

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 14



Ressourceneffizienz im Maschinen- und Anlagenbau - Potenziale der Miniaturisierung

August 2015

Kurzanalyse Nr. 14: Ressourceneffizienz im Maschinen- und Anlagenbau – Potenziale der Miniaturisierung

Autoren:

Dr. Dana Kralisch, Friedrich-Schiller-Universität Jena
Peter Weyell, Friedrich-Schiller-Universität Jena

Wir bedanken uns bei Dr.-Ing. Joachim Heck (Ehrfeld Mikrotechnik BTS GmbH), Dr. Carsten Damerau (HNP Mikrosysteme GmbH), Dr.-Ing. Reinhard Degen (Micromotion GmbH) Ulrich Krttschil (Fraunhofer ICT – IMM) und Dr. Patrick Löb (Fraunhofer ICT – IMM) für die fachliche Unterstützung bei der Entstehung dieser Kurzanalyse.

Diese Kurzanalyse ist im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Fachverband Electronics, Micro and Nano Technologies des VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.) und der VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH entstanden.

Fachliche Anprechpartner:

Manuel Weber, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH
Klaus Zimmer, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.

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

Satz und Gestaltung: Benjamin Röbig

Titelbild: © Ehrfeld Mikrotechnik BTS GmbH

Druck: Sprintout Digitaldruck GmbH, Grunewaldstraße 18, 10823 Berlin

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

Ressourceneffizienz im
Maschinen- und Anlagenbau -
Potenziale der Miniaturisierung

INHALTSVERZEICHNIS

1	HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG DER KURZANALYSE	5
1.1	Themenschwerpunkt Prozesstechnologie - speziell Mikroverfahrenstechnik	7
1.2	Themenschwerpunkt Miniaturisierung von Pumpen	11
2	BEWERTUNGSMETHODIK	14
2.1	Lebenswegbilanzierung mittels Ökobilanzierung	14
2.2	Umfassender Bewertungsansatz zur Ressourceneffizienz	17
2.3	Ansätze der Kostenrechnung	19
3	BEISPIELE AUS DER LITERATUR	21
3.1	Einsatz der Mikroverfahrenstechnik in der Produktion einer Feinchemikalie	21
3.2	Von Batch zu Mikro-Konti bei der Produktion von Farben	22
3.3	Epoxidierung von Sojaöl	23
3.4	Prozessintensivierung der Biodieselproduktion	26
3.5	Beispiele aus der Feinchemie und der Pharmaindustrie	27
4	BRANCHENSPEZIFISCHE FALLSTUDIE	30
4.1	Prozessbeschreibung und Bilanzraum	30
4.2	Bewertungsmethodik	34
4.3	Vergleich der diskontinuierlichen und kontinuierlichen Prozessführung anhand ausgewählter Wirkkategorien einer Ökobilanz	36
4.4	Der Einfluss von Mikropumpen auf die Umweltfreundlichkeit der Prozessführung	40
4.5	Auswirkungen auf die Ressourceneffizienz der Verfahren	43
4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Fallstudie	44

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	45
6 SCHLUSSBEMERKUNGEN	47
7 LITERATURVERZEICHNIS	48

1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG DER KURZANALYSE

Die Entwicklung und Verbreitung von Technologien zur effizienten Verwendung natürlicher Ressourcen ist ein wichtiges Anliegen der europäischen und nationalen Politik. So werden z. B. in der Mitteilung der Europäischen Kommission zu einer Leitinitiative für ein ressourcenschonendes Europa¹ oder im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung (ProgRes)² die Notwendigkeit einer effizienteren Ressourcennutzung betont, um eine Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch zu erreichen.

Aus Unternehmenssicht führt ressourceneffizientes Handeln zu einer direkten Senkung von Material- und Energiekosten und zu einer Verminderung der Rohstoffabhängigkeit. Ressourceneffizienzmaßnahmen tragen weiterhin zu Produkt- und Prozessinnovationen bei, sie sichern langfristige Erfolge und tragen damit zu einer Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens bei.³

Die Steigerung der Ressourceneffizienz impliziert branchenspezifisch jeweils unterschiedliche Strategien. Für die Branche Maschinen- und Anlagenbau ist der Trend zur Miniaturisierung eine vielversprechende Strategie, die Ressourceneffizienz in der Produktion zu erhöhen.

Die vorliegende Kurzanalyse untersucht dafür exemplarisch Potenziale, die einerseits durch die Mikroverfahrenstechnik und andererseits durch Miniaturisierung in der Pumpentechnik erschlossen werden können. Im Fall der Mikroverfahrenstechnik wird erwartet, dass durch eine effizientere Prozessführung, eine kompakte Bauweise, eine höhere Umsetzung des Ausgangsstoffes oder auch durch das Vordringen in neue Prozessbereiche⁴ eine verbesserte Effizienz der Nutzung natürlicher Ressourcen, eine Reduktion der Umweltauswirkungen und letztlich auch der Produktionskosten erreicht werden können. Mikropumpen können hierzu durch exaktes Dosieren und die Förderung kleiner Volumi-

¹ vgl. KOM 571 (2011)

² vgl. BMUB (2015)

³ vgl. VDI 4800 Blatt 1: 2014-07 (Entwurf) (2014)

⁴ vgl. Hessel et al. (2014a)

na einen entscheidenden Beitrag leisten. Die Erfahrungen der letzten Jahre werden anhand von Beispielen für die Mikroverfahrenstechnik aus der Literatur und einer detaillierten Fallstudie, die einen mikroverfahrenstechnischen Prozess und den Einsatz von Mikropumpen betrachtet, vorgestellt.

1.1 Themenschwerpunkt Prozesstechnologie - speziell Mikroverfahrenstechnik

Eine kontinuierliche Prozessführung in Mikroreaktoren lässt sich sehr gut mit dem Anspruch an eine verbesserte Ressourceneffizienz der Produktion kombinieren.^{5, 6} Als Argumente für eine effiziente Prozessführung werden vor allem

- die schnellere Vermischung der Reaktanden,
- der erhöhte Stoff- und Energietransport,
- die größere Bandbreite der realisierbaren Reaktionsbedingungen,
- ein vereinfachtes Reaktionsparameter-Screening zur Optimierung der Synthese

genannt.

Als ein erster Schwerpunkt der Kurzanalyse wurde daher das Thema „Prozesstechnologie“ und hierbei speziell die Mikroverfahrenstechnik (μ VT) ausgewählt.

Eine kontinuierliche Prozessführung wird in der chemischen Industrie seit langem genutzt. Kontinuierliche Rührkessel, Rührkesselskaskaden, Rohrreaktoren, Bläsensäulen etc. werden unter anderem bei Polymerisationen, Hydrierungen, Oxidationen oder katalytischem Cracken verwendet. In der Feinchemie kommen dagegen traditionell Batch-Reaktoren zum Einsatz. Auf diese Weise kann in einer Anlage leicht von der Produktion eines Produktes auf die eines anderen umgestellt werden. In den letzten Jahren hat jedoch auch hier der Trend eingesetzt, Synthesen, die bisher in Batch-Reaktoren durchgeführt wurden, in Reaktoren mit Reaktionsräumen, bevorzugt im Mikro-, Mini- oder Meso-Maßstab, zu überführen.⁷ Dem als Flow-Chemie bezeichneten Trend in der kontinuierlichen Prozessführung wird in der chemischen^{8, 9} und zunehmend auch in der

⁵ vgl. Ley (2012)

⁶ vgl. Newman, Jensen (2013); S. 1456 – 1472

⁷ vgl. Wegner et al. (2012); S. 17 – 57

⁸ vgl. de Mello (2002); S. 7N – 13N

⁹ vgl. Jenck et al. (2004); S. 544 – 556

pharmazeutischen^{10, 11, 12} Industrie eine bedeutende Rolle bei der Optimierung und Intensivierung bestehender Produktionsprozesse zugeschrieben.

Typische Reaktoren der Flow-Chemie sind tubuläre Reaktoren wie Kapillaren und insbesondere Mikroreaktoren verschiedener Bauart. Als Mikroreaktoren oder mikrostrukturierte verfahrenstechnische Apparate werden Reaktoren zur kontinuierlichen Prozessführung bezeichnet, deren innere Geometrien Abmessungen im Mikrometerbereich bis zu wenigen Millimetern aufweisen.¹³ Diese Reaktoren besitzen ein sehr hohes Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis bis zu 50.000 m²/m³. Im Gegensatz dazu weisen klassische Reaktoren wie Rührkessel typischerweise Werte von 100 bis maximal 1.000 m²/m³ auf.¹⁴

Die große spezifische Oberfläche von Mikroreaktoren ermöglicht eine hohe Wärmeaustauschleistung, ein sehr schnelles Erwärmen und Abkühlen von Reaktionsmischungen und die kontrollierte Durchführung stark exothermer Reaktionen. Lokale Überhitzungen werden vermieden oder stark vermindert. Dies kann zur Unterdrückung unerwünschter Neben- und Folgereaktionen genutzt werden. Daraus resultierende Verbesserungen in Ausbeute, Selektivität und Produktqualität wurden vielfach berichtet.^{15, 16, 17} Hinzu kommt der effiziente Stofftransport in den Reaktoren, der einerseits kurze Diffusions- und Mischzeiten der Reaktionskomponenten sowie andererseits einen schnellen Stoffübergang durch die Realisierbarkeit hoher spezifischer Phasengrenzflächen ermöglicht.¹⁸ Es werden heute vor allem Flüssig-Flüssig- sowie Gas-Flüssig-Reaktionen in mikroverfahrenstechnische Prozesse übertragen, während der Einsatz der Reaktoren bei Reaktionen mit Entstehung von Feststoffen als kritisch angesehen wird.¹⁹ Hier führt das hohe Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis zu starken Wech-

¹⁰ vgl. Colombo, Peretto (2008); S. 677 – 684

¹¹ vgl. Roberge et al. (2008); S. 905 – 910

¹² vgl. Jimenez-Gonzalez et al. (2011); S. 900 – 911

¹³ vgl. ISO 10991:2010-03 (2010)

¹⁴ vgl. Kiwi-Minsker, Renken (2005); S. 2 – 14

¹⁵ vgl. Wörz et al. (2001); S. 1029 – 1033

¹⁶ vgl. Jähnisch et al. (2004); S. 410 – 451

¹⁷ vgl. Ducry, Roberge (2005); S. 7972 – 7975

¹⁸ vgl. Jähnisch et al. (2004); S. 410 – 451

¹⁹ vgl. Roberge et al. (2005); S. 318 – 323

selwirkungen der Feststoffe mit den Reaktorinnenwänden, die ein auch als "Fouling" bezeichnetes Zusetzen der Mikrokanäle verursachen können.

Am Markt sind inzwischen eine Vielzahl von Mikroreaktoren und Bauarten verfügbar. Die Wahl eines geeigneten Mikroreaktors hängt im starken Maße von der jeweiligen Anwendung ab. Beispielsweise kann das Mischprinzip auf einem laminaren Fluss nebeneinanderliegender Lamellen, einem segmentierten Fluss, einer Reihe von geteilten und wieder zusammengeführten Strömen oder auf chaotischen Wirbeln beruhen. Eine Auswahl an Mischprinzipien von Mikroreaktoren ist in Abbildung 1 zusammengefasst.

Typische Mischprinzipien von Mikroreaktoren
Injektion in einen Hauptstrom
Injektion von Teilströmen
Periodische Injektion
Aufsplitten und Rekombinieren
Kontaktieren
Erzwungener Stofftransport
Verkleinerung des Diffusionspfades
Kollision bei hoher Energie

Abbildung 1: Typische Mischprinzipien von Mikroreaktoren²⁰

Auch europäische Verbundprojekte wie F3 Factory²¹, CoPIRIDE²², SYNFLOW²³ oder POLYCAT²⁴ haben den Trend zur Miniaturisierung längst aufgegriffen und nutzen miniaturisierte Bauteile zur Prozessintensivierung.

Verstärkt geht dies auch mit einer Miniaturisierung der Produktionsanlage selbst einher. Eine solche miniaturisierte Produktionsanlage wurde im Rahmen der Projekte CoPIRIDE und POLYCAT entwickelt. Die Anlage in Containerbauweise kann nicht nur kontinuierliche mikroverfahrenstech-

²⁰ gemäß Hessel et al. (2005); S. 2479 – 2501

²¹ www.f3factory.com

²² www.copiride.eu

²³ www.synflow.eu

²⁴ www.polycat-fp7.eu

nische Syntheseeinheiten, sondern auch alle erforderlichen Module zur Aufarbeitung, Prozesssteuerung, Lagerung und die notwendigen Sicherheitssysteme enthalten.

Eine ähnliche Anlage wurde auch im Rahmen des F3-Factory-Projektes errichtet. Die kontinuierlich betriebene Einheit enthält sowohl mikroverfahrenstechnische Komponenten als auch Mikropumpen und wird zur Herstellung von Zwischenprodukten für die Gewinnung pharmazeutischer Wirkstoffe eingesetzt.

Ein innerhalb dieses Projekts entwickelter mikrostrukturierter Reaktor wird zudem zur Handhabung von dispers verteilten, heterogenen Katalysatoren eingesetzt, ebenso wie ein Mikromischer, der zur Herstellung von Feststoffen in einem mikroverfahrenstechnischen Prozess geeignet ist. Dieser Ventilmischer wurde im Kontext der Gewinnung von Kohlenstoffnanoröhren weiterentwickelt und nun für Durchflussraten von bis zu 300 l/h geeignet.²⁵

Derartige Beispiele zeigen, dass heute auch für Anwendungen unter Bildung bzw. Handhabung von Feststoffen geeignete, an die Aufgabe angepasste Mikroreaktoren verfügbar sind.

Das Projekt CoPIRIDE befasste sich neben der Anlagenminiaturisierung und Prozessintensivierung etablierter chemischer Produktionsverfahren der Mikroreaktionstechnik auch mit einer effizienteren Herstellung der mikrostrukturierten Bauteile selbst. Mit Hilfe von Walzprägen zur Mikrostrukturierung und Laserschweißen sowie Vakuumlöten zur Verbindung von Bauteilen wurde eine Herstellungsmethode für mikrostrukturierte Bauteile entwickelt, die nun für die kosteneffiziente Produktion größerer Stückzahlen zur Verfügung steht.

Diese Beispiele zeigen, dass sich die Mikroverfahrenstechnik zunehmend etabliert und eine immer größere Rolle in der chemischen Industrie spielen wird.

