimierung ist das „No-Free-Lunch-Theorem (NFLT)“, das besagt, dass Optimierungsalgorithmen, die hochspezialisiert auf eine Klasse von Problemen zugeschnitten sind, effizienter sind als Algorithmen, die flexibler auf ähnliche Probleme angewendet werden können [4, 5]. Dies erhöht jedoch gleichzeitig die Anfälligkeit hochspezialisierter Systeme gegenüber Änderungen. Daher müssen bei der Entwicklung neuer Anlagen verschiedene Designs, Prozessparameter und Strategien evaluiert werden, da eine Lösung in einem Kontext

möglicherweise nicht in einem anderen funktioniert. Daher ist es wichtig, flexibel zu bleiben und verschiedene Ansätze zu testen, um den spezifischen Anforderungen und Herausforderungen jeder chemischen Anlage gerecht zu werden. Wenn die Prinzipien der NFLT nicht berücksichtigt werden, kann dies zu ineffizienten Prozessen führen, die höhere Kosten und eine geringere Produktqualität zur Folge haben. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass unvorhergesehene Probleme auftreten und innovative Ansätze übersehen werden, was die Wettbewerbsfähigkeit der Chemieanlage gefährden kann.

Veränderungen in der Verfügbarkeit von Basischemikalien führen zu Anpassungsprozessen im Netzwerk des Wertschöpfungsbaums. Am oberen Ende des Wertschöpfungsbaums hat die zunehmende Verfeinerung der Produkte hinsichtlich ihrer Anwendungseigenschaften zur Bildung komplexerer Produktverbünde geführt, die sich aus verschiedenen Materialklassen zusammensetzen können. Angesichts dieser Entwicklung, die sich in der industriellen organischen Chemie als Petrochemie seit mehr als 80 Jahren vollzieht, steht die Umstellung der industriellen organischen Chemie auf erneuerbare Rohstoffe und Energieträger noch am Anfang. Gleichzeitig haben sich die Länder ehrgeizige Ziele bis zur Erreichung des Netto-Null-Ziels gesetzt. Für Deutschland beträgt die Zeit bis zum Erreichen des Netto-Null-Ziels noch 21 Jahre.

Die zukünftige klimaneutrale industrielle organische Chemie mit geschlossenem Kohlenstoffkreislauf wird auf der Kombination von elektrischem Strom und Wasserstoff als Energieträger und rezyklierten Kohlenstoffträgern, Biomasse und CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle basieren. Abb. 2 zeigt einen stark vereinfachten Wertschöpfungsbaum, der den Stand der zukünftigen grünen industriellen organischen Chemie darstellt. Aktuelle Studien geben eine Abschätzung

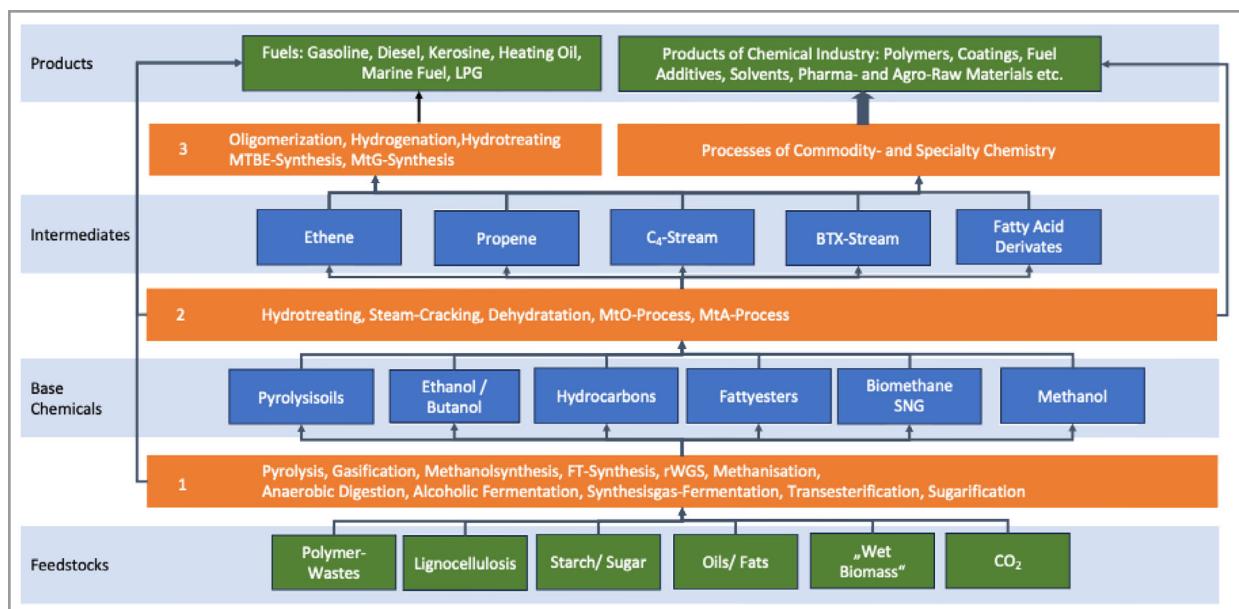


Abbildung 2. Zukünftiger Wertschöpfungsbaum der grünen industriellen organischen Chemie, angepasst basierend auf [3].

über die zu erwartende Mengenverteilung zwischen den verschiedenen erneuerbaren Kohlenstoffquellen [6–8]. Verschiedene Szenarien zeigen den Einfluss der Verteilung der Kohlenstoffträger auf den Bedarf an Energie bzw. Wasserstoff zur Reduktion auf den Oxidationszustand der Produkte der industriellen organischen Chemie. Neben dem Energiegehalt unterscheiden sich die verschiedenen Kohlenstoffträger erheblich in dem Logistik-Aufwand, der für einen Transport über Land oder auf See zu treiben ist.

In den letzten Jahren gab es im Bereich der Rohstoffe-Basischemikalien-Intermediate durchaus Änderungen, wie die verstärkte Nutzung von kohlebasiertem Synthesegas und Methanol als Rohstoff für die Olefinherstellung in China oder die verstärkte Nutzung von Natural Gas Liquids für die Olefinherstellung. Diese waren mit einer Anpassung und nicht mit einer kompletten Veränderung des Wertschöpfungsbaums verbunden. Die Veränderungen fanden größtenteils außerhalb Europas in Nordamerika, China und im mittleren Osten statt. Der Übergang zu einer klimaneutralen Rohstoffbasis in der Chemie könnte große Investitionen zurück nach Europa und insbesondere in die größte Volkswirtschaft Europas, Deutschland, bringen, wenn die Frage der Versorgung mit klimaneutralen Energie- und Kohlenstoffträgern gelöst werden kann.

Der Übergang zu erneuerbaren Basischemikalien ist nicht nur ein komplexes Unterfangen, sondern es wird auch von entscheidender Bedeutung sein, die Wertschöpfungsketten gegenüber Störungen innerhalb und außerhalb des Systems widerstandsfähig zu machen. Die Vielfalt der kohlenstoffhaltigen Produkte ermöglicht die Etablierung zirkulärer Wertschöpfungskonzepte über die gesamte industrielle organische Chemie hinweg.

## 2 Werkzeuge zur Bewertung und Optimierung von Prozessen und Anlagen

### 2.1 Die TRL-Skala zur Einordnung der technischen Reife von Prozessen und Prozess-Units

Die Skala der „Technical Readiness Levels (TRL)“ wird in akademischer Forschung, Industrie und von Behörden und Regierungsstellen genutzt, um die technische Reife von Technologien in einen Standard einzurichten. Das TRL-Konzept wurde ursprünglich geschaffen, um die Reife von Entwicklungen in der Luft- und Raumfahrt einordnen zu können [9]. Buchner et al. [10] haben die Anwendung der TRL-Skala auf die chemische Verfahrenstechnik beschrieben. Die Entwicklung wird nach der TRL-Skala von Grundlagenforschung (TRL 0) über angewandte Forschung (TRL 1–4) und Entwicklung (TRL 4–8) in die Umsetzung vorangetrieben (TRL 7–9). Als Entwicklungswerzeuge werden dabei Untersuchungen vom Labor, in Mini-Plants, Pilotanlagen, Demo-Anlagen und Produktionsanlagen durchgeführt. Die experimentellen Arbeiten werden durch immer weiter verfeinerte Modelle der Prozesse bzw. Units und der Anlagentechnik und Anlagen unterstützt, wobei beide Ansätze sich durch einen Datenaustausch komplementieren.

Die Einfachheit der Skala und die universelle Anwendbarkeit ist gleichzeitig ihre größte Schwäche, da mit der Skala nicht zwischen Prozess-Units und gesamten Prozessen abgegrenzt werden kann und deshalb eine technische Reife einer Prozess-Unit nur für eine „Prozess-Umgebung“ anzugeben ist. Bei einer Veränderung der „Prozess-Umgebung“ kann die technische Reife von einem hohen zu einem kleinen Wert zurückfallen mit dem damit verbundenen Aufwand für die Entwicklung der Prozess- und Anlagen-

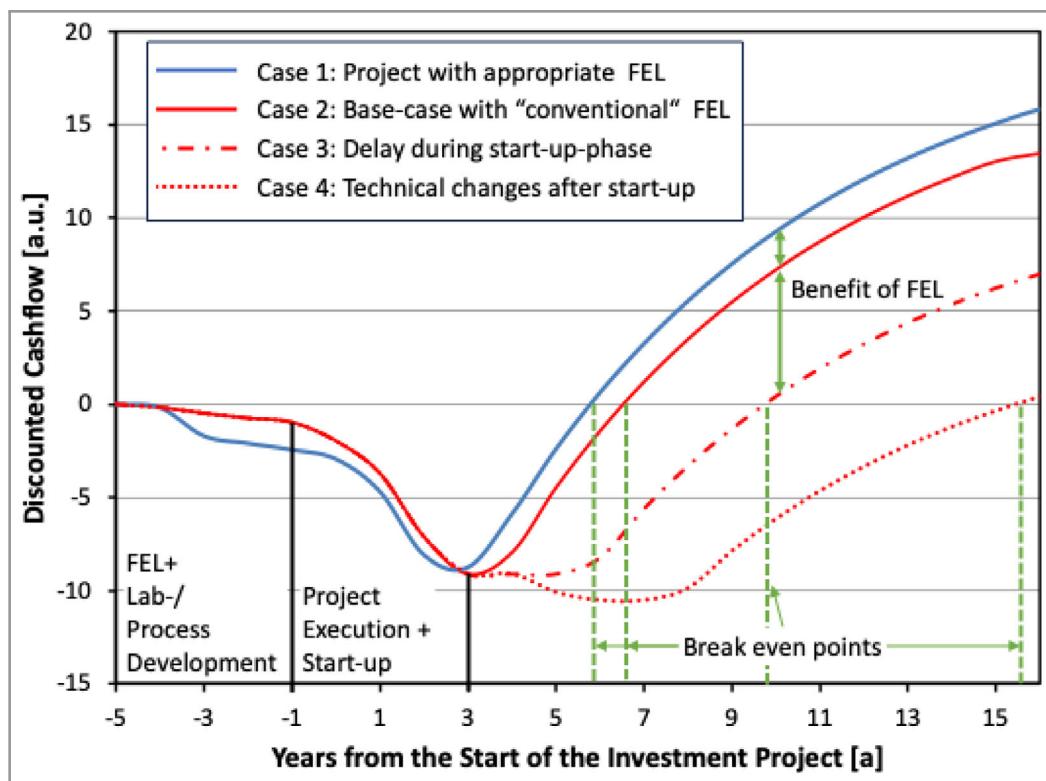


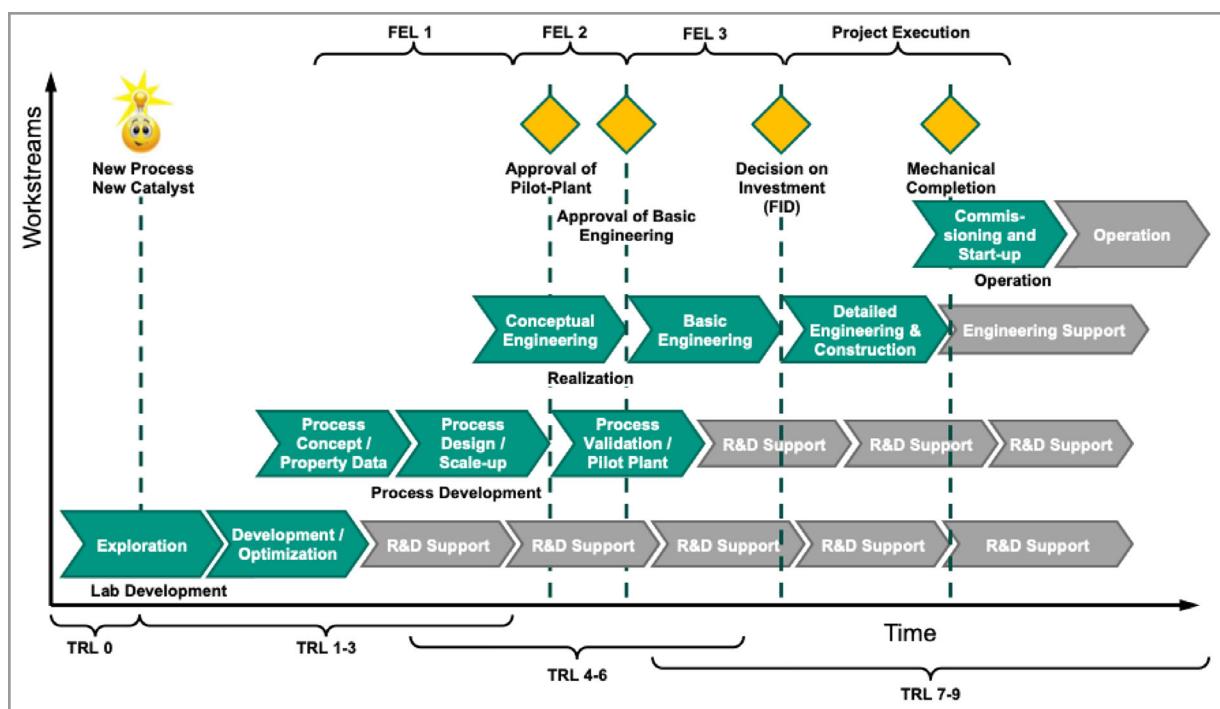
Abbildung 3. "Discounted Cash Flow Curve" für unterschiedlich verlaufende Projekte von der Entwicklung bis zur produzierenden Anlage.