²⁵ vgl. Peschke et al. (2014)

Eine Darstellung des Projektteams von SYNFLOW fasst die Vorteile der Mikroverfahrenstechnik noch einmal zusammen (Abbildung 2). Genannt werden hier die kontinuierliche flexible Prozessführung, geringere Abfälle und Emissionen, bessere Raum-Zeit-Ausbeuten und stärkere Automatisierung. In Kombination mit einer effizienten Produktionsumgebung, wie sie die heutige Containerbauweise ermöglicht, kann künftig ein signifikanter Beitrag zu ressourceneffizienteren chemischen Produktionsprozessen erwartet werden.

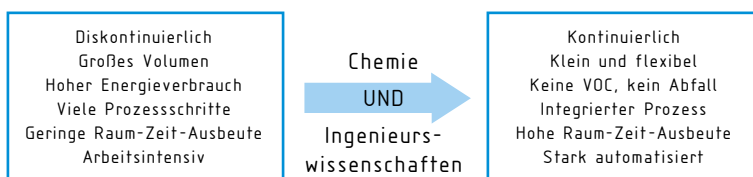


Abbildung 2: Gegenüberstellung von diskontinuierlicher und kontinuierlicher Prozessführung in Anlehnung an eine Darstellung des SYNFLOW-Projektes²⁶

1.2 Themenschwerpunkt Miniaturisierung von Pumpen

Sei es in der Chemie-, Medizin- oder Pharmatechnik, in vielen Bereichen führt die Forschungs- und Entwicklungsarbeit auch zu einem Bedarf an einer miniaturisierten Pumpentechnik. Lab-on-a-Chip-Anwendungen und μ -Total-Analysis-Systeme ermöglichen Analysen in immer kleineren Maßstäben. Miniaturisierte Pumpen steuern dabei die Zufuhr der geringen Proben- und Reagenzienmengen. In der Mikroelektronik werden wiederum miniaturisierte Kühlsysteme zur Wärmeabfuhr der immer leistungsfähigeren Prozessoren entwickelt. Mikropumpen regulieren hierbei den Zufluss des Kühlwassers. In der chemischen Produktion werden Mikropumpen häufig in Kombination mit Mikrostruktureaktoren für eine kontinuierliche Synthese eingesetzt. Ein weiteres Anwendungsgebiet von Mikropumpen eröffnete sich hier auch im Bereich des präzisen Dosierens viskoser Flüssigkeiten. Daneben werden im me-

²⁶ vgl. SYNFLOW (unbek.)

dizinisch-pharmazeutischen Bereich Dosiersysteme zur präzisen Freisetzung kleinster Volumina an Wirkstoffen zur Behandlung von z. B. Diabetespatienten oder für die Chemotherapie entwickelt.^{27, 28, 29, 30}

Die ausgewählten Beispiele zeigen unabhängig vom Anwendungsgebiet die Notwendigkeit, kleine bis kleinste Volumina (Milliliter, Mikroliter und Nanoliter pro Minute) präzise steuern und kontrollieren zu müssen. Hierfür gibt es eine Vielzahl entwickelter Mikropumpen, wobei die ersten Mikropumpensysteme seit den 1980er Jahren bekannt sind.^{31, 32}

Es wird im Allgemeinen bei Mikropumpen zwischen Strömungs- und Verdrängerpumpen unterschieden, bevor eine weitere Unterteilung nach der Art des Antriebs erfolgt (Abbildung 3).³³

Mikropumpen	
Verdrängerpumpen	Hydrodynamische Pumpen
Oszillierende Verdrängerpumpen • Diaphragmapumpen • Kolbenpumpen	• Elektrohydrodynamische Pumpen • Kreiselumpen • Elektroosmotische Pumpen • Magneto hydrodynamische Pumpen • Stoßheberpumpen • Strahlpumpen
Rotatorische Verdrängerpumpen • Zahnradpumpen (u. a. Zahnringpumpen)	
Aperiodische Verdrängerpumpen	

Abbildung 3: Übersicht Mikropumpen³⁴

Mikro-Diaphragma-Pumpen als typische Vertreter der Verdrängerpumpen bestehen in ihrem Aufbau aus einer Pumpkammer mit einem Diaphragma, bei der der Flüssigkeitsstrom über ein Einlass- und Auslassventil geregelt wird. Durch unterschiedliche Antriebsmöglichkeiten (piezoelektrisch, thermopneumatisch oder elektrostatisch u. a.) kommt

²⁷ vgl. Abhari et al. (2012); S. 9765 – 9780

²⁸ vgl. Amirouche et al. (2009); S. 647 – 666

²⁹ vgl. Iverson, Garimella (2008); S. 145 – 174

³⁰ vgl. Singhal, Garimella (2004); S. 191 – 221

³¹ vgl. Yokota (2014); S. DSM0014

³² vgl. Laser, Santiago (2004); S. R35

³³ vgl. Laser, Santiago (2004); S. R35

³⁴ in Anlehnung an Laser, Santiago (2004); S. R35

es zu einer Expansion oder Kontraktion des Diaphragmas, wodurch sich das Volumen der Pumpkammer alternierend erhöht und reduziert.

Neben den Diaphragma-Pumpen, die vor allem bei kleinen Volumenströmen von Mikrolitern bis wenige Milliliter pro Minute eingesetzt werden, stellen Mikrozahnringpumpen eine typische Gruppe der Verdrängerpumpen dar. Der Verdränger besteht hier aus zwei Bauteilen, einem Innenrotor und einem Außenrotor, die sich um ihre exzentrisch versetzten Rotationsachsen drehen. Sie können zur Förderung von Mikrolitern bis zu mehreren hundert Millilitern pro Minute eingesetzt werden und erlauben auch die Förderung hochviskoser, korrosiver oder aggressiver Flüssigkeiten.

Der Antrieb bei Strömungspumpen erfolgt dagegen nicht immer mechanisch. Die Wechselwirkung der Flüssigkeit mit einem angelegten elektromagnetischen Feld ist dabei eine mögliche Antriebsart zur Erzeugung eines Volumenstroms. Elektrohydrodynamisch, magnetohydrodynamisch oder auch elektroosmotisch betriebene Mikropumpen seien hierfür beispielhaft genannt.

Charakteristische Kenngrößen einer Pumpe sind z. B. die Leistungsaufnahme, die Pumpfrequenz oder der Volumenstrom, die zu einer Beurteilung führen, ob eine spezifische Pumpe für das entsprechende Anwendungsfeld geeignet ist. Bei einer Beurteilung ihres möglichen Beitrages zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in der Prozessindustrie ist der direkte Energiebedarf der Pumpe von geringerer Relevanz. Als viel entscheidender erweist sich der Einfluss von Mikropumpen auf eine mögliche Effizienzsteigerung des Gesamtsystems, in dem diese zum Einsatz kommt.

2 BEWERTUNGSMETHODIK

Nachfolgend werden ausgewählte Methoden vorgestellt, die eine Bewertung von Material- und Energieeinsparungen und die Quantifizierung der daraus resultierenden Beiträge zum Umweltschutz (vgl. Kapitel 2.1), zu einer Verbesserung der Ressourceneffizienz (vgl. Kapitel 2.2) sowie deren Auswirkungen auf die Kosten (vgl. Kapitel 2.3) ermöglichen.

Zum Monitoring von Material- oder Energieeinsparungen im Unternehmen können im einfachsten Fall eine Auswertung und ein jährlicher Vergleich auf der Basis von Massenbilanzen (eingesetzte Rohstoffe, Hilfsstoffe, Lösungsmittel, Verpackungen etc. und des Energiebedarfes) erfolgen. Diese werden auf einen bestimmten Nutzen wie beispielsweise eine definierte Produktmenge bezogen. Hierbei werden jedoch die resultierenden potenziellen Umweltauswirkungen nicht mit erfasst. Auch vorgelagerte Explorations-, Produktions- und Verarbeitungsschritte sowie nachgelagerte Anwendungs-, Recycling- oder Entsorgungsschritte bleiben unberücksichtigt. Daher kommen zunehmend lebenswegbasierte Methoden zum Einsatz, die Stoff- und Energieflüsse mit den daraus resultierenden Umweltwirkungen oder Ressourceneinsparungen verknüpfen.

2.1 Lebenswegbilanzierung mittels Ökobilanzierung

Um Stoff- und Energieflüsse entlang einer Prozesskette ganzheitlich zu quantifizieren und potenziellen Umweltwirkungen zuordnen zu können, kann die Methode der Ökobilanzierung (englischsprachig: Life Cycle Assessment (LCA))^{35, 36} herangezogen werden. Nach dieser Methode wird der gesamte Lebensweg eines Produktes, Prozesses oder einer Dienstleistung in die Bewertung eingeschlossen: von der Rohstoffgewinnung über Transporte, die Verarbeitung von Vorstufen, die Herstellung des Produktes oder die Bereitstellung der Dienstleistung, deren Anwendung bis zu Recycling- und Beseitigungsprozessen. Dieser Bewertungsansatz wird auch „Cradle to Grave“ genannt.

³⁵ vgl. ISO 14040:2006-10 (2006)

³⁶ vgl. ISO 14044:2006-10 (2006)

Alternativ wird häufig eine „Cradle-to-Gate“-Analyse durchgeführt, bei der lediglich alle Stoff- und Energieflüsse aus der und in die Umwelt betrachtet werden, die bis zum fertigen Produkt verursacht werden. Dies ist dann sinnvoll, wenn mehrere Alternativen zur Herstellung desselben Produktes mit gleichem weiterem Lebensweg verglichen werden. Diese Stoff- und Energieflüsse aus der Umwelt und zurück in die Umwelt werden im Rahmen einer Wirkungsabschätzung in Umweltwirkkategorien wie Treibhauseffekt, Ozonabbau, Versauerung etc. umgerechnet. Hierbei können verschiedene Bewertungsmethoden zum Einsatz kommen.

Bei der Auswahl, an welcher Stelle entlang dem Wirkungspfad der funktionale Zusammenhang zur mathematischen Beschreibung der Wirkkategorie ansetzt, wird jedoch zwischen zwei grundsätzlichen Konzepten unterschieden:

- Midpoint-Analyse: Das Umweltbelastungspotenzial wird in verschiedene Wirkkategorien unterteilt. Die Bewertung beruht auf der quantitativen Beschreibung von Ursache-Wirkungs-Mechanismen einer potenziellen Veränderung eines Umweltzustandes. Diese werden auf Äquivalente einer Referenzsubstanz wie beispielsweise Kohlendioxid bezogen, um eine Vergleichbarkeit innerhalb der einzelnen Wirkkategorien zu erzielen. Zu den etablierten Midpoint-Bewertungsmethoden zählen unter anderem CML 2002³⁷, TRACI³⁸, Impact2002+³⁹ sowie EDIP2003⁴⁰.
- Endpoint-Analyse: Mit Hilfe von Indikatoren werden kausale Zusammenhänge zu tatsächlich verursachten Schäden bei Mensch und Ökosystemen sowie dem Verbrauch abiotischer Ressourcen hergestellt. Die bekannteste Methode ist der Eco-Indicator 99⁴¹.

Eine Harmonisierung beider Konzepte zur Wirkungsabschätzung ist in der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe⁴² realisiert worden. In dieser Methode werden so-

³⁷ vgl. Guinée et al. (2002)

³⁸ vgl. Bare (2002); S. 49 - 78

³⁹ vgl. Jolliet et al. (2003); S. 324 - 330

⁴⁰ vgl. Potting et al. (2004)

⁴¹ vgl. Goedkoop, Spriensma (2001)

⁴² vgl. Goedkoop, Spriensma (2009)

wohl Midpoint-Indikatoren als auch Endpoint-Indikatoren berücksichtigt. Die Midpoint-Indikatoren beruhen hierbei unter anderem auf dem Bewertungssystem CML 2002⁴³, während die Endpoint-Indikatoren auf i) Schädigung der menschlichen Gesundheit, ii) Schädigung der Ökosystem-Vielfalt sowie iii) Schädigung der Ressourcenverfügbarkeit auf der Methode des Eco-Indicator 99⁴⁴ basieren.

Anhand der gewählten Wirkkategorien können die ökologischen Belastungspotenziale der einzelnen Produktlebensphasen kalkuliert, aggregiert und interpretiert werden. Sie werden üblicherweise auf eine funktionelle Einheit (FE), z. B. ein Kilogramm eines Produktes, bezogen, um einen Vergleich zwischen alternativen Verfahren oder Produkten zu ermöglichen. Ökobilanzen dienen insbesondere dem Vergleich von Alternativen, bieten aber auch Unterstützung bei der Schwachstellenanalyse in bestehenden Systemen, aus der wiederum Handlungsempfehlungen für Weiterentwicklungen abgeleitet werden können.

Nähere Erläuterungen zur Methodik und deren Einsatz zur Bewertung ökologischer Auswirkungen in der Prozessindustrie lassen sich beispielsweise in den Arbeiten von Klöpffer und Grahl⁴⁵ und Jaquemin et al.⁴⁶ finden.

Die Methode der Ökobilanzierung wurde zunächst zur vergleichenden Bewertung von Verpackungsmaterialien, Rohstoffen usw. entwickelt und wird heute in verschiedensten Fachgebieten und Anwendungsbereichen eingesetzt. Bekannte Anwendungen sind zum Beispiel der Einsatz im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung, Umweltproduktdeklaration oder Technikfolgenabschätzung. Aus den verschiedenen Fragestellungen, denen mit Hilfe der Methode der Ökobilanzierung in den letzten Jahren nachgegangen wurde, ergaben sich Methodenentwicklungen für spezifische Einsatzbereiche sowie räumliche und zeitliche Systemgrenzen.⁴⁷

⁴³ vgl. Guinée et al. (2002)

⁴⁴ vgl. Goedkoop, Spriensma (2001)

⁴⁵ vgl. Klöpffer, Grahl (2009)

⁴⁶ vgl. Jaquemin et al. (2012); S. 1028 - 1041

⁴⁷ vgl. Guinée et al. (2011); S. 90 - 96

Auch zur Bewertung alternativer Prozesstechniken wurden in den letzten Jahren wiederholt Ökobilanzen durchgeführt. Hierbei wurde ebenso der Frage nachgegangen, ob eine diskontinuierliche oder kontinuierliche mikroverfahrenstechnische Prozessführung aus ökologischer Sicht vorteilhafter ist. Ausgewählte Beispiele hierzu sind in Kapitel 3 zusammengefasst. Vergleichende ökobilanzielle Bewertungen von Makro- versus Mikropumpen gibt es jedoch bisher in der Literatur nicht.

2.2 Umfassender Bewertungsansatz zur Ressourceneffizienz

Auch die VDI Richtlinie 4800 Blatt 1⁴⁸ zur Bestimmung der Ressourceneffizienz setzt auf eine Systemperspektive und empfiehlt die Bewertung entlang dem Lebensweg eines Produktes oder einer Dienstleistung (Abbildung 4).