technik. Während das ursprüngliche Konzept aus der Luft- und Raumfahrttechnik beim Übergang von TRL 5 zu 6 den Übergang von einer Laborumgebung in die relevante Systemumgebung vorsah, beschreiben Buchner et al. den schrittweisen Entwicklungs- und Realisierungsprozess mit steigenden TRL-Graden.

Bei der Verwertung von Rohstoffen der zirkulären Wertschöpfung, insbesondere bei der Verarbeitung von Rest- und Abfallströmen der Lebensmittelindustrie, Land- und Forstwirtschaft, wie auch der Verwertung von Kunststoff-Reststoff- und Abfallströmen treten Schwankungen bei den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Rohstoffströme auf. Auch hierbei dient die Bewertung mithilfe der TRL-Skala nur einer schematischen und halb-quantitativen Einordnung. Für die Entscheidung, ob ein Transfer in die Anwendung möglich ist, ist eine hohe individuelle Bewertungskompetenz zwingend notwendig, um zu bewerten und zu quantifizieren, ob der Transfer sicher möglich ist oder ob ein erneutes Durchlaufen der TRL-Reifegrade erforderlich ist. Es ist fraglich, ob das Konzept des TRL als das alleinige Maß für die Reife einer Entwicklung ausreichend ist. Daneben sollten deswegen weitere Reifegrade (Process Readiness Level (PRL), Community Readiness Level (CRL); siehe Kapitel 5) angewendet werden.

## 2.2 Front-End-Loading (FEL)

Im Bereich der Anlagenplanung wird das Konzept des Front-End-Loading (FEL) mehrheitlich verwendet, u. a. von Beratungsunternehmen detailliert ausgearbeitet und durch Benchmarkstudien verfeinert. In der öffentlich zugänglichen Literatur finden sich dennoch nur wenige brauchbare Darstellungen, die keine einheitliche Vorgehensweise beschreiben. Eine der wenigen zusammenfassenden Darstellungen findet sich in Unnikrishnan et al. [11]. Das Konzept des FEL basiert auf der Annahme, dass die genaue Definition der Projektziele und die detaillierte Ausarbeitung von Verfahrens- und Anlagenkonzepten sowie deren Bewertung nach wirtschaftlichen, technischen, sozialen und ökologischen Kriterien die Wahrscheinlichkeit des Projekterfolgs erhöht. Diese Annahme ist plausibel, da Zahlungsströme, die in einer frühen Projektphase vor Beginn der Investitionstätigkeit anfallen, einen geringen Einfluss auf den wirtschaftlichen Wert des Projektes haben (siehe Abb. 3). Gravierend sind dagegen technische Änderungen an der Anlage in einer späten Phase des Anlagenbaus oder während der Inbetriebnahme, die dazu führen können, dass das Projekt nie einen positiven Wertbeitrag für das Unternehmen erbringt.



**Abbildung 4.** Darstellung der Arbeitsprozesse auf dem Weg zu einer produzierenden Anlage: Produktentwicklung/Laborforschung, Prozessentwicklung, Anlagenplanung, Anlagenbetrieb, angepasst aufbauend auf [16] mit Zuordnung der Technischen Reifegrade (TRL) und Phasen des Front-End-Loading (FEL).

Das FEL wird der Detailplanung und dem Anlagenbau vorgeschaltet und häufig in mehrere Phasen mit Meilensteinen unterteilt. Eine häufig genutzte Aufteilung ist:

- FEL 1: Festlegung der Zielsetzung des geplanten Projekts, Entwicklung von Verfahrens- und Anlagenkonzepten
- FEL 2: Bewertung der Machbarkeit des Projekts, Auswahl des Verfahrens- und Anlagenkonzepts
- FEL 3: Basic-Engineering bzw. Front-End-Engineering and Design (FEED)

Das Tool der FEL wird vermehrt in der Umsetzung verfahrenstechnischer Investitionsprojekte eingesetzt und soll damit die Qualität des Anlagenbauprojektes sichern. Insbesondere die Phase FEL 2 kann ausschließlich reaktiv agieren, wenn in der vorangegangenen Produkt- und Prozessinnovation die Weichen für bestimmte Technologien, chemische Pfade und Hilfsmittel, wie Katalysatoren, Lösemittel, etc., bereits definiert wurden. Eine enge und frühzeitige Verzahnung von Produktentwicklung, Verfahrensentwicklung und Anlagenplanung und -bau ist somit notwendig, um Konsequenzen von Entscheidungen aus den frühen Phasen des Produkt- und Prozessentwicklungsprojekts erkennen zu können. Die richtige Balance zwischen der Minimierung der Zeit bis zur Markteinführung eines neuen Produktes/Prozesses (Time-to-Market) und der Zeit für die solide Prozessentwicklung und -validierung ist entscheidend für den Projekterfolg und abhängig von der Projektstruktur und vorhergehender Unternehmenserfahrung.

Der Prozess von der Idee bis zur produzierenden Anlage ist in Abb. 4 mit einer möglichen Zuordnung der FEL-Phasen und der TRLs dargestellt. Analog zur Bewertungskompetenz bei den TRL-Graden ist entsprechende Kompetenz bei der Definition der Aufgaben und Bewertung von Resultaten einzelner Phasen notwendig. Der Prozess liefert ausschließlich das Tool und den Rahmen zur Projektumsetzung und ersetzt nicht die erforderliche Kompetenz und Erfahrung, um die richtigen Entscheidungen zum richtigen Zeitpunkt zu treffen.