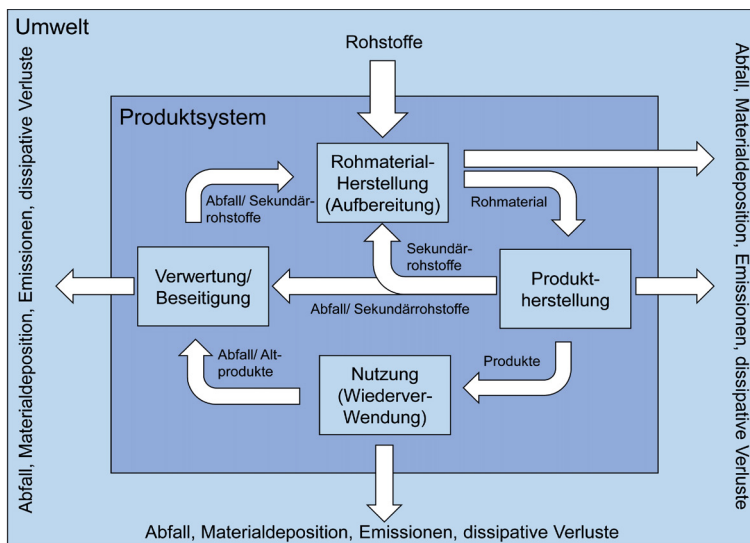


Abbildung 4: Umfassende Betrachtungsweise von Produktionssystemen⁴⁹

⁴⁸ vgl. VDI 4800 Blatt 1:2014-07 (Entwurf) (2014)

⁴⁹ VDI 4800 Blatt 1:2014-07 (Entwurf) (2014), mit Erlaubnis des Vereins Deutscher Ingenieure e. V.

Die Ressourceneffizienz ist hier definiert als das Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zu dem dafür notwendigen natürlichen Ressourceneinsatz.⁵⁰

$$\text{Ressourceneffizienz} = \frac{\text{Nutzen} \\ \text{(Produkt, Funktion, funktionale Einheit)}}{\text{Aufwand} \\ \text{(Einsatz natürlicher Ressourcen)}}$$

Als natürliche Ressourcen werden hierbei neben Rohstoffen in der Lagerstätte auch Energie, Luft, Wasser, Fläche bzw. Boden, Biodiversität und Ökosystemleistung angesehen (Abbildung 5).

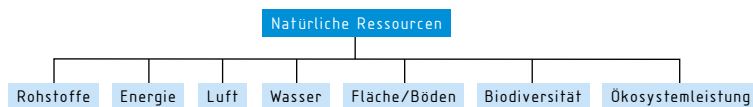


Abbildung 5: Aufgliederung „natürlicher Ressourcen“⁵¹

Da dieser umfassende Betrachtungsansatz neu erarbeitet wurde, gibt es in der Literatur bisher noch keine Beispiele zur Bestimmung der Ressourceneffizienz nach dieser Definition für die hier diskutierten Bereiche der Prozessindustrie. Die betrachtete Fallstudie (Kapitel 4) greift jedoch das grundlegende Konzept auf und demonstriert den Vergleich der Ressourceneffizienz von zwei Prozessalternativen anhand der Kriterien:

- a. energetische Ressourceneffizienz untergliedert in erneuerbare und nicht erneuerbare energetische Ressourcen,
- b. stoffliche Ressourceneffizienz anhand des Abbaus fossiler Rohstoffe und Erze,
- c. Ökosystemleistung (am Beispiel von Treibhausgasemissionen).

⁵⁰ vgl. VDI 4800 Blatt 1: 2014-07 (Entwurf) (2014)

⁵¹ gemäß VDI 4800 Blatt 1: 2014-04 (Entwurf) (2014)

2.3 Ansätze der Kostenrechnung

Neue Technologien werden sich meist nur dann etablieren können, wenn sie auch zu kosteneffizienten Produktionsprozessen führen. Häufig werden daher zusätzlich zur Abschätzung von Umweltentlastungs- und Ressourceneffizienzpotenzialen neuer Technologien auch mögliche Kostensenkungen bei der Produktion kalkuliert.

Die klassische betriebliche Kostenrechnung erfasst im Unternehmen anfallende Kosten und ermöglicht eine Zuordnung dieser zu Bezugsgrößen (z. B. Produkte bzw. Abteilungen) sowie deren Auswertung. Integrierte Lebenszykluskonzepte berücksichtigen diese in vor- und nachgelagerten Phasen. Lebenszykluskostenanalysen bieten somit eine geeignete methodische Grundlage, die kostenseitige Bewertung alternativer Verfahren, Technologien oder Optionen während der Prozessentwicklung mit lebenswegbasierten ökologischen Entscheidungskriterien zu koppeln.⁵² Zu ihrer Berechnung wurden Standards und Normen wie beispielsweise die DIN EN 60300-3-3, die VDI-Richtlinie 2284 und das VDMA Einheitsblatt 34160 erarbeitet.^{53, 54, 55}

Lebenszykluskosten sind definiert als die Summe der Kosten, die während der Entstehung, Nutzung und Entsorgung, d. h. während des gesamten Lebenszyklus eines Produktes (oder auch einer Dienstleistung) entstehen. Aussagen über zukünftig zu erwartende Kosten können ebenfalls getroffen werden. Sinnvoll ist der Einsatz bereits während der Produkt- und Prozessentwicklung, da hier bis zu 70 % der zukünftigen Kosten fixiert werden.⁵⁶ Sie sind somit in späteren Phasen nur noch schwer beeinflussbar. Auch in Hinblick auf Investitionsentscheidungen sind Lebenszykluskosten von besonderem Interesse, da bei der Entscheidung über ein Investitionsobjekt neben den Anschaffungskosten auch die zu erwartenden Betriebs-, Instandhaltungs- und Entsorgungskosten berücksichtigt werden.

⁵² vgl. Sell et al. (2013); S. 447 – 454

⁵³ vgl. DIN 60300-3-3:2014-09 (2004)

⁵⁴ vgl. VDI 2884:2005-12 (2005)

⁵⁵ vgl. VDMA 34160:2006 (2006)

⁵⁶ vgl. Wübbenhorst (1987); S. 87 – 97

Ein Beispiel für einen Vergleich der Lebenszykluskosten eines chemischen Produktionsverfahrens im Batch- oder mikroverfahrenstechnischen Betrieb zu einem Zeitpunkt t innerhalb der Nutzungsdauer ist in Abbildung 6 dargestellt.

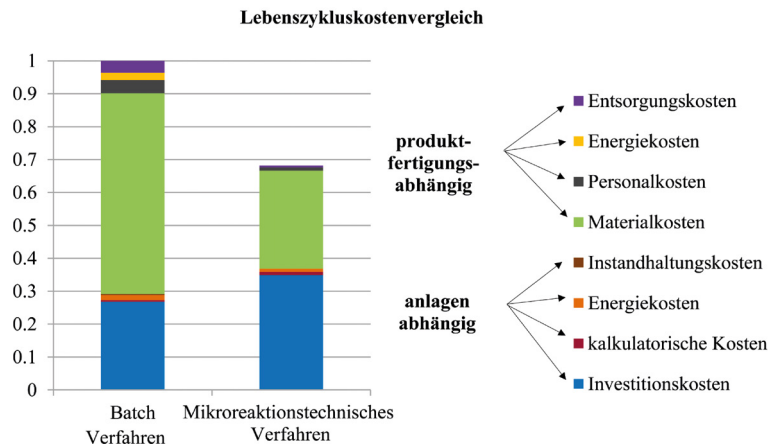


Abbildung 6: Beispiel für einen Vergleich der Lebenszykluskosten eines chemischen Produktionsverfahrens im Batch- oder mikroverfahrenstechnischen Betrieb während der Nutzungsphase⁵⁷

Im Falle mikroverfahrenstechnischer Prozesse können die anlagenabhängigen Kosten aufgrund von Investitionskosten in Reaktoren, geeignete Pumpen, die Prozesssteuerung etc. dominieren. Die Produktfertigungskosten fallen jedoch im Vergleich zum Batch-Betrieb häufig aufgrund höherer erzielter Ausbeuten und Selektivitäten signifikant geringer aus. An diesem Beispiel wird deutlich, dass eine alleinige Betrachtung der Investitionskosten, die im Falle der Mikroverfahrenstechnik recht häufig als Argument herangezogen werden, zu unbalancierten Entscheidungen führen kann. Die simultane Betrachtung der Investitions- und Nutzungskosten stellt dagegen eine wertvolle Entscheidungshilfe dar und zeigt das künftige Potenzial neuer Technologien.

⁵⁷ nach Sell et al. (2013); S. 447–454

3 BEISPIELE AUS DER LITERATUR

In der Literatur ist eine Vielzahl von Studien zur Prozessintensivierung chemischer Syntheseverfahren durch mikroverfahrenstechnische Prozesse zu finden. In einigen Fällen erfolgte in Studien eine begleitende und vergleichende Ökobilanz und/oder Kostenanalyse. Ausgewählte Beispiele werden nachfolgend kurz vorgestellt, um einen Überblick über die erzielten Erkenntnisse hinsichtlich der Effekte auf die Umweltauswirkungen der Verfahren zu geben. Hierbei ist zu beachten, dass die vorgestellten Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten meist mit Änderungen der Prozessparameter, Ausgangsstoffe und/oder Syntheseführung einhergehen. Es wird somit in allen vorgestellten Studien nicht der Effekt der miniaturisierten Bauteile allein, sondern in Kombination mit dadurch möglichen weiteren Prozessvariationen bewertet.

3.1 Einsatz der Mikroverfahrenstechnik in der Produktion einer Feinchemikalie

Der erste veröffentlichte ökobilanzielle Vergleich der Verfahrenstechniken Batch und kontinuierliche Reaktionsführung im Mikroreaktor wurde am Beispiel der Synthese von m-Anisaldehyd vorgenommen.⁵⁸ Die Substanz ist ein Zwischenprodukt bei der Synthese von Arzneistoffen, Duftstoffen und verschiedener anderer Chemikalien. Die zweistufige Synthese, ausgehend von m-Bromanisol unter Einsatz von n-Butyllithium, kann aufgrund ihrer starken Wärmetönung und der leichten Zersetzbarkeit der intermediären Aryl-Lithium-Verbindung im klassischen Rührkessel nur unter erheblichem Sicherheitsaufwand und mit einem hohen Bedarf an Kühlenergie zur Realisierung einer Reaktionstemperatur von -80 °C durchgeführt werden. Der Einsatz von Mikrostrukturreaktoren ermöglicht dagegen eine kontinuierliche Reaktionsführung bei einer Reaktionstemperatur von 0 °C .

⁵⁸ vgl. Kralisch, Kreisel (2007); S. 1094 – 1100

Das von Seiten der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Forschungsvorhaben „Umweltfreundliche Produktion mit Mikroreaktionstechnik“ umfasste hierbei sowohl die Entwicklung des Verfahrens als auch die Konstruktion und den Bau einer Apparatur, die es erlaubte, chemische Reaktionen unter Einsatz von kontinuierlich arbeitenden Mikroreaktoren erstmals auch in Produktionsmengen sicher durchführen zu können. Die CPC Systems GmbH entwickelte eine skalierbare Produktionsanlage, die aufgrund ihres Numbering-up-Konzeptes die Möglichkeit bot, Reaktionen mit aggressiven, umweltgefährdenden chemischen Substanzen durchführen zu können. Das Numbering-up-Konzept beruhte hierbei auf der Optimierung eines einzelnen Bauteils und der nachfolgenden Vervielfältigung, direkt angepasst an den Bedarf.

Bei einem ökobilanziellen Vergleich dieser Syntheseführungen im Produktionsmaßstab wurden eine Tieftemperatursynthese im 400-L-Batch-Reaktor und eine Synthese in dem von der CPC Systems GmbH entwickelten Cytos Pilot System mit mikroreaktionstechnischen Komponenten als alternative Prozessführung gegenübergestellt. Insbesondere durch die Vermeidung eines kryogenen Systems, das den Einsatz großer Mengen Flüssigstickstoff als sekundären Kälteträger erforderte, ergaben sich eindeutige ökologische Vorteile (nähere Informationen siehe Fallbeispiel Kapitel 4).

3.2 Von Batch zu Mikro-Konti bei der Produktion von Farben

Die Umstellung eines Batch-Prozesses auf ein kontinuierliches Herstellungsverfahren wurde auch am Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik der Technischen Universität Braunschweig gemeinsam mit der Pelikan Produktionsgesellschaft GmbH, hier am Beispiel einer Produktion von Farben, untersucht. Nach einem eingehenden Test verschiedener Mischprinzipien im Rahmen des ebenfalls von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Verbundprojektes wurde ein statischer Mikro-

mischer gewählt, der einen hohen Energieeintrag am Mischungspunkt und somit eine verbesserte Produktqualität gegenüber der batchweisen Herstellung bewirkte. Mit Hilfe eines Mikrowärmeübertragers wurde zudem eine Senkung des Energiebedarfs um 85 % im Vergleich zum Batch-Prozess ohne Wärmeintegration erzielt.⁵⁹ Für die Fertigung mehrerer ähnlicher Farben hatte die kontinuierliche mikroverfahrenstechnische Anlage aufgrund ihres geringen Anlageninhaltes von etwa einem Liter weitere Vorteile. Der beim Produktwechsel entstehende Farbverschnitt konnte der nachfolgenden Tinte zugemischt werden, ohne die Produktqualität zu beeinträchtigen. Auf diese Weise wurde der Spül- und Abwasseranfall um 95 % gegenüber dem konventionellen Batch-Verfahren gesenkt.⁶⁰

Dieses Beispiel zeigt, dass die Mikroverfahrenstechnik einen deutlichen Beitrag zur Prozessoptimierung und zur Senkung des Energie- und Materialbedarfes, in diesem Falle Wasser, für die Produktion leisten kann.

3.3 Epoxidierung von Sojaöl

Ein weiteres Beispiel aus der chemischen Produktion stellt die Übertragung der Epoxidierung von Sojaöl vom Fed-Batch-Prozess zu einer kontinuierlichen mikroverfahrenstechnischen Prozessführung bei erhöhten Temperaturen dar. Epoxidiertes Sojaöl wird vor allem als Weichmacher in Produkten aus Polyvinylchlorid verwendet und ersetzt so Phthalate.⁶¹ Im Rahmen des europäischen Verbundprojektes CoPIRIDE sollte ein bestehendes Produktionsverfahren für epoxidiertes Sojaöl des italienischen Produzenten Mythen S.p.A. optimiert werden. Die Jahresproduktion an epoxidiertem Sojaöl am Standort belief sich auf 15.000 t. Das Unternehmen versprach sich von dem Transfer des bestehenden Fed-Batch-Prozesses eine Reduktion der Produktionskosten, kürzere Reaktionszeiten sowie verbesserte Produktausbeuten mit konstanterer Produktqualität.

⁵⁹ vgl. Grundemann et al. (2009); S. 1748 – 1756

⁶⁰ vgl. Grundemann et al. (2012); S. 92 – 101

⁶¹ vgl. Fenollar et al. (2009); S. 2674 – 2684

Zur Entscheidungsunterstützung während der Prozessentwicklung wurden eine Reihe alternativer Prozessbedingungen ökobilanziell miteinander verglichen (Abbildung 7).⁶² Dargestellt wird, wie verschiedene Prozessvariationen (wie die Wahl eines anderen Rohstoffes oder die Übertragung in einen mikroverfahrenstechnischen Prozess) die Umweltauswirkungen der Produktion (hier die Emission humantoxischer und klimaschädlicher Substanzen in die Umwelt) beeinflussen können. Es zeigte sich, dass, ausgehend vom Fed-Batch-Referenzprozess A, die Mehrzahl der betrachteten Alternativszenarien zu höheren Umweltauswirkungen führen würden. Insbesondere Verluste in der Ausbeute (durch kürzere Verweilzeiten im Mikroreaktor), aber auch ein höherer Bedarf an den Edukten Wasserstoffperoxid und Ameisensäure bei gleichbleibender Ausbeute (90 % im Falle des Fed-Batch-Prozesses) infolge einer beschleunigten Zersetzung bei harschen Prozessbedingungen (auch als „neue Prozessfenster“ oder Englisch als Novel Process Windows⁶³ (NPW) Bedingungen bezeichnet) wirkten sich hier nachteilig aus.

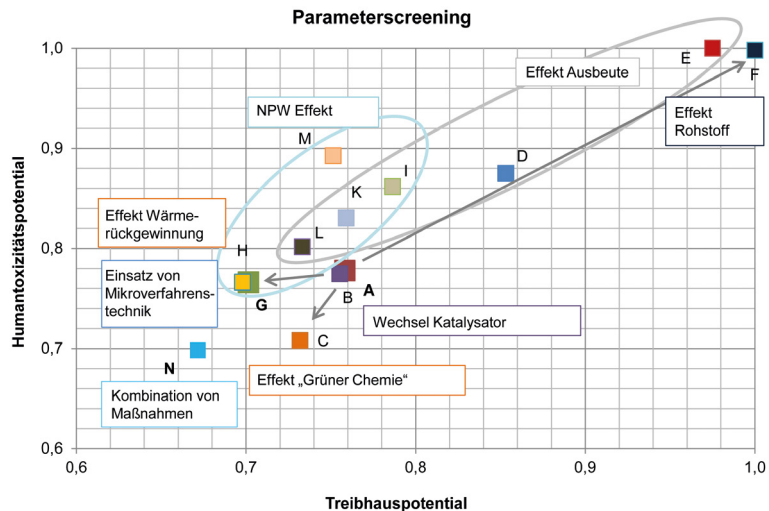


Abbildung 7: Screening von Syntheseparametern für die Epoxidierung von Sojaöl anhand der Wirkkategorien GWP und HTP⁶⁴

⁶² vgl. Kralisch et al. (2012); S. 300 – 311

⁶³ vgl. Hessel (2009); S. 1655 – 1681

⁶⁴ angepasst nach: Kralisch et al. (2012); S. 300 – 311

Im besten Fall konnten moderate ökologische Vorteile von 5 - 16 % je nach betrachteter Umweltwirkungskategorie erwartet werden. Dies ergab ein ökobilanzieller Vergleich des Best Case Szenarios N im simulierten Pilot-Maßstab (Produktionskapazität: 2.500 t/a) und des bestehenden Produktionsprozesses des Unternehmens Mythen S.p.A.

Die Ergebnisse der Ökobilanzierung zeigten somit bereits in einer frühen Phase des Prozessdesigns, dass eine mikroreaktionstechnische Anlage zwar potenziell dem etablierten industriellen Prozess überlegen sein kann, hierzu jedoch noch weitere Entwicklungsarbeiten und eine Reduktion des Eduktbedarfes erforderlich sind.⁶⁵ Vor allem die beschleunigte Zersetzung des Reagenzes Wasserstoffperoxid unter harschen Prozessbedingungen im Mikrostruktureaktor erwies sich als kritisch. Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurde eine zweistufige Synthesesequenz entwickelt. Der stark exotherme Beginn der Reaktion wurde im Mikroreaktor durchgeführt, wobei innerhalb von nur zwei Minuten Ausbeuten von bis zu 35 % erreicht werden. Dem schließt sich eine weitere Synthesestufe mit erneuter Zugabe des Oxidationsmittels, jedoch bei längerer Verweilzeit der Reaktionskomponenten im Reaktor, an. Durch diese Prozessoptimierung konnten gegenüber dem Batch-Prozess eine deutliche Verringerung der Gesamtprozesszeit und ein sparsamerer Umgang mit dem Reagenz Wasserstoffperoxid erreicht werden.

Die ebenfalls durchgeführte Lebenszykluskostenbetrachtung zeigte, dass auch im Falle der Realisierung des Best Case Szenarios N aufgrund des vergleichsweise hohen Einflusses der Materialkosten keine merkliche Erhöhung der Ökoeffizienz (Ergebnis aus ökologischer und ökonomischer Bewertung) zu erwarten ist.^{66, 67} Mit der kontinuierlichen Prozessführung geht jedoch im Falle einer Produktion im industriellen Maßstab ein höherer Automatisierungsgrad sowie eine Verkürzung der insgesamt benötigten Prozesszeit einher.

⁶⁵ vgl. Kralisch et al. (2012); S. 300 - 311

⁶⁶ vgl. Kralisch et al. (2012); S. 300 - 311

⁶⁷ vgl. Kralisch et al. (2013a); S. 465 - 478

3.4 Prozessintensivierung der Biodieselproduktion

Ein ähnliches Konzept unter harschen Prozessbedingungen wurde im gleichen Verbundprojekt zur Intensivierung einer Biodieselproduktion verfolgt. Hier zeigten sich frühzeitig in der Prozessentwicklung die Vorteile einer mikroverfahrenstechnischen Prozessführung gegenüber einer Produktion im kontinuierlichen Rührkessel-Reaktor. Unter Einsatz von Alt-speiseöl und superkritischen Reaktionsbedingungen konnte die Synthese von Biodiesel intensiviert werden. Gegenüber der konventionellen Syntheseführung mit langen Verweilzeiten der Reaktionskomponenten ergaben sich deutliche ökologische und sicherheitstechnische Vorteile.⁶⁸

Diese Vorteile wurden mit Hilfe einer vergleichenden Ökobilanz quantifiziert. Durch die effiziente Verarbeitung von Abfallölen ohne aufwendige Vorbehandlungsschritte, die mit dem neu entwickelten Verfahren möglich wird, kann künftig eine Reduktion von Treibhausgasemissionen von bis zu 70 % im Vergleich zu einem industriell etablierten Prozess (moderate Prozessbedingungen und Verwendung von Sojaöl als Rohstoff) erwartet werden. Dies entspricht der Vermeidung von 860 t klimarelevanten Kohlendioxid-Äquivalenten je 1.000 t produziertem Biodiesel. Basierend auf diesen vielversprechenden Ergebnissen wurde eine erste Pilotanlage mit einem Durchsatz von 6 l/h Biodiesel in Alessandria, Italien, errichtet.

Auch eine Bewertung der ökonomischen Effizienz des neu entwickelten Konzeptes im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Studien⁶⁹ wurde vorgenommen. Es zeigte sich, dass zum damaligen Entwicklungsstand der Pilotanlage ein konventioneller (heterogen katalysierter) Prozess noch ökonomische Vorteile aufweist. Weitere Verbesserungen im Laufe der Entwicklungen und Maßstabsvergrößerung der Produktion waren jedoch zu erwarten.

⁶⁸ vgl. Kralisch et al. (2013b); S. 463 – 477

⁶⁹ vgl. West et al. (2008); S. 6587 – 6601

3.5 Beispiele aus der Feinchemie und Pharmaindustrie

Zuletzt soll im Folgenden kurz auf die Erfahrungen eingegangen werden, die bei einem Wechsel der Prozesstechnologie zur Herstellung von Feinchemikalien und pharmazeutischen Produkten gesammelt wurden.

Tabelle 1 zeigt zunächst die typischen Unterschiede in jährlichen Abfallaufkommen, den Produktionsmaßstäben und E-Faktoren (berechnet aus dem Verhältnis der Masse an Abfall und der Masse an Produkt)⁷⁰ zwischen der Massenproduktion vieler Chemikalien und der Synthese aktiver pharmazeutischer Wirkstoffe. Die Gegenüberstellung des E-Faktors macht deutlich, dass eine Optimierung bestehender pharmazeutischer Produktionsprozesse einen wesentlichen Beitrag zum Schutz der Umwelt und zur Steigerung der Ressourceneffizienz leisten kann, obwohl die jährlichen Produktionsmengen vergleichsweise gering sind.

Tabelle 1: Vergleich von typischen E-Faktoren, jährlichen Produktionsmengen und der Komplexität der Synthesesequenz für verschiedene Produktionsbereiche der chemischen Industrie und Pharmaindustrie^{71, 72, 73}

Industrie	E-Faktor*	Jahresproduktion [t]	Abfall** [Mio. t/a]	Anzahl Syntheseschritte	Zeit seit Entwicklung
Ölverarbeitung	ca. 0,1	10 ⁶ -10 ⁸	10	Aufarbeitung	>100
Bulkchemie	<1 bis 5	10 ⁴ -10 ⁶	5	1-2	10-50
Feinchemie	5 bis <50	10 ² -10 ⁴	0,5	3-4	4-7
Pharmazie	25 bis <100	10-10 ²	0,1	>6	3-5

* Berechnet aus dem Verhältnis der Masse an Abfall und der Masse an Produkt

** Berechnet als Summe aus höchstem E-Faktor und maximaler Jahresproduktion

Im Jahr 2011 veröffentlichte der GCI Pharmaceutical Roundtable, dem Pharmaunternehmen wie Pfizer, Johnson & Johnson, AstraZeneca und GlaxoSmithKline angehören,

⁷⁰ vgl. Sheldon (1994), S. 38 – 47

⁷¹ Henderson et al. (2007)

⁷² Wernet et al. (2010); S. 294 – 303

⁷³ Sheldon (2007); S. 1273 – 1283

eine Priorisierung von Schlüsselbereichen für eine grüne Prozessentwicklung.⁷⁴ Die Übertragung bestehender Verfahren in eine kontinuierliche Prozessführung wurde hierbei an oberster Stelle genannt.

Weitere aktuelle Trends in der Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien in der Pharma- und Feinchemikalienindustrie wurden von Watson zusammengefasst⁷⁵. Seine Analyse zeigt, dass vor allem große Pharmakonzerne ihre Unternehmensstrategien in den letzten Jahren angepasst und Konzepte wie kontinuierliche Prozessführung, aber auch alternative Lösungsmittel oder Energiequellen, in ihre Produktionsprozesse integriert haben.

Wissenschaftler der Universität Gent bewerteten die Auswirkungen einer Prozessoptimierung in der Pharmaindustrie unter Einsatz der Mikroverfahrenstechnik an einem realen Produktionsprozess.⁷⁶ In Zusammenarbeit mit Janssen Pharmaceutica, Teil des Konzerns Johnson & Johnson, suchten sie nach ökologischen Verbesserungen im Syntheseweg eines Anti-Alzheimer-Medikamentes. Sie konnten zeigen, dass eine Verringerung des Gesamtressourcenverbrauchs um bis zu 41 % durch die Optimierung der bestehenden Produktion durch neue Synthesewege einerseits und durch neue Technologien wie Mikroverfahrenstechnik andererseits erreichbar ist.

Kürzlich wurde eine ganzheitliche Ökobilanz-Analyse einer zehn Synthesestufen umfassenden Herstellung eines pharmazeutischen Wirkstoffes des Herstellers Sanofi in Frankreich, in diesem Falle eines Krebstherapeutikums, veröffentlicht. Auch hier stand bei den im Rahmen des EU-Projektes POLYCAT durchgeführten Arbeiten zur Prozessoptimierung der Transfer des bestehenden Produktionsprozesses vom Rührkessel in einen mikroverfahrenstechnischen Prozess im Mittelpunkt.⁷⁷ Durch eine Bündelung von Maßnahmen, die deutlich über den Verfahrenswechsel hinausgingen, ergaben sich unter anderem Einsparmöglichkeiten von bis zu 765 kg Kohlendioxid-Äquivalenten je kg produziertem Wirk-

⁷⁴ vgl. Jimenez-Gonzalez et al. (2011); S. 900–911

⁷⁵ vgl. Watson (2012)

⁷⁶ vgl. Van der Vorst et al. (2013)

⁷⁷ vgl. Ott et al. (2014); S. 3521–3533

stoff (relevant in Hinblick auf den Klimawandel) und bis zu 65 kg Eisen-Äquivalenten/kg Wirkstoff (relevant in Hinblick auf den Verbrauch endlicher metallischer Ressourcen). Begleitende Kostenkalkulationen ergaben zudem Reduktionsmöglichkeiten der Herstellungskosten von bis zu 33 %.^{78,79}

In dieser sowie anderen Ökobilanzstudien, z. B. Yasneva et al.⁸⁰ oder Gericke et al.⁸¹, wird jedoch immer wieder kritisch darauf hingewiesen, dass der erhöhte Lösungsmittelbedarf, der sich aus der Übertragung von einem diskontinuierlichen Batch- hin zu einem kontinuierlichen mikroverfahrenstechnischen Prozess ergeben kann, die Umweltbilanz des Gesamtprozesses auch verschlechtern kann. Konsequenterweise ergeben sich in Summe häufig nur dann ökologische Vorteile durch den Technologiewechsel hin zum mikroverfahrenstechnischen Prozess, wenn die Voraussetzung eines effizienten Lösungsmittelrecyclings erfüllt ist.

Insgesamt zeigen die Beispiele aus den vergangenen Jahren jedoch deutlich, dass die Miniaturisierung von Reaktoren in der Prozessindustrie zu einer Verbesserung der Umweltbilanz von Produktionsprozessen führen kann. Die beschriebenen Verringerungen umweltschädlicher Emissionen sind vor allem auf den effizienteren Einsatz von Rohstoffen und Energie zurückzuführen und tragen somit gleichermaßen zu einer Erhöhung der Ressourceneffizienz bei.