### 2.3 Die Toleranz von Prozessen

Die Ausweitung des Einsatzes von Rohstoffen der zirkulären Wertschöpfung erfordert eine Anpassung der Prozesskonzepte gegenüber der heutigen Petrochemie, da sich die Rohstoffe der Herstellung von Intermediaten aus Basischemikalien annähern und sich damit die Variabilität der Rohstoffeigenschaften in den Prozessen der „grünen industriellen organischen Chemie“ fortsetzt. Dieses Thema wurde bereits in den Jahren 2015–2019 in einer Arbeitsgruppe der Fachgruppe Reaktionstechnik der Dechema/ProcessNet diskutiert. Aus dem Expertengespräch am 10.12.2015 wurde eine Definition für tolerante Prozesse abgeleitet:

„Tolerante Prozesse“ sind Prozesse, die gegenüber wechselnden Randbedingungen robust sind. Diese umfassen

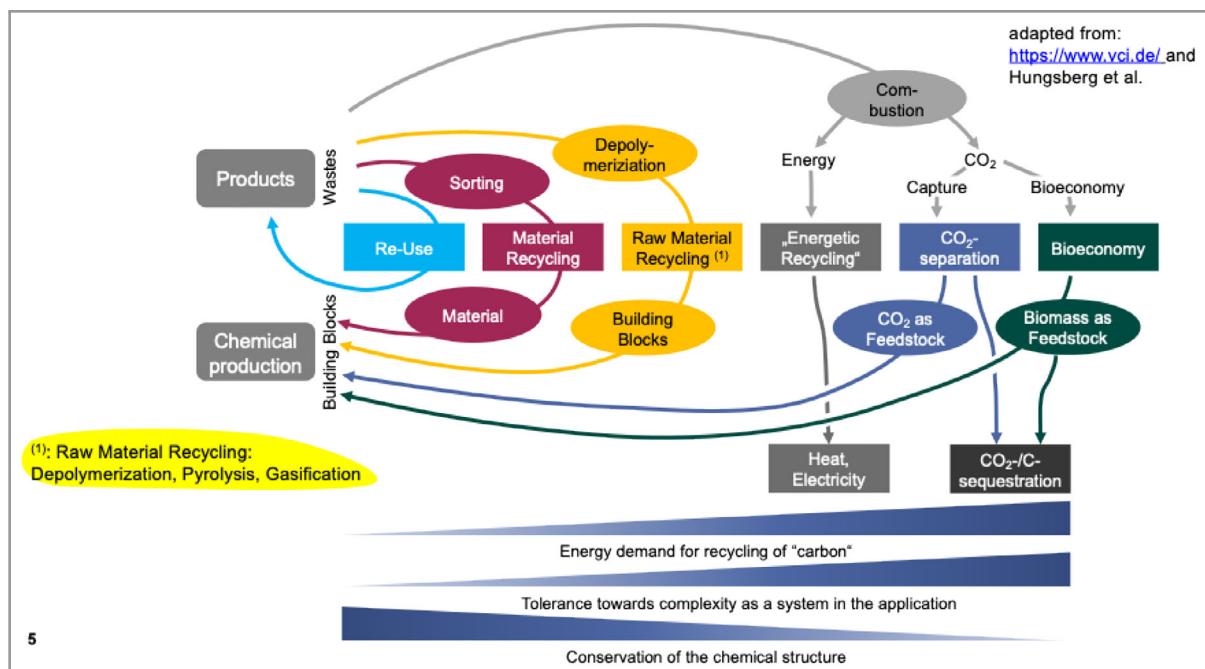


Abbildung 5. Varianten des Kohlenstoffkreislaufs einer „grünen industriellen organischen Chemie“ angepasst von [17].

variable Rohstoffeigenschaften, Energieverfügbarkeit, Standortfaktoren und Nachfragen der Märkte. Tolerante Prozesse führen trotz ihrer Variabilität zu Qualitätsprodukten und sind im Wettbewerb ökonomisch und nachhaltig. Für diese Prozesse ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit notwendig, sowohl entlang der gesamten Prozess- und Wertschöpfungskette als auch über verschiedene Anwendungsfelder hinweg.“

In der Folge arbeiteten verschiedene Forschungsgruppen am Konzept der Prozesstoleranz [12, 13]. Maußner et al. [12] entwickelten ein mehrstufiges Konzept zum systematischen Design von toleranten Reaktoren und wendeten dieses auf die Toleranz von Oxidationsreaktoren für die Herstellung von Maleinsäureanhydrid gegenüber der Zusammensetzung des Rohstoffstroms an. Auf Stufe 1 wird eine optimale, ideale Trajektorie für die Durchführung der Reaktion unter variablen Feedbedingungen und unbegrenztem Stoff- und Wärmeübergang für das betrachtete Volumenelement identifiziert. In Stufe 2 werden die Randbedingungen definiert, unter denen optimale, reale Bedingungen für die Durchführung der Reaktion erreicht werden können. In Stufe 3 werden diese optimierten Bedingungen in einem technischen Reaktor so weit wie möglich angenähert. Mit der beschriebenen Methode war es möglich, in einem Reaktormodell eines Rohrbündelreaktors für die Maleinsäureanhydrid-Herstellung die Zusammensetzung des Feeds zwischen reinem *n*-Butan und reinem *n*-Butengemisch zu variieren.

Hungsberg et al. [13] haben am Beispiel der plasmabasierten Vergasung gezeigt, dass die Vergasungsstufe der wesent-

liche Toleranzerzeuger in der Herstellung von Methanol aus Plastikabfällen sein kann, wenn Co-Feeds (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) dem Vergasungsreaktor in der Art zugeführt werden, sodass Schwankungen im Feed bzgl. Menge und CHO-Anteilen immer in den optimalen Bereich des Van Krevelen Diagramms zur Synthesegasherstellung geführt werden.

### 3 Pyrolyse und Vergasung als Beispiel für tolerante Technologien zur Schließung des Kohlenstoff-Kreislaufs

Abb. 5 zeigt die prinzipiellen Ansätze zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufs ausgehend von Stoffen der industriellen organischen Chemie. Für komplexe Rest- und Abfallströme dürfte die Kreislaufschließung über das Rohstoffrecycling einen geeigneten Kompromiss zwischen der Erhaltung der chemischen Struktur, der Toleranz gegenüber Schwankungen in der Rohstoffqualität und dem Energieaufwand für die Kreislaufschließung darstellen. Von den genannten Verfahren sind Vergasung und Pyrolyse grundsätzlich für Stoffströme geeignet, die komplexe Materialverbünde enthalten und typischerweise durch andere Methoden nicht einem Recycling zugeführt werden können. Sie stellen grundlegend einen Ansatz von „Toleranten Technologien“ dar.