⁷⁸ vgl. Hessel et al. (2014b); S. 1326 – 1338

⁷⁹ vgl. Ott et al. (2014); S. 3521 – 3533

⁸⁰ vgl. Yasneva et al. (2015); S. 90 – 96

⁸¹ vgl. Gericke et al. (2015); S. 15898 – 15908

4 BRANCHENSPEZIFISCHE FALLSTUDIE

Nachfolgend soll das Thema Ressourceneffizienz in der Prozessindustrie im Kontext einer Miniaturisierung im Maschinen- und Anlagenbau noch einmal eingehender betrachtet werden. Anhand einer Fallstudie wird gezielt nach der möglichen Einsparung fossiler und metallischer Rohstoffe, erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieträgern und den Auswirkungen auf Ökosysteme gefragt.

Jedes Unternehmen ist heute angehalten, effizient mit dem Einsatz natürlicher Ressourcen zu arbeiten und Neuentwicklungen zu forcieren, insofern sie einen Schritt in die Zielrichtung bedeuten, zu forcieren. Aber wie wird der Erfolg messbar?

Es wurde bereits anhand von Literaturbeispielen gezeigt, dass mittels vergleichender Ökobilanzen eine Gegenüberstellung und Bewertung ganzheitlicher Auswirkungen eines Wechsels herkömmlicher Verfahrensweisen hin zu neu entwickelten Alternativen möglich sind. Dies gilt auch für eine vergleichende Bewertung der Ressourceneffizienz alternativer Verfahren, Maschinen und Anlagen. Als Fallstudie wird wiederum die Darstellung von m-Anisaldehyd aus m-Bromanisol und n-Butyllithium herangezogen (siehe auch Kapitel 3.1). Dieses Beispiel verdeutlicht die Potenziale der Mikroverfahrenstechnik, aufgrund des vergleichsweise hohen Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses und der kleinen Reaktionsräume auch Synthesen mit starker Wärmetönung sicher und mit geringerem Bedarf an Kühlung zu betreiben. Verglichen wird eine diskontinuierliche Prozessführung der zweistufigen Synthese im Rührkessel mit einer Reaktionszeit über mehrere Stunden und einer kontinuierlichen Synthese im Cytos Pilot System mit einer Verweilzeit der Reaktionskomponenten in Mikroreaktoren von wenigen Minuten.

4.1 Prozessbeschreibung und Bilanzraum

Die Herstellung von m-Anisaldehyd setzt sich aus zwei Reaktionsschritten zusammen. In Stufe I wird m-Bromanisol (1) mittels eines Brom-Lithium-Austausches durch n-Butyl-

lithium zu m-Lithiumanisol (2) und n-Butylbromid umgesetzt. Für die Reaktion zu m-Anisaldehyd (3) wird in Stufe II N,N-Dimethylformamid zugesetzt und die Reaktion in Salzsäure gequenchet. Als Lösungsmittel wird üblicherweise Tetrahydrofuran verwendet.

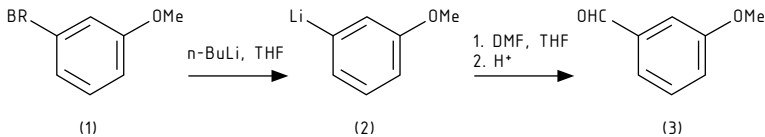


Abbildung 8: Reaktionsgleichung zur Herstellung von m-Anisaldehyd

Der Prozessablauf für beide Verfahrensalternativen gliedert sich hierbei in sieben Schritte (Abbildung 9). Die Prozessschritte bei der diskontinuierlichen und kontinuierlichen Produktion sind mit Hilfe der Umberto NXT Software⁸² modelliert worden (Abbildung 10). Zur ganzheitlichen Modellierung der Produktion vor- und nachgelagerter Prozessschritte (z. B. Herstellung der Reaktionskomponenten, der Lösungsmittel, Bereitstellung der Energie oder auch die Entsorgung von Abfällen) sind Datensätze der Ecoinvent-Datenbank⁸³ herangezogen worden. Diese enthält eine umfassende, lebenswegbasierte Sammlung von Datensätzen zu Stoff- und Energieströmen bei einer Vielzahl industrieller Prozesse.

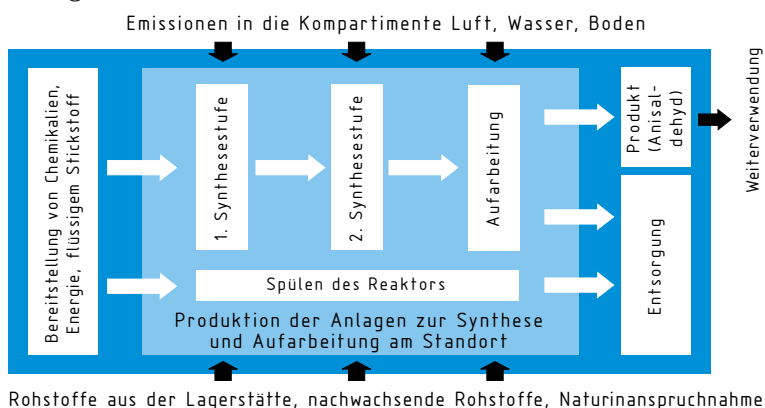


Abbildung 9: Systemgrenzen des betrachteten Fallbeispiels

⁸² vgl. IFU, IFEU (2013)

⁸³ vgl. ECOINVENT (2013)

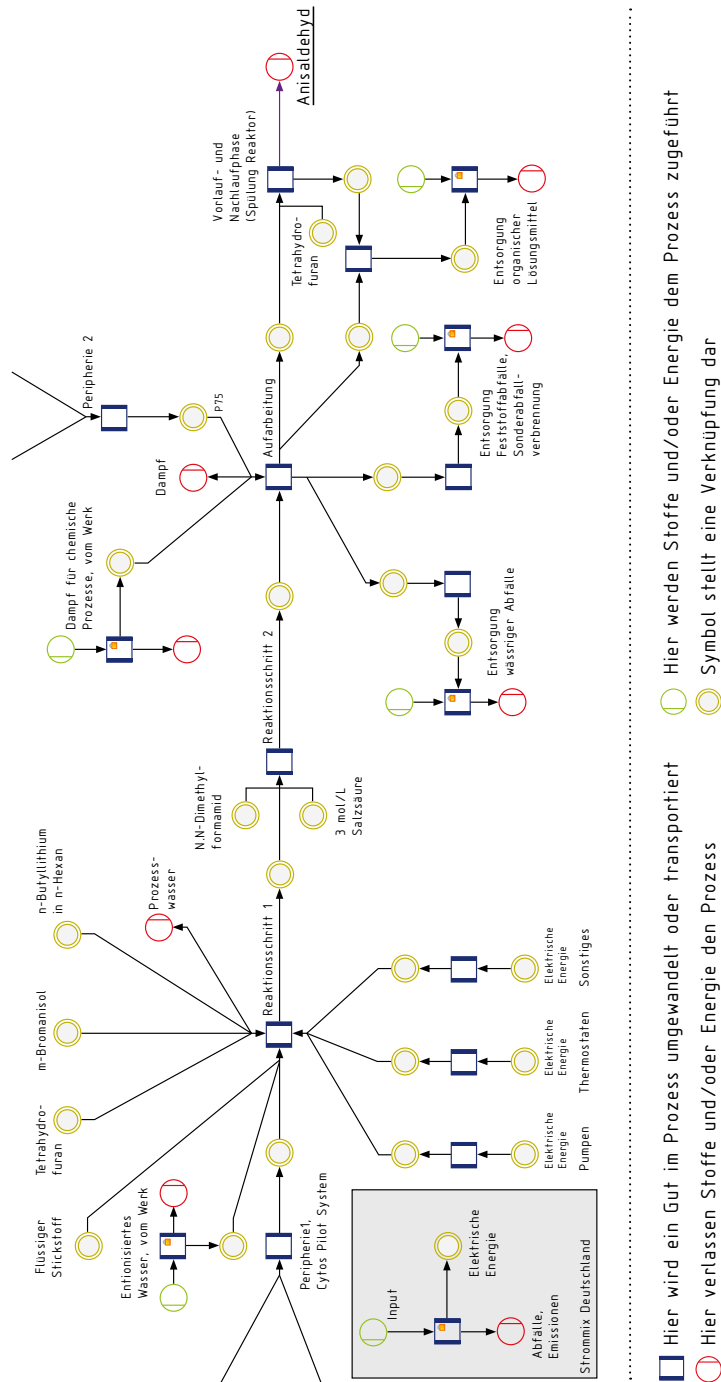


Abbildung 10: Ausschnitt aus der Energie- und Stoffstrommodellierung für die Fallstudie m-Anisaldehyd

Im ersten Schritt ist die Bereitstellung der Ressourcen, Chemikalien und der Energie dargestellt. Zur Bereitstellung der Chemikalien werden unabhängig von der Prozessführung die gleichen Ausgangsstoffe benötigt. Hierbei wird n-Butyllithium in n-Hexan bereitgestellt. Die Gewinnung von m-Bromanisol erfolgt üblicherweise in einem vierstufigen Prozess, ausgehend von Nitrobenzol. Darüber hinaus ist der Bereitstellung von N,N-Dimethylformamid, Tetrahydrofuran, (flüssigem) Stickstoff und 3-molarer Salzsäure. Anschließend folgt der Hauptprozess, der sich aus den zwei Synthesestufen zur Reaktion von m-Bromanisol über m-Lithiumanisol zu m-Anisaldehyd und der Aufarbeitung des Reaktionsproduktes zusammensetzt. Inbegriffen sind die Lebensdauer der jeweiligen Produktionsanlage (400 l-Rührkessel bzw. Cytos Pilot System sowie der Infrastruktur einer Produktion in der chemischen Industrie) und die Reinigung der Reaktoren vor und nach der Produktion. Im Falle des kontinuierlichen Prozesses befindet sich abwechselnd je ein Reaktor-Doppelmodul in der Spülphase (Einsatz von Tetrahydrofuran als Reinigungsmittel). Abweichend hierzu wird der Rührkessel bei diskontinuierlicher Reaktionsführung nach jedem Ansatz in der Spülphase mit einer Mischung aus Tetrahydrofuran und Aceton gereinigt. Beim eigentlichen Syntheseprozess ist zwischen einer Synthese im 400-l-Rührkesselreaktor und im Cytos Pilot System zu unterscheiden. Die Gesamtausbeute an Produkt nach der Aufreinigung liegt hierbei für beide Prozessalternativen gleich hoch. Das Cytos Pilot System setzt sich jedoch aus elf Mikroreaktor-Modulen zusammen, wobei ein Modul aus je zwei Mikroreaktoren zur Durchführung der zweistufigen Synthese besteht. Angenommen wurde, dass die zum Einsatz kommenden Mikroreaktoren aufgrund der aggressiven Medien eine Lebensdauer von durchschnittlich einem Jahr zeigen, während ein Rührkessel in der chemischen Industrie üblicherweise eine Lebensdauer von ca. 30 Jahren aufweist.

Der Energiebedarf für die Komponenten der Produktionsanlagen (Rührer, Pumpen, Thermostaten u. a.) ist einzeln betrachtet worden, um den Einfluss der miniaturisierten Bauteile bei kontinuierlicher Prozessführung zu bewerten

(Kapitel 4.4). Der Energiebedarf für die einzelnen Prozessschritte in den Vorketten und dem Hauptprozess wurde durch die Ecoinvent-Datensätze für einen elektrischen Strommix aus Deutschland bzw. die Erzeugung von Heißdampf für chemische Prozesse berücksichtigt. Im letzten Schritt erfolgen die Entsorgung und Aufbereitung aller anfallenden Abfallprodukte. Die Entsorgung ist aufgeteilt in die der Feststoffabfälle (Lithiumchlorid) und die der eingesetzten Lösungsmittel und Reaktionskomponenten, aufgeteilt in organische Verbindungen (n-Hexan, Tetrahydrofuran, N,N-Dimethylformamid, Aceton) und die anfallenden wässrigen Abfälle (salzsaure Lösung).

Es wurden somit alle Massen- und Energieflüsse und die dazugehörigen Neben- und Abfallprodukte während der zwei Synthesestufen und der anschließenden Aufarbeitung betrachtet. Die resultierenden Umweltauswirkungen wurden bezogen auf eine Tonne Reaktionsprodukt m-Anisaldehyd kalkuliert.

4.2 Bewertungsmethodik

Die Bewertung erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurden ausgewählte Wirkkategorien einer Ökobilanz herangezogen, die einen direkten Bezug zu verschiedenen Aspekten der energetischen und stofflichen Ressourceneffizienz aufweisen.

- Kumulierter Energieaufwand (KEA) in Gigajoule differenziert zwischen erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieträgern. Hierbei umfassen die erneuerbaren Energieträger Windkraft, Wasserkraft, Solarenergie, Biomasse und Erdwärme. Als nicht erneuerbare Energieträger wurden fossile Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas) und die Energiegewinnung durch Holzverbrennung berücksichtigt.
- Verbrauch an fossilen Rohstoffen (anhand von Erdöl-Äquivalenten)
- Verbrauch von Erzen in der Lagerstätte (anhand von Eisen-Äquivalenten)
- Klimawandel (bezogen auf Kohlendioxid-Äquivalente).

Zur Berechnung des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) wurde die VDI-Richtlinie 4600⁸⁴ herangezogen. Der kumulierte Energieaufwand umfasst alle Energien, die für die gesamte Prozesskette eines Verfahrens bzw. entlang dem Lebensweg eines Produktes oder einer Dienstleistung benötigt werden. Bei seiner Ermittlung werden auch Rückführungen und Wiederverwendungen, eine energetische Nutzung und Entsorgung, der Einfluss der Nutzungsdauer und anderes mehr unter energetischen Gesichtspunkten berücksichtigt. Die Wirkkategorien Verbrauch fossiler Rohstoffe, Verbrauch von Erzen in der Lagerstätte und Klimawandel wurden mit Hilfe der Kategorien Fossil Depletion Potential (FDP), Metal Depletion Potential (MDP) und Climate Change (CC) der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe⁸⁵ bewertet.

Die Wirkungsabschätzung mit Hilfe dieser Kriterien ermöglicht einen detaillierten Einblick in den Anteil einzelner Prozessschritte an den resultierenden Umweltwirkungen der Alternativprozesse (Kapitel 4.3 und 4.4).