Sowohl die Vergasung als auch die Pyrolyse basieren auf Entwicklungen mit einer langen Geschichte, die in einer Vielzahl unterschiedlicher technischer Ausführungen realisiert wurden. Beide wurden in den letzten 20 Jahren auf

verschiedene Rohstoffströme angewendet. Trotz der vermeintlichen Reife der Technologien scheiterte eine Reihe von Projekten bei der Umsetzung in den Demonstrationsmaßstab. Bei mechanisch fertiggestellten Anlagen mussten umfangreiche und zeitaufwändige technische Änderungen vorgenommen werden, die zu einem langfristigen Mittelabfluss führten, der von den Unternehmen und ihren Geldgebern nicht mehr getragen werden konnte (Abb. 3, Case 4). Im Rahmen der Projekte wurden die erprobten Technologien an die im Fokus stehenden Rohstoffströme und die daraus hergestellten Produkte angepasst. Diese Änderungen konnten im Entwicklungsprozess nicht ausreichend abgesichert werden, um den Projekterfolg zu gewährleisten. Gegenüber den ursprünglichen Anwendungen und Ausführungsformen ergeben sich zwangsläufig folgende Änderungen:

1. Verwendung eines neuen Rohstoffstroms, der grundsätzlich geeignet sein sollte, der aber unterschiedliche, zeitlich schwankende Zusammensetzungen mit unterschiedlichen Verunreinigungen mit sich bringen kann.
2. Die Umsetzung von Pyrolyse und Vergasung erfolgt in technischen Ausführungen, die im Detail deutlich von bewährten Verfahren in petrochemischen Anwendungen abweichen.
3. Die Anwendung der Produkte (Synthesegas, Pyrolyseöl) soll in Verfahren erfolgen, die sehr hohe Anforderungen an die Produktqualität stellen, wie Fischer-Tropsch-Synthese oder Methanolsynthese an Synthesegas aus Vergasung.

Da die Schließung des Kohlenstoffkreislaufs in der chemischen Industrie, wie oben beschrieben, ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer klimaneutralen chemischen Industrie ist, erscheint es wichtig, erfolgreiche und gescheiterte Projekte im Detail zu analysieren und entsprechende Schlussfolgerungen für die notwendige Umsetzung der Technologien in den nächsten Jahren zu ziehen. Dabei im Fokus steht der bisher wenig betrachtete Wechsel im Wertschöpfungsbaum, weg von einem direkten Produktbezug und dessen Einfluss auf die technische Prozessentwicklung.

#### 4 Toleranz von Realisierungsprojekten und Kriterien für den wirtschaftlichen Erfolg

Die deutsche chemische Industrie war in den letzten Jahrzehnten geprägt durch den Transfer eigener Prozesse und Anlagen in andere Weltregionen mit Schwerpunkt Asien. Parallel dazu wurden bestehende Prozesse und Anlagenkonzepte hinsichtlich der Effizienz für Investitionskapital, Rohstoffe, Energie, Personal und Produktqualität weiterentwickelt, um sie in neue Teile des Wertschöpfungsbaums integrieren zu können. Die Erschließung neuer Rohstoffe und damit neuer Technologien spielte für die deutsche chemische Industrie lange Zeit keine Rolle mehr. Mit dem Ziel, den Kohlenstoffkreislauf zu schließen, ändert sich dies grundlegend, da neue Prozesse und Rohstoffe in frühe Stu-

fen der Wertschöpfungsketten der industriellen organischen Chemie eingefügt werden müssen.

Die Pilotierung von Neuentwicklungen konnte in den meisten Fällen in bereits bestehenden Pilotanlagen oder in den produzierenden Produktionsanlagen durchgeführt werden. Dabei konnte auf bestehende Modelle und Modelldatenbanken mit validierten Stoffdatenmodellen zurückgegriffen werden. Der Bau neuer Pilotanlagen wurde wegen des damit verbundenen Kosten- und Zeitaufwandes vermieden. Allerdings verringerte sich dadurch mit der Zeit auch das Wissen im Management über die Notwendigkeit der Pilotierung von Neuentwicklungen. Um die Unsicherheit beim Scale-up zu reduzieren, werden in Pilotanlagen die Rohstoffe in industriell verfügbarer Form verarbeitet und Produkte in einer Qualität hergestellt, die von Kunden zur Weiterverarbeitung abgenommen werden können.

Die repräsentative Pilotierung ist notwendig, obwohl das Gesamtbild von Prozessen und Anlagen sowie die Details auf molekularer Ebene bekannt sind und die bekannten Zusammenhänge in ausgefeilten Modellen der verfahrenstechnischen Prozesse und der Anlagenkomponenten abgebildet sind. Pilotierung ist besonders wichtig, wenn neue Stoffströme in Wertschöpfungsketten integriert werden, wie dies beim Übergang von der Petrochemie zur grünen industriellen organischen Chemie der Fall ist. Die Pilotanlage hat die folgenden Aufgaben:

- Skalierung des vollständig integrierten Prozesses mit allen Vorbehandlungs-, Aufreinigungsschritten und Kreislaufströmen
- Untersuchung von Langzeiteffekten wie Akkumulationen, Ablagerungen, Verblockungen, Katalysatorstandzeiten, Werkstoffbeständigkeit, Qualität und Menge von Abgas und Abwasser, Stabilitäten der Units und deren Zusammenspiel
- Erzeugung von realen Daten im industriellen Umfeld für die Validierung der Modelle des Prozesses und der Anlage
- Bereitstellung von Mustern für die Weiterverarbeitung beim Kunden
- Trainieren von Anlagenpersonal und Vorbereitung und Begleitung von Inbetriebnahmen
- Untersuchungen zur Toleranz des Verfahrens- und Anlagenkonzepts
- Vermeidung von unerwarteten Abweichungen („unknown unknowns“)
- Vermeidung von Übertragungsfehlern aus ähnlichen Systemen

Die große Herausforderung bei der Pilotierung von Prozessen ist der Zeit- und Kostenaufwand für die Errichtung und den Betrieb von Pilotanlagen. Bei kontinuierlichen Prozessen ist ein Betrieb in mindestens 3–4 Schichten erforderlich, was den Personalaufwand für das Bedienpersonal und die begleitende Analytik je nach Komplexität der Anlage und des darin ablaufenden Verfahrens auf 14–45 Personen ansteigen lässt. Für den Betrieb der Pilotanlage ist in der Regel ein Zeitraum von mehr als 1 Jahr bis mehrere Jahre erforderlich, um die notwendigen Validierungsversuche für

variierende Rohstoffe und Produkte mit unterschiedlichen Varianten der Verfahrens- und Anlagentechnik zu ermöglichen.

Den Kosten für die Pilotierung einer Technologieentwicklung steht jedoch der erhebliche Nutzen gegenüber, dass technische Herausforderungen früher erkannt und gelöst werden können und damit die Zeit bis zur Markteinführung marktgerechter Produkte aus der Anlage gegenüber dem Fall ohne Pilotierung verkürzt werden kann. Diese Kosten werden in der Regel durch das Risiko eines möglichen Scheiterns des Vorhabens aufgewogen, das vor allem dann zu erwarten ist, wenn an der fertiggestellten Demonstrationsanlage noch größere technische Änderungen vorgenommen werden müssen.

Das Problem der mangelnden Bereitschaft der notwendigen Pilotierung wird zunehmend bewusster. Bollini et al. [14] beschreiben in einer Roadmap 2050 der Reaktions-technik, dass alle Sektoren der Chemie und besonders die der Basischemikalien und Polymeren den Barrieren der hohen Kosten für Verfahrensentwicklung inklusive Pilotierung und den hohen Kosten für Investitionen in Anlagen gegenüberstehen, wenn es um die Einführung der neuen Technologien und Stoffströme geht. Gescheiterte Projekte haben fast immer einen erheblichen Einfluss auf die Einschätzung der Machbarkeit der Technologieentwicklung durch die jeweilige Fachcommunity. Obwohl bekannt ist, dass Projekte das Ergebnis der Arbeit der Projektbeteiligten und ihrer Kultur der Führung und Zusammenarbeit sind, wird nach einem gescheiterten Projekt die verwendete Technologie von der Community als „verbrannt“ angesehen.

## 5 Schlussfolgerung für die Community und die Ausbildung von Ingenieurinnen/Ingenieuren und technischen Chemikerinnen/Chemiker

Für die Skalierung von Verfahrensentwicklungen und Anlagen ist das Erreichen einer ausreichenden technischen Reife neuer Verfahrensschritte im Rahmen des Scale-up eine zwingend notwendige Voraussetzung. In der Definition des TRL ist die Einbettung in das industrielle Umfeld zwar bereits vorgesehen, die zu betrachtende Kette reicht jedoch von der Bereitstellung der Rohstoffe bis zum Anwender der erzeugten Produkte. Die Reife dieser gesamten Prozesskette soll durch einen weiteren Reifegrad, den „Process Readiness Level (PRL)“, ausgedrückt werden. Da die Einbettung von Prozessen, Prozessketten in neue Wertschöpfungsbäume nicht durch eine Institution oder ein Unternehmen, sondern durch das Zusammenwirken vieler Akteure möglich wird, ist es sinnvoll, diese technischen Reifegrade durch einen „Community Readiness Level (CRL)“ zu ergänzen, der ausdrücken soll, wie die Akzeptanz und die Beteiligung der relevanten Akteure in einer „Community“ sichergestellt werden. Diese „Community Readiness“ kann sich posi-

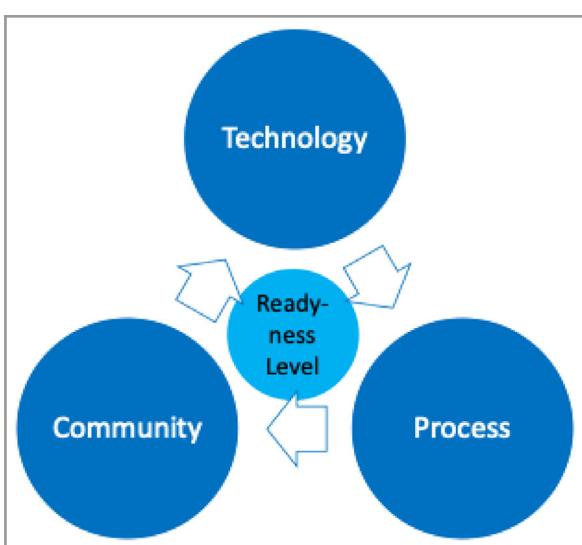


Abbildung 6. Die Verzahnung der scale-up-relevanten Reife-grade.

tiv oder negativ auf die Scale-up-Bemühungen auswirken (siehe Abb. 6).

Wenn eine „Community“ nicht vom Erfolg und der Notwendigkeit eines Scale-up überzeugt ist, werden auch die wirtschaftlichen und personellen Ressourcen für ein Scale-up in einen kostenintensiven Pilot- oder Demonstrationsmaßstab nicht zur Verfügung stehen, da sie bereits in der frühen Projektplanung nicht berücksichtigt sind. Grundlegend ist der CRL eng mit dem Thema Vertrauen in neue Technologien, neue Wege und neue Idee eines Projekt-partners verbunden. Die Quantifizierung dieser sozialen Kriterien stellt die Herausforderung und den deutlichen Mehrwert der Abschätzung dar. Vertrauen hat dabei wie bisher einen maßgeblichen Einfluss auf die Kompetenzentfaltung und damit auf den Erfolg von Projekten [15].

### Arbeitsgruppe „Holistic Chemical Engineering“

Zur Sicherstellung der zuvor beschrieben Ziele ist die erfolgreiche Transformation der Chemie-, Anlagen- und Maschinenbauindustrie zwingend erforderlich. Die dafür notwendigen Kompetenzen erfordern bei allen Beteiligten zusätzlich zum chemisch-physikalisch technischen Wissen eine tiefgreifende Auseinandersetzung mit den Erfolgsfaktoren für Veränderungen im Ganzen. Um hierzu einen positiven Beitrag zu leisten, hat sich die Arbeitsgruppe „Holistic Chemical Engineering“ mit Expertinnen und Experten aus Industrie und akademischen Bereichen gebildet:

Prof. Leon Urbas, TU Dresden; Prof. Franz Winter, TU Wien; Dr. Daniel Ohde, TUHH; Dr. Jens Friedland, Universität Ulm; Dr. Marion Börnhorst, TU Dortmund; Phillip Biessey, Ruhr-Universität Bochum; Dr. Alexander Herberg, unabhängiger Berater; Dr. Olaf Wachsen, unabhängiger Berater.