Zur vergleichenden Bewertung der resultierenden Ressourceneffizienz der diskontinuierlichen und kontinuierlichen Prozessführung wurden dann folgende, auf den zuvor genannten Wirkkategorien beruhende Bewertungen vorgenommen:

- Energetische Ressourceneffizienz, erneuerbare und nicht erneuerbare Energieträger (1 t m-Anisaldehyd/GJ).
- Stoffliche Ressourceneffizienz: 1 t m-Anisaldehyd/t fossiler Rohstoffe (anhand von Erdöl-Äquivalenten) und 1 t m-Anisaldehyd/t Erze in der Lagerstätte (anhand von Eisen-Äquivalenten).
- Ökosystemleistung bezogen auf 1 t m-Anisaldehyd/t Treibhausgasemissionen (bezogen auf Kohlendioxid-Äquivalente).

Der ausschließliche Bezug der Kategorie Ökosystemleistungen auf Treibhausgasemissionen stellt eine Vereinfachung

⁸⁴ vgl. VDI 4600:1997-06 (1997)

⁸⁵ vgl. Goedkoop et al. (2009)

dar. Die in der Realität deutlich komplexeren Zusammenhänge zwischen der Inanspruchnahme von Ressourcen und der natürlichen Senkenleistung verschiedener Ökosysteme müssen noch eingehender wissenschaftlich untersucht werden. Derzeit liegen hierfür keine anerkannten Wirkfaktoren vor, die zur Bewertung herangezogen werden könnten.

4.3 Vergleich der diskontinuierlichen und kontinuierlichen Prozessführung anhand ausgewählter Wirkkategorien einer Ökobilanz

Bei der Auswertung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zeigt sich, dass der Kumulierte Energieaufwand nicht erneuerbarer Energieträger im Falle des kontinuierlichen Verfahrens insgesamt um 16 % geringer ist als der KEA für den diskontinuierlichen Prozess (Abbildung 11). Die Bereitstellung der Ausgangsstoffe und Lösungsmittel nimmt aufgrund ihres ökologischen Rucksacks aus der Herstellphase in beiden Fällen einen erheblichen Anteil ein. Dieser liegt um 60 % bei einer diskontinuierlichen und um 69 % bei einer kontinuierlichen mikroverfahrenstechnischen Prozessführung.

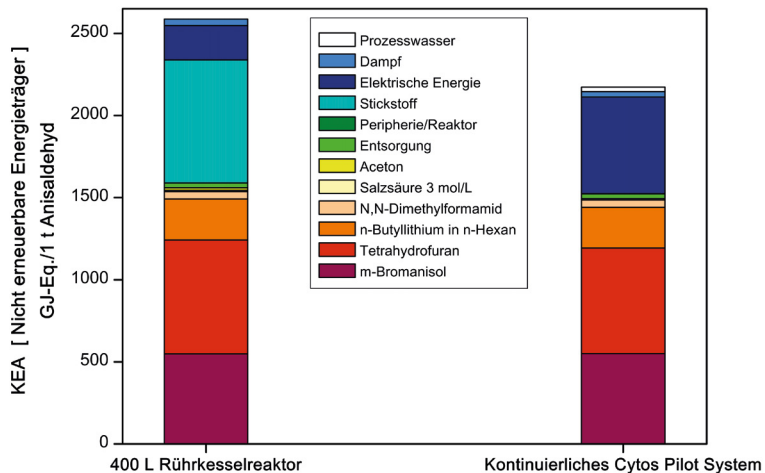


Abbildung 11: Gegenüberstellung des Kumulierten Energieaufwandes nicht erneuerbarer Energieträger für die Prozessalternativen diskontinuierliche und kontinuierliche mikroverfahrenstechnische Herstellung von m-Anisaldehyd

Hierbei hat die Bereitstellung der Chemikalien m-Bromanisol und Tetrahydrofuran wiederum insgesamt den größten Anteil. Der entscheidende Unterschied bei der Bewertung des KEA „nicht erneuerbare Energieträger“ für beide Prozesse liegt jedoch in der Bereitstellung flüssigen Stickstoffs, der bei der Produktion im Rührkessel 29 % der Gesamtbilanz ausmacht. Im Falle des kontinuierlichen Prozesses wird Stickstoff lediglich als Schutzgas benötigt und hat daher einen Anteil $< 1\%$. Weitere Prozessbausteine, wie der Bau und die Lebensdauer des Reaktors, die Entsorgung der chemischen Abfälle oder das Prozesswasser, üben in beiden Prozessalternativen nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis aus.

Der KEA, bezogen auf nicht erneuerbare Energieträger, ist im Vergleich zum KEA „erneuerbare Energieträger“ um vier Zehnerpotenzen größer. Das qualitative Ergebnis der beiden Wirkkategorien fällt allerdings gleich aus.

Der KEA „erneuerbare Energieträger“ beschreibt den Anteil erneuerbarer Energien an der Bereitstellung von Strom, Chemikalien etc. Er ist bei der kontinuierlichen mikroverfahrenstechnischen Gewinnung von m-Anisaldehyd im Vergleich zum diskontinuierlichen Prozess um 28 % geringer (Abbildung 12).

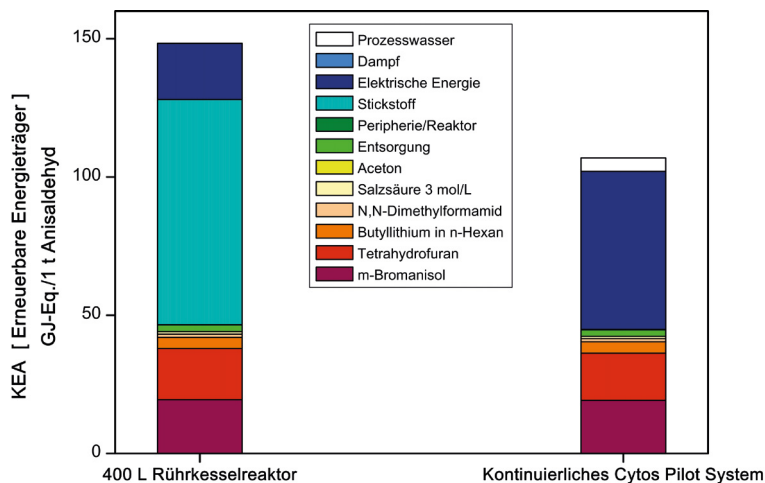


Abbildung 12: Gegenüberstellung des KEA „erneuerbare Energieträger“ für die Prozessalternativen diskontinuierliche und kontinuierliche mikroverfahrenstechnische Herstellung von m-Anisaldehyd

Die Herstellung der Chemikalien macht dabei einen Anteil von 30 % im Falle der diskontinuierlichen Prozessführung und 40 % beim Cytos Pilot System aus. Der im Prozess verwendete flüssige Stickstoff zur Kühlung beeinflusst den KEA „erneuerbare Energieträger“ im Falle der Produktion im Rührkessel mit 55 %. Allerdings ist der Anteil der aufgewendeten elektrischen Energie im Falle der Synthese im Rührkessel mit 14 % deutlich geringer. Der Anteil der Bereitstellung elektrischer Energie am resultierenden KEA beträgt bei einer kontinuierlichen Betriebsweise dagegen etwa 54 %. Dies ist unter anderem auf den vergleichsweise hohen Energieaufwand zum Betreiben von Thermostaten zurückzuführen, mit denen die Reaktionstemperatur bei 0 °C gehalten wird.

Die Bewertung des Verbrauches fossiler Rohstoffe führt erwartungsgemäß zu ähnlichen Ergebnissen wie für den KEA „nicht erneuerbare Energieträger“, da in beiden Fällen vor allem fossile Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle berücksichtigt werden (Abbildung 13).

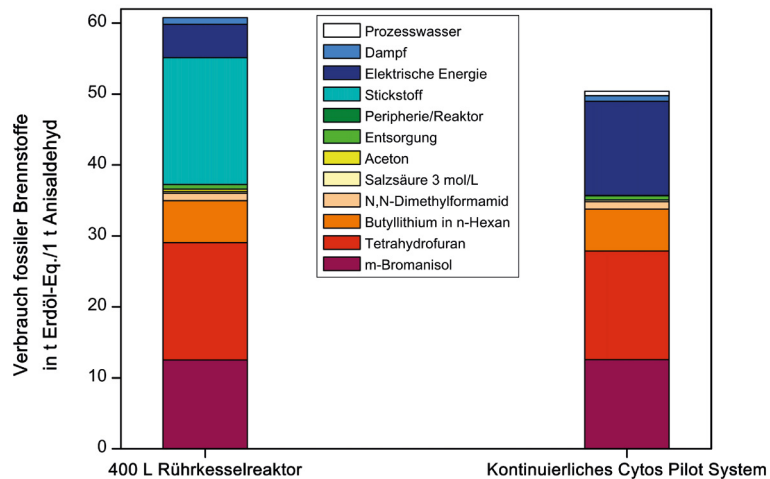


Abbildung 13: Gegenüberstellung des Verbrauches fossiler Brennstoffe für die Prozessalternativen diskontinuierliche und kontinuierliche mikroverfahrenstechnische Herstellung von m-Anisaldehyd

Der Verbrauch von Erzen in der Lagerstätte ist jedoch in beiden Fällen erstaunlicherweise ähnlich hoch (Abbildung 14). Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Bereitstellung der Chemikalien hier von allen untersuchten Faktoren den höchsten Anteil aufweist. Trotz der angenommenen deutlich kürzeren Lebensdauer der Mikroreaktoren im Vergleich zu einem industriell verwendeten Rührkessel nimmt das Prozessmodul „Peripherie/Reaktor“ insgesamt nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis in dieser Kategorie. Stattdessen gleichen sich die Einflüsse der Vor- und Nachteile der beiden Kühlsysteme (kryogen mit flüssigem Stickstoff bzw. Thermostat mit Kühlflüssigkeit) nahezu aus.

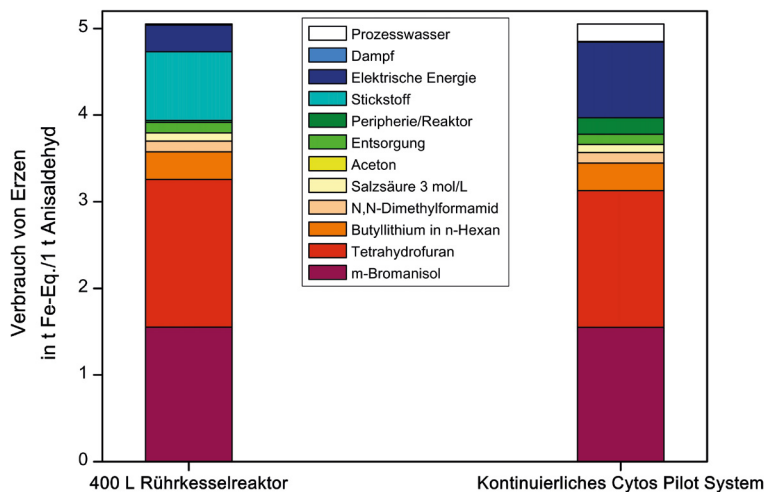


Abbildung 14: Gegenüberstellung des Verbrauches von Erzen in der Lagerstätte für die Prozessalternativen diskontinuierliche und kontinuierliche mikroverfahrenstechnische Herstellung von m-Anisaldehyd

Der positive Einfluss des mikroverfahrenstechnischen Systems auf die möglichen Reduktionen von Treibhausgasemissionen zeigt sich dagegen deutlich (Abbildung 15). Der Wert ist in diesem Falle um 16 % geringer. In dieser Wirkungskategorie ergibt sich zudem durch die Entsorgung und Wiederaufbereitung von Abfallstoffen ein signifikanter Einfluss von 11 % (diskontinuierliche) bzw. 12 % (kontinuierliche) mikroverfahrenstechnische Betriebsweise.

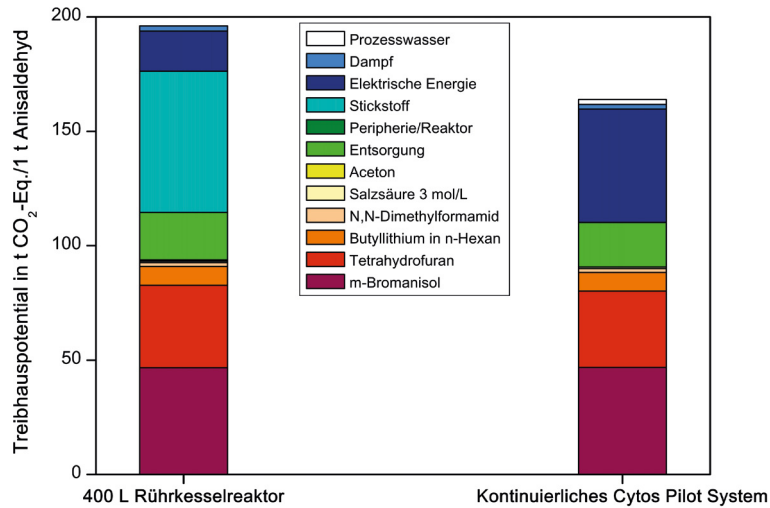


Abbildung 15: Gegenüberstellung der Emission klimaschädlicher Gase im Falle der Prozessalternativen diskontinuierliche und kontinuierliche mikroverfahrenstechnische Herstellung von m-Anisaldehyd

4.4 Der Einfluss von Mikropumpen auf die Umweltfreundlichkeit der Prozessführung

Die kontinuierliche Prozessführung zur Produktion von m-Anisaldehyd im Cytos Pilot System erfordert die Handhabung kleiner Volumina an Reagenzien. Dies kann mit herkömmlichen Pumpen nicht gehandhabt werden. Das präzise Dosieren und die Regulation des Zustroms an Chemikalien machen den kontinuierlichen Einsatz von Mikropumpen erforderlich. Dagegen sind die Pumpen bei der absatzweisen Dosierung der Edukte in den Rührkessel nur zeitweise in Betrieb.

Anhand des zuvor vorgestellten KEA für erneuerbare und nicht erneuerbare Energieträger wurde daher ein Vergleich zwischen dem Einfluss der Pumpen bei der diskontinuierlichen Produktion im Rührkessel und dem von Mikropumpen für einen kontinuierlichen mikroverfahrenstechnischen Betrieb vorgenommen (Abbildung 16 und Abbildung 17).

Zur Erinnerung: Der Anteil der Bereitstellung elektrischer Energie am KEA „erneuerbare Energieträger“ war beim dis-

kontinuierlichen Betrieb im Beispiel in Kapitel 4.3 deutlich geringer (14 %) als beim kontinuierlichen mikroverfahrenstechnischen Betrieb (54 %). Beim KEA „nicht erneuerbare Energieträger“ lag der Anteil der elektrischen Energie beim diskontinuierlichen Prozess bei 8 % und beim kontinuierlichen Prozess bei 27 %. Die Kühlung des diskontinuierlichen Rührkessels auf $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ machte hierbei den größeren Anteil am KEA der diskontinuierlichen Prozessführung aus. Die Miniaturisierung der Reaktoren ermöglichte dagegen beim kontinuierlichen mikroverfahrenstechnischen Prozess eine Reaktionstemperatur von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und erforderte somit ein geringeres Maß an Kühlung. Hier lag jedoch der Anteil an elektrischer Energie bei der Betrachtung des KEA für den Gesamtprozess deutlich höher.