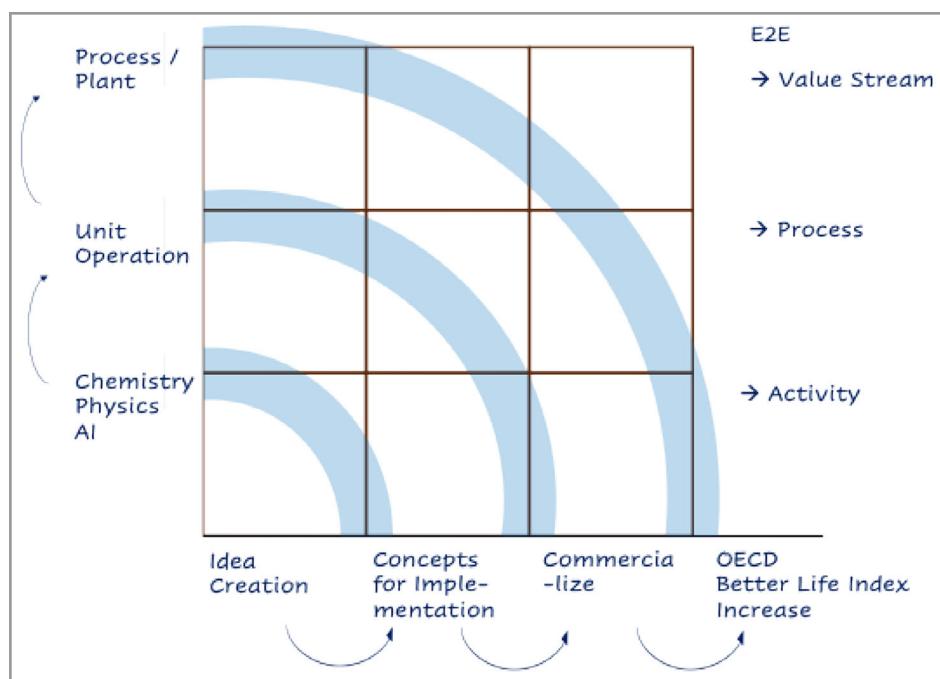


Abbildung 7. Dimensionen des „Holistic Chemical Engineering“ (© Arbeitsgruppe Holistic Chemical Engineering).

Im Team wurden vier Thesen formuliert, um die erfolgreiche Definition und Umsetzung skalierbarer Projekte zu ermöglichen. Dabei geht der Begriff „skalierbar“ deutlich über die Inhalte des klassischen Scale-Up hinaus und umfasst zusätzlich die Umsetzungskompetenz zur Realisierung der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Ziele (siehe Abb. 7).

– *These 1: Gestaltung der Ingenieur-Aus- und Fortbildung im Hinblick auf „agile Co-Creation“*

Diese Transformation erfordert einen neuen Ansatz zur Aus- und Fortbildung der zukünftigen Generation kreativer Leistungsträger. Sie müssen sich die Problemlösungskompetenzen sowie das sozial- und wirtschaftswissenschaftliche Wissen erarbeiten, die benötigt werden, um im sich entwickelnden industriellen Umfeld erfolgreich sein zu können.

– *These 2: Ganzheitliche Aus- und Fortbildung in technischer Chemie und Verfahrenstechnik*

Diese inhaltliche Herausforderung erfordert eine Weiterentwicklung der bestehenden Lehrpläne und eine Verzahnung mit der Weiterbildung der Hochschulabsolventinnen und -absolventen von der Ebene der Doktorandinnen und Doktoranden über die Young Professionals bis hin zum Senior Management. Neben fundiertem Grundlagenwissen wird die Vermittlung von Fähigkeiten zur interdisziplinären Teamarbeit, systemanalytischen Ansätzen und lösungsorientierten Arbeitsmethoden mit Umsetzungskompetenz und Verantwortungsbereitschaft immer wichtiger.

– *These 3: Fünf-Säulen-Modell einer von der Anwendung und der Kundenperspektive inspirierten Aus- und Fortbildungsansatzes*

Die Lehrpläne für Aus- und Weiterbildung von Fachkräften sollten auf fünf Säulen ausgerichtet werden:

1. Identifikation von Talenten und Zielgruppen
  2. Einbindung von Wissen aus der industriellen Anwendung in die Vermittlung der Grundlagen
  3. Entwicklung von Kompetenzen für Anwendungen bei Kunden
  4. Förderung der Eigenverantwortung der Fachkräfte
  5. Kontinuierliche Weiterentwicklung der messbaren Qualität des Programms
- *These 4: Unterstützung der Transformation hin zu einem kollaborativen Ökosystem für die Entwicklung von Produkten, Verfahren und Anlagenkonzepten*

Dieser Prozess der Weiterentwicklung der Ausbildung wird auch ein Umdenken in den Unternehmen anstoßen, sich mit dem komplexen Veränderungsprozess der Chemieindustrie zu beschäftigen und dabei eigene bestehende Geschäftsmodelle zu hinterfragen.

Die angestrebte zusätzliche Qualifikation soll dabei auf die Themen Ideengenerierung, Skalierung von Ideen, Ausarbeitung von Lösungswegen, Innovationskommunikation und Change Implementation aufbauen. Kern wird sein, neue Herausforderungen holistisch bezüglich ihrer Komplexität zu verstehen und die eigenen Fähigkeiten der Person und der Organisation hinsichtlich der notwendigen Umsetzung zu bewerten, damit die Gestaltung und Ausführung des Projektes sichergestellt werden. Die Modelle dahinter befassen sich mit den Themen des „Wollen-Können-Dürfen-Ansatzes“ und der zunehmend notwendig werdenden Betrachtung von Volatilitäten, Unsicherheiten, Komplexitäten und Mehrdeutigkeiten (VUCA – Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity).

guity). Somit werden Projektzugehörige einzeln und im Team auf die Bewältigung der Aufgaben vorbereitet und ein Bewusstsein für die besonderen Herausforderungen der neuen Aufgaben geschaffen.

## 6 Ausblick

Die Entwicklung von Verfahrens- und Anlagenkonzepten im Umfeld von Basischemikalien und Zwischenprodukten der industriellen organischen Chemie und deren Integration in neue Wertschöpfungsketten ist ein zeit- und kostenintensives Unterfangen. Die Entwicklungszyklen im Bereich der Verfahrens- und Anlagentechnik können zeitlich nicht mit den Trends im politischen, wirtschaftlichen, sozialen, technologischen, ökologischen und rechtlichen Umfeld („PESTEL“) in Einklang gebracht werden.

Chemie und Physik machen keine Ausnahme für politische Randbedingungen, wirtschaftlichen Druck und neue Unternehmenskonzepte. Die natur- und ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen können nicht vernachlässigt werden und müssen für neue Rahmenbedingungen angepasst und erarbeitet werden. Im bestehenden System der Petrochemie existiert umfangreiche Erfahrung und Wissen – es ist aber nicht sichergestellt, ob die Erfahrung auf Basis der bestehenden Technologien auf die neuen Wertschöpfungsketten übertragen werden kann. Die große Anzahl gescheiterter Projekte gibt darauf eine, wenn auch unbefriedigende Antwort.

Die technischen und wirtschaftlichen Risiken der Pilotierung von Prozessen können nur in begrenztem Umfang von einzelnen Unternehmen allein getragen werden. Zudem können global agierende Unternehmen die besonderen Standortfaktoren in Deutschland nur bedingt berücksichtigen. Für einen erfolgreichen Übergang sind neue Kooperationsmodelle zwischen Industrie – Politik/Verwaltung (Land/Bund/EU) – Forschungseinrichtungen/Hochschulen erforderlich. Die wichtigste Aufgabe der Politik/Verwaltung ist es dabei, die verschiedenen Akteure aus den unterschiedlichen Bereichen zu gemeinsamem Handeln zu motivieren, um Cluster zu schaffen, deren Bedeutung weit über die Forschung hinaus in die Umsetzung wirkt. Durch das gemeinsame Handeln sollen Kosten und Risiken für die einzelnen Akteure reduziert werden. Bei der Entwicklung der Kooperationsmodelle wird es darauf ankommen, wie eine agile Entscheidungsstruktur und eine neuartige Innovationskultur gebildet werden können.

## Danksagung

Die Autoren danken den Mitgliedern der Arbeitsgruppe „Holistic Chemical Engineering“ für die engagierte Unterstützung: Prof. Leon Urbas, TU Dresden; Prof. Franz Winter, TU Wien; Dr. Daniel Ohde, TUHH; Dr. Jens Friedland, Universität Ulm; Dr. Marion Börnhorst, TU Dortmund; Phillip

Biessey, Ruhr-Universität Bochum; Dr. Alexander Herberg, unabhängiger Berater; Dr. Olaf Wachsen, unabhängiger Berater.

Jörg Sauer dankt dem Helmholtz-Programm „Materialien und Technologien für die (MTET), Topic 5: „Material und Energieeffizienz“ für die finanzielle Unterstützung. Die Open access wurde ermöglicht und organisiert durch das Projekt DEAL.



**Jörg Sauer** ist seit 2012 ordentlicher Professor und Direktor des Instituts für Katalyseforschung und -technologie (IKFT) am Karlsruher Institut für Technologie. Sein Forschungsinteresse gilt der Entwicklung von Prozessketten, neuen Katalysatoren für die Herstellung synthetischer Flüssigkraftstoffe und Chemikalien auf Basis erneuerbarer Energieträger, der Prozesssimulation und techno-ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen sowie der Anwendung von Kraftstoffkomponenten in Verbrennungsmotoren.



**Olaf Wachsen** ist seit 2022 unabhängiger Berater und Senior Advisor für die erfolgreiche Realisierung von Projekten im chemischen Umfeld von der Idee bis zur Implementierung von Anlagen. Schwerpunkte liegen in der Projektdefinition und -durchführung von der Verfahrensentwicklung über die Vorbereitung und final Umsetzung von Investitionen gemäß den Anforderungen des Produktes. Dabei werden die Erfordernisse an das Projektteam und deren Umgebung mitberücksichtigt. In über 30 Jahren internationalen, industriellen, leitenden Tätigkeiten und vielen Verbandsaktivitäten wurden die notwendigen Kenntnisse und Erfahrungen aufgebaut.

## Abkürzungen

- CRL Community Readiness Level  
FEL Front-End-Loading  
PRL Process Readiness Level  
TRL Technical Readiness Level

## Literatur

- [1] VCI-Daten und Fakten, *Energiestatistik*, Verband der Chemischen Industrie. <https://www.vci.de/die-branche/zahlenberichte/vci-statistik-grafiken-energie-klima-rohstoffe-chemie.jsp>, 2024 (accessed on January 11, 2025)
- [2] *Petrochemicals are contained in 95 % of all manufactured goods*, Petrochemicals Europe. [https://www.petrochemistry.eu/wp-content/uploads/2023/08/Petrochemistry-FlowChart\\_V102023\\_HQ-withoutFolds-1.pdf](https://www.petrochemistry.eu/wp-content/uploads/2023/08/Petrochemistry-FlowChart_V102023_HQ-withoutFolds-1.pdf) (accessed on January 03, 2025)
- [3] G. R. Niquini, P. Münzer, M. Ebrahim-Moghaddam, L. Warmuth, K. Herrera Delgado, S. Pitter, N. Dahmen, J. Sauer, *Chem. Ing. Tech.* **2024**, 96 (1–2), 100–113. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.202300221>
- [4] Y. C. Ho, D. L. Pepyne, *J. Optim. Theory Appl.* **2002**, 115 (3), 549–570. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021251113462>
- [5] D. H. Wolpert, W. G. Macready, *IEEE Trans. Evol. Comput.* **1997**, 1 (1), 67–82. DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.585893>
- [6] R. Meys, A. Kätelhön, M. Bachmann, B. Winter, C. Zibunas, S. Suh, A. Bardow, *Science* **2021**, 374 (6563), 71–76. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abg9853>
- [7] Chemistry4Climate - Wie die Transformation der Chemie gelingen kann – Abschlussbericht, Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI), Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI). <https://www.vci.de/services/publikationen/chemistry4climate-abschlussbericht-2023.jsp>, 2023 (accessed on January 03, 2025)
- [8] Chemistry4Climate - Wie die Transformation der Chemie gelingen kann - Ein Update, Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI), Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI). <https://www.vci.de/services/publikationen/wie-die-transformation-der-chemie-gelingen-kann-ein-update.jsp>, 2024 (accessed on January 03, 2025)
- [9] J. C. Mankins, *Technology Readiness Levels, A White Paper* (1995, Edt. 2004); Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology, NASA. [http://www.artemisinnovation.com/images/TRL\\_White\\_Paper\\_2004-Edited.pdf](http://www.artemisinnovation.com/images/TRL_White_Paper_2004-Edited.pdf), 2004 (accessed on April 03, 2025)
- [10] G. A. Buchner, K. J. Stepputat, A. W. Zimmermann, R. Schomäcker, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2019**, 58 (17), 6957–6969. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05693>
- [11] *Front End Engineering Design of Oil and Gas Projects: Critical Factors for Project Success: Perspectives, Case Studies, and Lessons*, 1st ed. (Eds.: G. Unnikrishnan, V. Pratapkumar), CRC Press, Boca Raton, FL 2023.
- [12] J. Mausner, C. Dreiser, O. Wachsen, H. Freund, *J. Adv. Manuf. Process.* **2019**, 1 (3), e10024. DOI: <https://doi.org/10.1002/amp.10024>
- [13] M. Hungsberg, C. Dreiser, S. Brand, O. Wachsen, A. Drochner, B. J. M. Etzold, *Chem. Eng. Sci.* **2022**, 250, 117401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117401>
- [14] P. Bollini, et al., *ACS Eng. Au* **2023**, 3 (6), 364–390. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.3c00023>
- [15] Vertrauen und Kompetenzentfaltung: Das Return-on-Trust-Modell als Katalysator erfolgreicher Führungsarbeit (Eds.: B. Bolzern-Konrad, G. Dörfel), Springer, Berlin 2024.
- [16] A. Brodhagen, M. Grünwald, M. Kleiner, S. Lier, *Chem. Ing. Tech.* **2012**, 84 (5), 624–632. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201100220>
- [17] U. Tillmann, Vortrag „VCI zur Eröffnung der Achema“. <https://www.vci.de/themen/rohstoffe/vci-hauptgeschaefsfuehrer-utz-tillmann-auf-presskonferenz-eroeffnung-achema-2018-nachhaltigkeit-braucht-mehr-chemie-nicht-weniger.jsp>, 2018 (accessed on January 03, 2025)