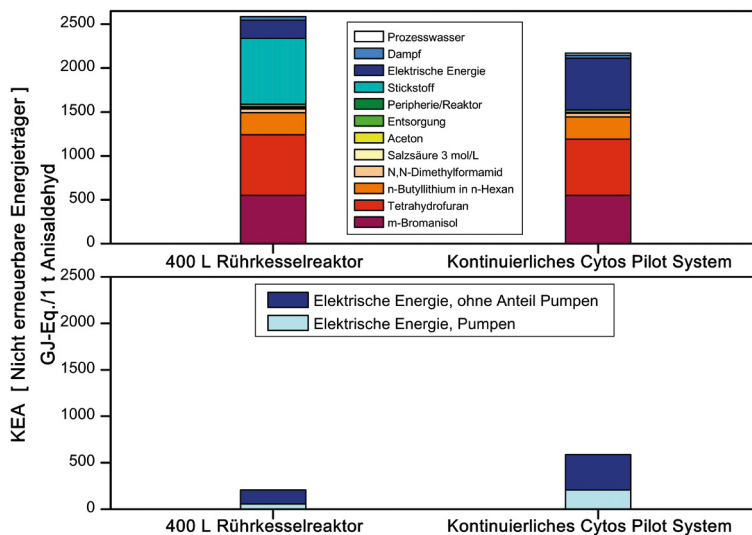


Abbildung 16: Einfluss der Pumpensysteme auf den Kumulierten Energieaufwand nicht erneuerbarer Energieträger für die Prozessalternativen diskontinuierliche und kontinuierliche mikroverfahrenstechnische Herstellung von m-Anisaldehyd

Wird nun der aufgeschlüsselte Anteil der eingesetzten Pumpen betrachtet, so ergibt sich ein deutlicher Unterschied. Der KEA „nicht erneuerbare Energieträger“ zum Betrieb der Vakuumpumpen, mit denen die Chemikalien im dis-

kontinuierlichen Betrieb dosiert wurden, liegt bei 28 % des KEA, der insgesamt bei der Bereitstellung von elektrischer Energie verursacht wurde (Abbildung 16).

Im Falle der kontinuierlichen Betriebsweise wurde der Energiebedarf von Mikrozahnringspumpen in der Ökobilanz berücksichtigt. Hier lag der Anteil am KEA „nicht erneuerbare Energieträger“ bei 35 %. Ein noch deutlicherer Unterschied zeigt sich bei der Auswertung des KEA „erneuerbare Energieträger“ (Abbildung 17). Dies ist auf den vergleichsweise hohen Anteil erneuerbarer Energien an der Erzeugung elektrischer Energie in Deutschland zurückzuführen.

Trotz des höheren KEAs (erneuerbar bzw. nicht erneuerbar), der direkt aus dem Bedarf der Mikropumpen an elektrischer Energie resultiert, sind diese in der kontinuierlichen mikroverfahrenstechnischen Betriebsweise unabdingbar. Die präzise Dosierung der Edukte und die daraus resultierenden kurzen Reaktionszeiten tragen zur Verbesserung der Ökobilanz des Gesamtprozesses bei.

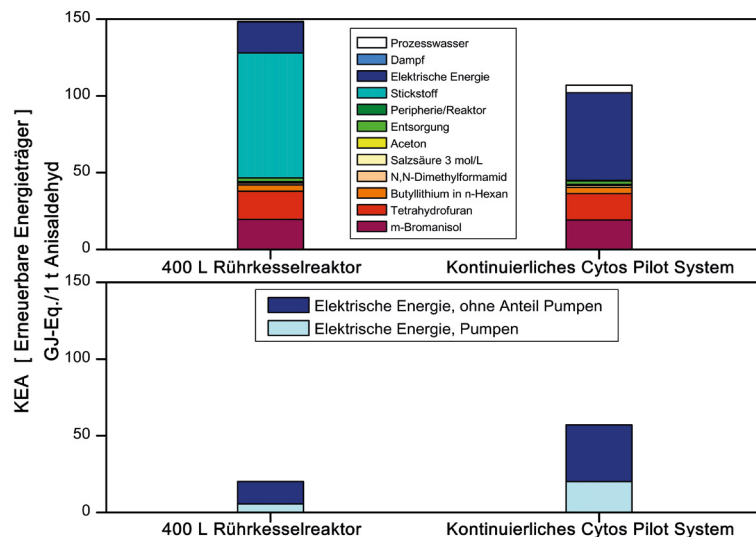


Abbildung 17: Einfluss der Pumpensysteme auf den Kumulierten Energieaufwand erneuerbarer Energieträger für die Prozessalternativen diskontinuierliche und kontinuierliche mikroverfahrenstechnische Herstellung von m-Anisaldehyd

4.5 Auswirkungen auf die Ressourceneffizienz der Verfahren

In Abbildung 18 sind abschließend die Auswirkungen des Verfahrenswechsels vom diskontinuierlichen Prozess im Rührkessel hin zu einem kontinuierlichen mikroverfahrenstechnischen Prozess auf die Ressourceneffizienz zusammengefasst.

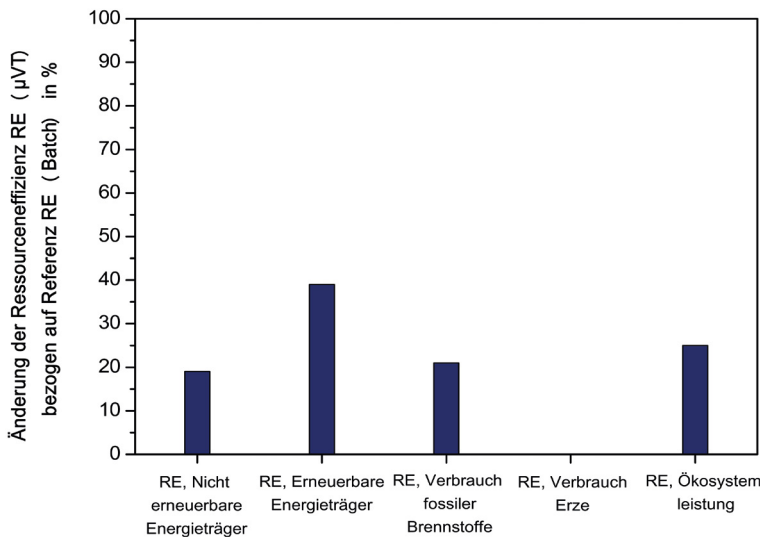


Abbildung 18: Änderung der Ressourceneffizienz (RE) durch den Wechsel von der Prozessalternative Batch (Referenz) zur mikroverfahrenstechnischen Herstellung von m-Anisaldehyd

Diese ergeben sich aus den zuvor diskutierten Änderungen beim Einsatz von Rohstoffen und Energien. Der Batch-Prozess dient in der Abbildung als Referenz, dargestellt wird die prozentuale Änderung der Ressourceneffizienz. Es ergibt sich in vier der fünf betrachteten Kategorien eine Steigerung der Ressourceneffizienz durch den Wechsel hin zum Einsatz miniaturisierter Komponenten. Diese kann im Falle des ressourceneffizienten Einsatzes erneuerbarer Energien um bis zu 39 % verbessert werden. Bei der Bewertung der stofflichen Ressourceneffizienz bezogen auf Erze in der Lagerstätte (anhand von Ei-

sen-Äquivalenten) ergaben sich im Gesamtkontext keine signifikanten Nachteile durch die verkürzte Lebensdauer der mikroverfahrenstechnischen Komponenten (verursacht durch Dauerkontakt mit dem aggressiven Reagenz n-Butyllithium).

4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Fallstudie

Eine absatzweise Prozessführung im Rührkessel ist mit einer kontinuierlichen Prozessführung in miniaturisierten Reaktoren und unter Einsatz von Mikropumpen betrachtet worden. Bei der Bewertung verschiedener Aspekte der ökologischen Auswirkungen einerseits und der Ressourceneffizienz beider Prozesse andererseits zeigten sich deutliche Vorteile für die Verfahrensalternative, bei der miniaturisierte Bauteile zum Einsatz kommen. Diese müssen nicht, wie im Falle der Mikropumpen diskutiert, auf einer direkten Einsparung von Energie beim Betrieb der Apparatur beruhen. Im diskutierten Fallbeispiel ermöglichte das bessere Oberflächen-Volumen-Verhältnis von Mikroreaktoren eine Erhöhung der Prozesstemperatur und damit eine Verringerung des Kühlungsbedarfes. Eine präzise Dosierung der teilweise aggressiven Medien erlaubte kurze Reaktions- und Verweilzeiten im Reaktor. Daraus ergab sich unter anderem eine Verbesserung der energetischen Ressourceneffizienz nicht erneuerbarer Energieträger um fast 20 %. Ein Beispiel macht das daraus resultierende Einsparpotenzial deutlich: Der bei der Produktion von 1 t m-Anisaldehyd durch den mikroverfahrenstechnischen Prozess eingesparte kumulierte Energieaufwand entspricht dem Energieaufwand von 296 Personenwagen auf der Strecke von Berlin nach Hamburg.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die in dieser Kurzanalyse vorgestellten Themenschwerpunkte können nur einen kleinen Einblick in die tatsächlichen Potenziale der Miniaturisierung für die Ressourceneffizienz im Maschinen- und Anlagenbau geben. Die vorgestellten Beispiele, die von der Produktion von Kraftstoffen und Farben bis hin zu Feinchemikalien und pharmazeutischen Produkten reichen, zeigen jedoch deutlich, dass dieses Potenzial vorhanden ist. Es konnte durch die Überführung in kontinuierliche mikroverfahrenstechnische Prozesse, die meist auch mit einer Anpassung der Prozessbedingungen einherging, eine teilweise erhebliche Reduktion des Umweltbelastungspotenzials erreicht werden.

Des Weiteren liegen vielversprechende Anwendungen miniaturisierter Bauteile in der Prozessindustrie beispielsweise in der Antriebstechnik. Hochdynamische und gleichzeitig hochgenaue Positionierungen, unter anderem bei der Chippositionierung vor dem Die-Bonden, erfordern geeignete Antriebe mit besonderen Eigenschaften. Mikro-Antriebe wie das Micro Harmonic Drive Getriebe werden hier genutzt, um Chips mit einer sehr hohen Winkelgenauigkeit auszurichten, bevor sie auf einem Substrat abgelegt werden. Durch die besonders geringen Massen und Massenträgheitsmomente, die sehr geringe Spielfreiheit sowie das einfache Regelungsverhalten ist eine deutlich höhere Produktivität ohne Genauigkeitsverlust möglich. Weitere wichtige Aspekte stellen gerade in diesem Anwendungsbereich ein geringes Ausgasungsverhalten der verwendeten Komponenten oder der Betrieb der Mikroantriebssysteme im Vakuum dar. Präzise Mikrogetriebe und Mikroantriebssysteme bilden hier eine Schlüsseltechnologie für eine neue Generation von Geräten und Maschinen und können sogar im Ultra-Hochvakuum bei Drücken bis zu 10^{-12} mbar eingesetzt werden. Sie ermöglichen insgesamt einen höheren Durchsatz der Maschinen bei geringerem Ausschussanteil.

Weitere Positionieranwendungen sind in den Bereichen Ausrichten von Linsen und Spiegeln in der Optik, Medizintechnik, Mikrorobotik, Lasertechnik, Biotechnologie,

Messmaschinen sowie Luft- und Raumfahrt denkbar.⁸⁶

Ein zusätzliches vielversprechendes Beispiel aus dem Bereich Automatisierung ergeben Mikroventile. Greifersysteme ermöglichen präzise Handhabungen und eine Automatisierung der Montage von Werkstücken. Gegenwärtig werden pneumatische Aktoren für diese Greifmodule üblicherweise über eine Ventilinsel und längere Zuleitungen zentral angesteuert. Dieser Aufbau kann beim Betrieb des Greifersystems zu einem hohen Verlust der durch elektrische Energie erzeugten Druckluft führen. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Mikroventiltechnologie eine dezentrale Regulierung der Aktoren. Diese können beispielsweise über neu entwickelte Mikroventile direkt angesteuert werden. Daraus resultiert eine Reduktion der Taktzeit, des Druckluftverbrauchs sowie der damit verbundenen Energiekosten. Laut Angaben des Unternehmens Schunk im Rahmen der Blue Competence Initiative des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) können diese integrierten Pneumatikventile den Druckluftverbrauch um bis zu 90 % verringern.

Diese wenigen Beispiele zeigen bereits, welche weiteren Potenziale die Miniaturisierung im Maschinen- und Anlagenbau in Hinblick auf die Verbesserung der Ressourceneffizienz künftig eröffnen kann. Um diese nutzen zu können, sind jedoch auch weitere fundierte Ökobilanz- und Ressourceneffizienz-Studien zum Vergleich dieser Potenziale notwendig. So kann die Entwicklung innovativer Technologien zielgerichtet unterstützt und gefördert werden.

⁸⁶ vgl. Degen et al. (2004)

6 SCHLUSSBEMERKUNGEN

Wie bereits in Kapitel 5 erwähnt, konnte in der Kurzanalyse zum tatsächlichen Potenzial der Miniaturisierung für Ressourceneffizienz im Maschinen- und Anlagenbau nur ein kleiner Einblick gegeben werden. Eine umfassende Untersuchung der unterschiedlichen bzw. wesentlichen Anwendungsfelder steht noch aus.

Neben den ausführlich dargestellten Technologiefeldern Mikroverfahrenstechnik und Mikropumpen, sollten künftig u. a. auch die Technologiefelder Mikroantriebe, Mikrogetriebe, Mikromotoren und Mikroventile vertiefend angesprochen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Kurzanalyse konnten aufgrund von fehlendem Datenmaterial noch keine verallgemeinerbaren Aussagen zum Ressourceneffizienzpotenzial der genannten Komponentengruppen formuliert werden. Des Weiteren existieren bislang keine Studien zu diesem Themenfeld.

Um die Potenziale der Steigerung der Ressourceneffizienz im Maschinen- und Anlagenbau zu heben, bedarf es weiterer, fundierter Studien zur Analyse, zur Quantifizierung und zum Vergleich dieser Potenziale. Nur so kann das Potenzial innovativer, miniaturisierter Technologien zielgerichtet ausgeschöpft, gefördert und im Sinne eines nachhaltigen Produktentwicklungsprozesses wirksam werden.

Ganzheitliche Bewertungsansätze zur Ressourceneffizienz miniaturisierter Komponenten und Systeme können auf dieser Basis entwickelt und verfeinert werden.

7 LITERATURVERZEICHNIS

Abhari et al. (2012): F. Abhari, H. Jaafar and N. A. M. Yunus: A Comprehensive Study of Micropumps Technologies. *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol. 7, 2012.

Amirouche et al. (2009): F. Amirouche, Y. Zhou and T. Johnson: Current micropump technologies and their bio-medical applications. *Microsystem Technol.*, Vol. 15, 2009.

Bare (2002): J. C. Bare: Traci – The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *J. Ind. Ecol.*, Vol. 6, 2002.

BMUB (2015): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess), 2. Auflage, Berlin Februar 2015.

Colombo, Peretto (2008): M. Colombo and I. Peretto: Chemistry strategies in early drug discovery: an overview of recent trends. *Drug Discov. Today*, Vol. 13, 2008.

CoPIRIDE: Fraunhofer ICT-IMM: CoPIRIDE, EU Verbundprojekt im 7. Rahmenprogramm, Newsletter. Verfügbar unter: http://www.copiride.eu/fileadmin/user_upload/User_Upload/Extract_Copiride_NL_Nr3-New_Manufacturing_Techniques.pdf (abgerufen am 11.05.2015).

CoPIRIDE (2014): Fraunhofer ICT-IMM: CoPIRIDE, EU Verbundprojekt im 7. Rahmenprogramm, Projektabschlussbericht. Verfügbar unter: <http://cordis.europa.eu/docs/results/228/228853/final1-copiride-final-report-v1-0-20140505-extract-chapter-1.pdf> (abgerufen am 11.05.2015).

de Mello (2002): A. W. de Mello, Robert: But what is it good for? Applications of microreactor technology for the fine chemical industry. *Lab on a Chip*, Vol. 2, 2002.

Degen et al. (2004): R. Degen, R. Slatter: ETG-/GMM-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik. Darmstadt 2004.

DIN 60300-3-3:2014-09 (2004): DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten. Berlin, 2004.

Ducry, Roberge (2005): L. Ducry and D. M. Roberge: Controlled Autocatalytic Nitration of Phenol in a Microreactor. *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 44, 2005.

ECOINVENT (2013): Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Ecoinvent Database Ver. 3.0. Dübendorf 2013.

F³-FACTORY (2014): Bayer Technology Services GmbH: F³-Factory, EU Verbundprojekt im 7. Rahmenprogramm, Projektzusammenfassung. Verfügbar unter: <http://www.f3factory.com/> (abgerufen am 11.05.2015).

Fenollar et al. (2009): O. Fenollar, D. García, L. Sánchez, J. López and R. Balart: Optimization of the curing conditions of PVC plastisols based on the use of an epoxidized fatty acid ester plasticizer, *Eur. Polym. J.*, Vol. 45, 2009.

Gericke et al. (2015): D. Gericke, D. Ott, V. G. Matveeva, E. Sulman, A. Aho, D. Y. Murzin, S. Roggan, L. Danilova, V. Hessel, P. Loeb and D. Kralisch: Green catalysis by nanoparticulate catalysts developed for flow processing? Case study of glucose hydrogenation. *RSC Advances*, Vol. 5, 2015.

Goedkoop et al. (2009): R. M. J. H. Goedkoop, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs, R. van Zelm: ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. 2009.

Goedkoop, Spriensma (2001): M. Goedkoop, R. Spriensma: The Eco-indicator 99 – A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. PRÉ Consultants B. V., 2001.

Grundemann et al. (2009): L. Grundemann, N. Fischer and S. Scholl: From Macro Batch to Micro-conti Manufacturing: A New Eco-Friendly Production Process for Writing Ink Employing Micro-process Engineering. *Chem. Eng. Technol.*, Vol. 32, 2009.

Grundemann et al. (2012): L. Grundemann, V. Gonschorowski, N. Fischer and S. Scholl: Cleaning waste minimization for multiproduct plants: transferring macro batch to micro conti manufacturing. *J. Cleaner Prod.*, Vol. 24, 2012.

Guinée et al. (2002): M. J. B. G. Guinée, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. de Koning, L. van Oers, A. Wegener Sleeswijk, S. Suh, H.A. Udo de Haes, H. de Bruijn, R. van Duin, M. A. J., Huijbregts: Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Dordrecht, 2002.

Guinee et al. (2011): J. B. Guinee, R. Heijungs, G. Huppes, A. Zamagni, P. Masoni, R. Buonamici, T. Ekvall and T. Rydberg: Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 45, 2011.

Henderson et al. (2007): R. K. Henderson, J. Kindervater and J. Manley: Lessons learned through measuring green chemistry performance—The pharmaceutical experience. 2007.

Hessel (2009): V. Hessel: Novel Process Windows – Gate to Maximizing Process Intensification via Flow Chemistry. *Chem. Eng. Technol.*, Vol. 32, 2009.

Hessel et al. (2005): V. Hessel, H. Löwe and F. Schönfeld: Micromixers—a review on passive and active mixing principles. *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 60, 2005.

Hessel et al. (2014a): V. Hessel, D. Kralisch and N. Kockmann: Novel Process Windows: Innovative Gates to Intensified and Sustainable Chemical Processes. Wiley, 2014.

Hessel et al. (2014b): V. Hessel, I. Dencic, D. Ott, D. Kralisch, T. Noel, J. Meuldijk, M. De Croon, Y. Laribi and P. D. Perrichon: Eco-efficiency Analysis for Intensified Production of an Active Pharmaceutical Ingredient: A Case Study. *Org. Process Res. Dev.*, Vol. 18, 2014.

IFU, IFEU (2013): ifu Institut für Umwelteinformatik, ifeu Institut fuer Energie- und Umweltforschung: Umberto NXT LCA Ver. 7.0. Heidelberg, Hamburg 2013.

- ISO 10991:2010-03 (2010):** International Organization for Standardization: DIN EN ISO 10991:2010-03 Mikroverfahrenstechnik – Begriffe (ISO 10991:2010-03). Berlin, 2010.
- ISO 14040:2006-10 (2006):** International Organization for Standardization: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Geneva, 2006.
- ISO 14040:2006-10 (2006):** International Organization for Standardization: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Geneva, 2006.
- Iverson, Garimella (2008):** B. D. Iverson and S. V. Garimella: Recent advances in microscale pumping technologies: a review and evaluation. *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 5, 2008.
- Jacquemin et al. (2012):** L. Jacquemin, P.-Y. Pontalier and C. Sablayrolles: Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review. *Int. J. Life Cycle Assess.*, Vol. 17, 2012.
- Jähnisch et al. (2004):** K. Jähnisch, V. Hessel, H. Löwe and M. Baerns: Chemie in Mikrostrukturreaktoren. *Angew. Chem.*, Vol. 116, 2004.
- Jenck et al. (2004):** J. F. Jenck, F. Agterberg and M. J. Droscher: Products and processes for a sustainable chemical industry: a review of achievements and prospects. *Green Chem.*, Vol. 6, 2004.
- Jimenez-Gonzalez et al. (2011):** C. Jimenez-Gonzalez, P. Poehlauer, Q. B. Broxterman, B.-S. Yang, D. A. Ende, J. Baird, C. Bertsch, R. E. Hannah, P. Dell’Orco, H. Noorinan, S. Yee, R. Reintjens, A. Wells, V. Massonneau and J. Manley: Key Green Engineering Research Areas for Sustainable Manufacturing: A Perspective from Pharmaceutical and Fine Chemicals Manufacturers. *Org. Process Res. Dev.*, Vol. 15, 2011.
- Jolliet et al. (2003):** O. Jolliet, M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet, G. Rebitzer and R. Rosenbaum: IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology, *Int. J. Life Cycle Assess.*, Vol. 8, 2003.

Kiwi-Minsker, Renken (2005): L. Kiwi-Minsker and A. Renken: Microstructured reactors for catalytic reactions. *Catal Today*, Vol. 110, 2005.

Klöpffer, Grahl (2009): W. Klöpffer and B. Grahl: Ökobilanz (LCA). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co kGAA, Weinheim, 2009.

KOM 571 (2011): Europäische Kommission: Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa. Brüssel 2011.

Kralisch et al. (2012): D. Kralisch, I. Streckmann, D. Ott, U. Krtschil, E. Santacesaria, M. Di Serio, V. Russo, L. De Carlo, W. Linhart, E. Christian, B. Cortese, M. H. J. M. de Croon and V. Hessel: Transfer of the Epoxidation of Soybean Oil from Batch to Flow Chemistry Guided by Cost and Environmental Issues, *ChemSusChem*, Vol. 5, 2012.

Kralisch et al. (2013a): D. Kralisch, D. Ott, S. Kressirer, C. Staffel, I. Sell, U. Krtschil and P. Loeb: Bridging sustainability and intensified flow processing within process design for sustainable future factories. *gps*, Vol. 2, 2013.

Kralisch et al. (2013b): D. Kralisch, C. Staffel, D. Ott, S. Bensaid, G. Saracco, P. Bellantoni and P. Loeb: Process design accompanying life cycle management and risk analysis as a decision support tool for sustainable biodiesel production. *Green Chem.*, Vol. 15, 2013.

Kralisch, Kreisel (2007): D. Kralisch and G. Kreisel: Assessment of the ecological potential of microreaction technology. *Chem. Eng. Sci.* Vol. 62, 2007.

Laser, Santiago (2004): D. J. Laser and J. G. Santiago: A review of micropumps. *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, 2004.

Ley (2012): S. V. Ley: On Being Green - Can Flow Chemistry Help? *Chem. Rec.*, Vol. 12, 2012.

Newman, Jensen (2013): S. G. Newman and K. F. Jensen: The role of flow in green chemistry and engineering. *Green Chem.*, Vol. 15, 2013.

Ott et al. (2014): D. Ott, D. Kralisch, I. Denlic, V. Hessel, Y. Laribi, P. D. Perrichon, C. Berguerand, L. Kiwi-Minsker and P. Loeb: Life Cycle Analysis within Pharmaceutical Process

Optimization and Intensification: Case Study of Active Pharmaceutical Ingredient Production. ChemSusChem, Vol. 7, 2014.

Peschke et al. (2014): F. S. H. Peschke, J. Heck, O. F.-K. Schlüter: Scale-up and Optimization of a Micro Mixer for the Production of Solids in Industrial Applications. RSC Symposium Continuous Flow Technology in Industry II, Cambridge UK 17 - 19.03.2014.

Potting et al. (2004): J. Potting and M. Z. Hauschild: Background for spatial differentiation in life cycle impact assessment. The EDIP2003 methodology. Report Environmental Project No. 996, Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, 2004.

Roberge et al. (2005): D. M. Roberge, L. Ducry, N. Bieler, P. Cretton and B. Zimmermann: Microreactor Technology: A Revolution for the Fine Chemical and Pharmaceutical Industries? Chem. Eng. Technol., Vol. 28, 2005.

Roberge et al. (2008): D. M. Roberge, B. Zimmermann, F. Rainone, M. Gottspöner, M. Eyholzer and N. Kockmann: Microreactor Technology and Continuous Processes in the Fine Chemical and Pharmaceutical Industry: Is the Revolution Underway? Org. Process Res. Dev., Vol. 12, 2008.

Sell et al. (2013): I. Sell, D. Ott and D. Kralisch, Chem. Ing. Tech.: Lebenszykluskostenanalyse zur Entscheidungsunterstützung in der chemischen Prozessentwicklung. Vol. 85, 2013.

Sheldon (1994): R. A. Sheldon: Consider the environmental quotient. CHEMTECH, Vol. 24, 1994.

Sheldon (2007): R. A. Sheldon, Green Chem., Vol. 9, 2007.

Singhal, Garimella (2004): V. Singhal, S. V. Garimella and A. Raman: Microscale pumping technologies for micro-channel cooling systems. Appl. Mech. Rev., Vol. 57, 2004.

SYNFLOW (unbek.): DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.: SYNFLOW, EU Verbundprojekt im 7. Rahmenprogramm. Verfügbar unter: <http://www.synflow.eu/> (abgerufen am 11.05.2015).

Van der Vorst et al. (2013): G. Van der Vorst, W. Aelterman, W. B. De, B. Heirman, L. H. Van and J. Dewulf: Reduced resource consumption through three generations of Galantamine-HBr synthesis. *Green Chem.*, Vol. 15, 2013.

VDI 2884:2005-12 (2005): Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie: VDI 2884 Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). Düsseldorf 2005.

VDI 4600:1997-06 (1997): Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie: VDI 4600 Kumulierter Energieaufwand (KEA). Düsseldorf 1997.

VDI 4800 Blatt 1:2014-07 (Entwurf) (2014): Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie: VDI-Richtlinie: VDI 4800 Blatt 1 Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Düsseldorf 2014.

VDMA 34160:2006 (2006): Verband Deutscher Maschinen-und Anlagenbau e. V.: VDMA Einheitsblatt 34160 – Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen. Frankfurt am Main 2006.

Watson (2012): W. J. W. Watson: How do the fine chemical, pharmaceutical, and related industries approach green chemistry and sustainability? *Green Chem.*, Vol. 14, 2012.

Wegner et al. (2012): J. Wegner, S. Ceylan and A. Kirschning: Flow Chemistry – A Key Enabling Technology for (Multistep) Organic Synthesis. *Adv. Synth. Catal.*, Vol. 354, 2012.

Wernet et al. (2010): G. Wernet, S. Conradt, H. P. Isenring, C. Jimenez-Gonzalez and K. Hungerbuehler: Life cycle assessment of fine chemical production: a case study of pharmaceutical synthesis. *Int. J. Life Cycle Assess.*, Vol. 15, 2010.

West et al. (2008): A. H. West, D. Posarac and N. Ellis: Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS.Plant, *Bioresource Technol.*, Vol. 99, 2008.

Wörz et al. (2001): O. Wörz, K. P. Jäckel, T. Richter and A. Wolf: Microreactors, a new efficient tool for optimum reactor design. *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 56, 2001.

Wübbenhorst (1987): K. L. Wübbenhorst: Long Range Planning. Vol. 19, 1987.

Yaseneva et al. (2015): P. Yaseneva, D. Plaza, X. Fan, K. Loponov and A. Lapkin: Synthesis of the antimalarial API artemether in a flow reactor. Catal. Today, Vol. 239, 2015.

Yokota (2014): S. Yokota: A review on micropumps from the viewpoint of volumetric power density. Mechanical Eng. Rev., Vol. 1, 2014.

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

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE