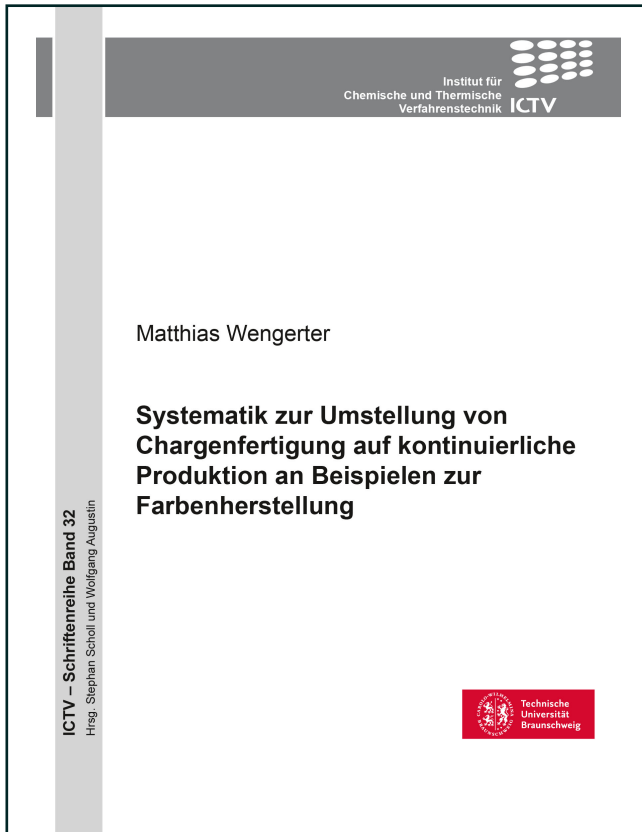




Matthias Wengert (Autor)
**Systematik zur Umstellung von Chargenfertigung auf
kontinuierliche Produktion an Beispielen zur
Farbenherstellung**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8068>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

In der chemischen und pharmazeutischen Industrie finden in der Praxis traditionell absatzweise Prozesse, sogenannte Chargenprozesse oder Batchverfahren, Anwendung. Dies ergibt sich aus der geschichtlichen Entwicklung, da Verfahren üblicherweise zunächst chargenweise mit Volumina in der Größenordnung eines Becherglases oder Erlenmeyerkolbens entstehen. Die Arzneimittelforschung setzt auf Titerplatten zum Screening erfolgversprechender Wirkstoffmoleküle im nochmals kleineren Submillilitermaßstab. Die entwickelten Verfahren werden anschließend unter Beibehaltung der diskontinuierlichen Betriebsweise in größere Maßstäbe im Bereich einiger m^3 je Ansatz überführt. Neben der absatzweisen Betriebsweise existieren noch die kontinuierlichen Verfahren und Mischungen aus beiden, die Hybridverfahren. Die Anwendung der unterschiedlichen Betriebsweisen bringt jeweils eine Reihe von prinzipbedingten Vorteilen und Nachteilen mit sich.

Wie durch das einleitende Zitat angedeutet, macht der Wandel auch vor der chemischen und pharmazeutischen Industrie nicht Halt. Oftmals wird erwartet, eine Verbesserung des Gesamtprozesses durch Umstellung der Betriebsweise von absatzweisem auf kontinuierlichen Betrieb erreichen zu können. Die Identifikation der Ansatzpunkte und eine Bezifferung des möglichen Verbesserungspotentials gestalten sich in der Praxis schwierig und unübersichtlich. Eine diesbezügliche, unstrukturierte Herangehensweise wird sich als hoffnungsloses Unterfangen erweisen. Die zu beantwortende Kernfrage lautet, ob und wann sich die Umstellung auf kontinuierliche Produktionsweise (gerade noch) lohnt. Dabei handelt es sich nicht nur um eine ökonomische Fragestellung, auch weitere Aspekte sind zu beachten. Die Wahl dieser Kriterien, welche zur Ermittlung der Antwort auf die Kernfrage untersucht werden und in eine Entscheidung einfließen, hängt von Prozess, Produkt und Branche ab.

Durch das Thema der Prozessumstellung werden in der feinchemischen, pharmazeutischen und biopharmazeutischen Industrie viele bisher unbeantwortete Fragen hinsichtlich der geeigneten Vorgehensweise aufgeworfen. Daher ist die Umstellung von Batch- auf Kontiproduktion in der Praxis bisher eher selten zu finden [1] und die Verfügbarkeit von industriell angewandten Beispielen stark limitiert [2]. Zur systematischen Untersuchung und finalen Beantwortung der in der industriellen Praxis relevanten Kernfrage nach machbarer sowie lohnswerter Umstellung existiert bisher keine allgemein gültige Handlungsempfehlung. Diese Arbeit setzt sich zum Ziel, eine strukturierte Vorgehensweise zur Evaluation der Prozessumstellung zu entwickeln und Antworten auf die folgenden Fragen zu finden:

- Was muss eine allgemein gültige, strukturierte Vorgehensweise zur systematischen Evaluation der Umstellung der Prozessbetriebsweise beinhalten?
- Welche Kriterien existieren zur Überprüfung der grundsätzlichen Eignung eines Verfahrens zur Umstellung auf kontinuierlichen Betrieb?
- Ist eine Umstellung der Prozessbetriebsweise auf ein kontinuierliches Verfahren im jeweils konkreten Fall erreichbar und wann erscheint sie lohnenswert?
- Wie gelingt es, bei der Prozessumstellung auftretende Risiken zu identifizieren und Gegenmaßnahmen einzuleiten?
- Wie sind die relevanten Aspekte und Einflussfaktoren auf eine Entscheidung definiert?

Zur Lösung dieser Aufgabe ist die Arbeit in die folgenden Kapitel unterteilt: Kapitel 1 leitet durch Erläuterung der Motivation und der Ziele in die Thematik ein. In Kapitel 2 findet sich die Präsentation des aktuellen Wissensstands in der Literatur. In den Unterkapiteln werden die alternativen Betriebsweisen von Prozessen beschrieben, grundsätzliche Überlegungen zur Umstellung auf kontinuierliche Produktion diskutiert und das hier behandelte Thema, begleitet von Beispielen bereits erfolgter Prozessumstellungen, fachlich eingegliedert. Anschließend erfolgt

in Kapitel 3 die Einführung der zur Illustration der Systematik verwendeten Beispielprozesse, bevor in Kapitel 4 die entwickelte, allgemein gültige Methodik vorgestellt wird. In den zugehörigen Unterkapiteln werden Möglichkeiten zur Identifikation für den kontinuierlichen Betrieb geeigneter Prozesse präsentiert, ein kurzer Überblick über die Eigenschaften der Methodik gegeben und diese anschließend im Detail erläutert. Zuletzt werden die Vor- und Nachteile der Methodik diskutiert und Anhaltspunkte zur weiteren Detaillierung gegeben. Die praktische Anwendung der Methodik auf die Beispielprozesse wird in Kapitel 5 gezeigt. Kapitel 6 beschließt die Arbeit durch eine Zusammenfassung der Ergebnisse und einen Ausblick auf weitere Forschungsfelder.

2

Stand des Wissens

In diesem Kapitel wird der Stand des Wissens dargelegt. Zunächst werden in Abschnitt 2.1 die unterschiedlichen Betriebsweisen von verfahrenstechnischen Prozessen erläutert und im anschließenden Abschnitt 2.2 grundsätzliche Überlegungen zur Umstellung der Betriebsweise auf kontinuierliche Produktion angestellt. Diese umfassen die mit der Umstellung verfolgten Ziele und weitere Aspekte der Prozessumstellung, spezielle Anforderungen an kontinuierlichen Prozessbetrieb sowie Hindernisse und Hemmnisse während der Prozedurdurchführung. Die thematische Eingliederung des hier behandelten Themas schließt sich im Abschnitt 2.3 an. Danach folgt eine Vorstellung einer Reihe von Literaturbeispielen bereits erfolgter Prozessumstellungen aus verschiedenen Teildisziplinen in Abschnitt 2.4. Abschnitt 2.5 thematisiert Aspekte der ökonomischen und ökologischen Bewertung von Produktionsprozessen. Zuletzt wird in Abschnitt 2.6 auf die in der Literatur bereits veröffentlichten Methodiken zur Prozessumstellung eingegangen. Mit der vergleichenden Einordnung dieser Arbeit im Kontext der existierenden Publikationen endet der Abschnitt.

2.1 Betriebsweisen verfahrenstechnischer Prozesse

Dieser Abschnitt beschreibt die grundsätzlichen Betriebsweisen verfahrenstechnischer Prozesse, welche in der chemischen und pharmazeutischen Industrie Anwendung finden. Zunächst werden die sehr häufig eingesetzten absatzweisen Produktionsverfahren in Unterabschnitt 2.1.1 erläutert. Kontinuierliche Prozessvarianten behandelt Unterabschnitt 2.1.2. Unterabschnitt 2.1.3 charakterisiert Hybridprozesse, die sich durch eine Kombination der beiden Betriebsweisen auszeichnen.

2.1.1 Absatzweise Produktion

Für absatzweise betriebene Prozesse existieren verschiedene Bezeichnungen, darunter Chargenprozesse, Batchverfahren sowie diskontinuierliche oder (ab)satzweise Produktion. Ihnen allen ist gemein, dass sich das damit beschriebene Verfahren auf ein räumlich definiertes Volumen bezieht und prozessabhängige Vorgänge in diesem ablaufen. Der chargenweise Betrieb wird in industriellen Herstellverfahren sehr häufig eingesetzt [3]. Für Produkte mit hoher Wertschöpfung und Prozesse, bei denen der Materialeinsatz den Hauptteil der Kosten verursacht, sind sie erste Wahl [4]. Aufgrund von kurzen Produktlebenszyklen, geringen Nachfragemengen und hohen einzuhaltenden Standards werden viele Prozesse traditionell absatzweise betrieben. Dies betrifft vor allem die Fein- und Spezialitätenchemie und die pharmazeutische Industrie [5]. Zur Bedienung großer Marktnachfrage feinchemischer und pharmazeutischer Industrieprodukte erfolgt deren Herstellung meist in Batchreaktoren mit typischer Weise einigen Kubikmetern Inhalt [6].

Das Prinzip dieser Betriebsweise lässt sich anhand eines praktischen Alltagsbeispiels, der Herstellung von Broten im heimischen Ofen, verbildlichen. Zu Beginn wird der Teig mit Hilfe einer Küchenmaschine vorbereitet und anschließend in der Schüssel ruhen lassen. Zu gegebener Zeit wird der Ofen vorgeheizt und die auf einem Backblech angeordneten Teigrohlinge nach Erreichen der Solltemperatur darin gebacken. Sind die Brote fertig, werden sie aus dem Ofen herausgeholt und vom Blech genommen. Erst nach einer Reinigung können die Küchenmaschine mit Knethaken und Schüssel zur Teigherstellung sowie das Backblech zur Bestückung mit Teigrohlingen erneut verwendet und der Prozess wiederholt werden. Nach Ausschalten des Ofens am Ende der Brötchenproduktion kühlt dieser ab.

Anhand dieses einfachen Beispiels eines Chargenprozesses lassen sich eine Reihe an Vor- und Nachteile der Betriebsweise identifizieren. Tabelle 2-1 beschreibt diese und zeigt die Parallelen zum Alltagsbeispiel.

Tabelle 2-1: Eigenschaften eines Chargenprozesses und Illustration anhand eines Alltagsbeispiels.

Eigenschaft Chargenprozess	Beispiel <i>Brot backen</i>
<p>Mengenflexibilität: Die je Charge herzustellende Menge ist flexibel und nur nach oben durch die maximale Kapazität des eingesetzten Equipments limitiert. Dies erlaubt die Produktion von Teilmengen und sorgt dafür, dass keine Überschussmengen zwischengelagert werden müssen [7, 8].</p>	<p>Vorbereitung einer mehrfachen Rezepturmenge an Brotteig und anschließendes Backen der Rohlänge im Ofen.</p>
<p>Produktflexibilität: Das herzustellende Produkt lässt sich nach jeder einzelnen Charge und anschließender Reinigung kurzfristig wechseln, indem beispielsweise eine veränderte Rohstoffmischung zum Einsatz kommt. Gleichzeitig erlaubt dies eine Anpassung der Prozessparameter. Jedoch hat die Verwendung des immergleichen Equipments für verschiedene Produkte zur Folge, dass die Prozesse an die vorhandene Ausrüstung angepasst werden und sie somit nicht unbedingt am optimalen Betriebspunkt laufen. Dies wiederum kann unter Umständen in erhöhtem Bedarf an Prozesszeit und Arbeitsaufwand resultieren [3, 4, 9].</p>	<p>Verwendung von Roggenmehl nach Backen eines Weizenmehlbrottes bei anderer Temperatur und Dauer.</p>
<p>Definiertes Volumen und Verweilzeit: Sofern die Prozessparameter der Rezeptur eingehalten werden, unterliegen alle Inhalte im Prozessvolumen einer genau definierten Verweilzeit je Apparat. Gewünschte oder unerwünschte Schwankungen der Verweilzeit treten nur durch aktives Eingreifen oder das Unterlassen weiterer Schritte durch den Bediener auf. Die Produktqualität kann somit bedienerabhängig variieren und nicht nur zufälligen Einflüssen unterworfen sein. Ein Vorteil von Chargenprozessen ist es, dass sich durch Belassen der Einsatzstoffe im Prozessvolumen beinahe beliebig lange Verweilzeiten unter definierten Bedingungen realisieren lassen. Ebenso ist der Einsatz von Stoffen verschiedener Aggregatzustände im Allgemeinen unproblematisch. Im selben Prozessbehältnis ist es beispielsweise bei der Durchführung von biologischen Prozessen ohne Weiteres möglich, in flüssiger Nährlösung schwebende, als Feststoffe zu betrachtende Mikroorganismen mit gasförmig zugeführtem Luftsauerstoff zu versorgen [3].</p>	<p>Der vorbereitete Teig kann so lange wie nötig in der Schüssel gehen. Alle Brote auf demselben Backblech werden gleich lange im Ofen gebacken.</p>
<p>Fehlchargen und Chargenintegrität: Für den Fall, dass das Produkt nicht den Spezifikationen der Rezeptur entspricht, lässt sich dies auf eine bestimmte Charge und somit eine definierte Produktmenge eingrenzen. Gegebenenfalls ist es möglich, diese nachzubearbeiten, um die Spezifikationen doch noch zu erfüllen, oder die verwendeten Rohstoffe erneut in späteren Prozesschargen zu verarbeiten. Manchmal stellt sich heraus, dass eine Produktcharge final nicht den Anforderungen entspricht und zu entsorgen ist. Bei Batchverfahren ist es daher als Vorteil zu nennen und als Sicherheitsmerkmal zu werten, dass</p>	<p>Misslingt ein Teigansatz oder ein Blech mit Broten, so hat dies keine Auswirkungen auf die nachfolgenden. Je Brot kann genau angegeben werden, welche Packung Mehl</p>

<p>dabei vorhergehende oder nachfolgende Chargen nicht zwangsläufig ebenfalls betroffen sind, sofern es sich nicht um einen systematischen Fehler handelt. Die Eingrenzung auf definierte Mengen bedeutet ebenfalls die Gegebenheit vollständiger Rückverfolgbarkeit. Das bedeutet, dass eine nachträgliche Angabe, in welche Produktchargen bestimmte Rohstofflieferungen verarbeitet wurden, möglich ist [4, 7].</p>	<p>zur Teigherstellung verwendet wurde.</p>
<p>Einfaches Equipment mit vergleichsweise großen Apparaten: Wie kein anderer Apparat steht ein Standardgerät, der multifunktionelle Rührkessel, stellvertretend für in Chargenprozessen zum Einsatz kommende Gerätschaften. In diesem finden Misch- und Reaktionsprozesse statt und die Ausführung mit Doppelmantel erlaubt die Temperierung durch Kühlen oder Heizen, bis hin zur Trocknung seines Inhalts. Einfache und bewährte Technik ermöglicht meist störungsfreie Produktion und lange Standzeiten der Ausrüstung. Ein Wechsel des Equipments ist zwischen den Chargen durch Austausch individueller Gerätschaften problemlos möglich. Die eingesetzten Apparate sind in der Regel kostengünstig, da es sich oft um standardisiertes Equipment handelt. Hohe Kosten fallen an, wenn Sonderformen mit ungewöhnlicher Materialauswahl oder Apparate mit großen Abmaßen anzufertigen sind. Das große Verhältnis von Volumen zu Oberfläche wirkt sich nachteilig auf die Effizienz von Wärme- und Stoffübertragungsprozessen aus, sodass oft lange Verweilzeiten einzuhalten sind. Ebenso sorgt das große, vom Anlageninhalt genutzte Volumen, der sogenannte Hold-up, beim Einsatz von Rührorganen für Ineffizienzen bei der Nutzung der Mischenergie aufgrund von ungezieltem Energieeintrag und damit verbundenen Dissipationseffekten [3].</p>	<p>Mit der Küchenmaschine ist es möglich, Brot- und Kuchenteige sowie weitere Waren zuzubereiten. Austauschbare, zugehörige Rührschüsseln erlauben es, weitere Teigansätze zu fertigen, während vorherige noch in anderen Schüsseln ruhen.</p>
<p>Zeitliche Abfolge und energetische Kopplung: Die zu durchlaufenden Schritte bei Chargenprozessen sind exakt definiert und deren zeitliche Abfolge unbedingt einzuhalten. Je nach Stabilität der Zwischenprodukte ist es möglich, zwischen den Prozessschritten Pausen einzulegen oder halbfertige Produkte auf Lager zu legen. Um das finale Produkt zu erhalten, müssen dennoch alle Schritte durchlaufen werden. Andernfalls ist eine Aufarbeitung oder gar eine Entsorgung der unvollendeten Charge nötig. Da Chargenprozesse meist nur auf einzelnen, eigenständigen Anlagen betrieben werden, fallen die Zeitpunkte von insbesondere thermischem Energiebedarf und -überschuss aufgrund der zeitlichen Schrittfolge auseinander. In diesen Fällen ist es erforderlich, benötigte Wärmeenergie beispielsweise durch Heißdampf extern bereitzustellen bzw. überschüssige Reaktionswärme durch Kühlwasser abzuführen. Eine Speicherung der verfügbaren Energiemengen, etwa zur Verwendung für die nachfolgende Charge, ist meist nicht möglich oder zumindest nicht wirtschaftlich [3].</p>	<p>Zuerst werden die Inhaltsstoffe in den benötigten Mengen abgewogen, bevor der Teig zubereitet wird. Im Anschluss kann dieser gebacken werden. Die nach dem letztmaligen Backen überschüssige Wärme im Ofen kann nicht verwendet werden, um den Ofen am nächsten Tag vorzuheizen.</p>

<p>Reinigung: Die Reinigung der eingesetzten Apparate und Rohrleitungen ist in der Regel nach jeder Charge durchzuführen und wird oft händisch erledigt. Produktreste in den Anlagenteilen werden im Zuge der Reinigung entfernt und sind als Materialverluste zu bilanzieren. Abhängig vom Produkt und dessen Eigenschaften kann zwischen zwei Chargen eine Kurzreinigung durchgeführt und die Anlage erst beim Abschalten und Überführung in längeren Stillstand endgereinigt werden. Der mit einem Reinigungsvorgang verbundene, absolute Aufwand hinsichtlich Reinigungsmitteln, Zeitdauer und Personaleinsatz ist weitgehend unabhängig von der hergestellten Produktmenge. Dies bedeutet, dass die auf die Produktmenge bezogenen Reinigungsaufwände umso größer werden, je kleiner die herzustellende Teilmenge im Vergleich zum Regelfall ist. Ebenfalls nicht zu vernachlässigen ist der Umgang mit und die Entsorgung von aggressiven Reinigungsmitteln wie Säuren, Basen und organischen Lösungsmitteln [8, 9].</p>	<p>Nach jeder Teigzubereitung ist es erforderlich, die Rührschüssel und Rührer händisch unter Einsatz von Wasser und Spülmittel zu reinigen. An den Geräten haftende Teigreste werden als Materialverluste mit dem Spülwasser entsorgt.</p>
<p>Bedienpersonal: Chargenprozesse sind oft sehr personalintensiv. Nicht nur zur Reinigung, sondern auch zur Prozessvorbereitung und -durchführung werden Bediener benötigt. Vor Beginn sind oft alle benötigten, beweglichen Apparate an den Einsatzort zu verbringen. Die einzusetzenden Rohstoffmengen müssen abgewogen und ebenfalls zur Anlage gebracht werden. Während des laufenden Prozesses steuert das Bedienpersonal die Operationen und kontrolliert die Prozessparameter. Es sorgt gegebenenfalls durch Nachjustierung für deren Einhaltung, gibt Folgeschritte frei, bestätigt und beseitigt Störungen. Nach Durchlaufen sämtlicher Prozessschritte erfolgt die Reinigung der Anlagenteile und anschließendes Einlagern nicht mehr benötigter Geräte. Während der genannten Schritte ist das Personal in Abhängigkeit der erforderlichen Nähe zum Prozess mit oft umfangreicher persönlicher Schutzausrüstung ausgestattet. Vom Personal ist durchgängig hohe Aufmerksamkeit und Konzentration gefordert, da bereits kleine Unachtsamkeiten große Auswirkungen auf das Gelingen einer Chargenproduktion haben können [3].</p>	<p>Alle Schritte erfolgen händisch: Von der Zugabe der Zutaten über Geschwindigkeitskontrolle und Stopp der Rührer sowie der Portionierung der Rohlinge auf dem Blech bis hin zur Prüfung und Entnahme des fertigen Brotes und anschließender Reinigung der verwendeten Küchengeräte.</p>

Chargenprozesse, bei denen im Betriebsverlauf Rohstoffe stoßweise oder fortlaufend zudosiert werden, nennen sich Fedbatch- oder Semibatchverfahren. Sie finden beispielsweise dort Verwendung, wo in Reaktionsprozessen einzelne Komponenten im Überschuss vorgelegt werden, um eine schlagartige Energiefreisetzung aufgrund der Umsetzung mit anderen Stoffen zu vermeiden [10]. Ein anderer Anwendungsfall ist die Nährstoffzufuhr für Mikroorganismen in biochemischen Prozessen [11].

Als Richtwert für die Produktionskapazität, unterhalb derer beinahe ausschließlich Batchverfahren Anwendung finden, gibt die Literatur 500 t a^{-1} an [7]. Diese Grenze ist aufgrund aktueller Entwicklungen und der Verfügbarkeit neuerer Technologien nicht als unverrückbare, harte Grenze zu sehen, sondern mittlerweile in Frage gestellt [12].

Der Vorteil der Flexibilität bei der Fertigung verschiedener Produkte mit kleinen Jahreskapazitäten in einer einzigen Anlage unter Einsatz derselben Ausrüstung ist der Hauptgrund dafür, dass auch die damit einhergehenden, teils gravierenden Nachteile in Kauf genommen werden [3]. Oft werden diese Batchprozesse seit Jahren unverändert betrieben, sodass ungenutzte Energieeinsparpotentiale aufgrund technologischer Neuerungen vorhanden sind. Abhilfe bei mehreren dieser genannten Nachteile schafft der Einsatz kontinuierlicher Prozesse. Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die zugehörige Betriebsweise.

2.1.2 Kontinuierliche Verfahren

Kontinuierliche Verfahren werden seit Jahrzehnten zur profitablen Herstellung hochvolumiger Produkte der Petrochemie und Nahrungsmittelindustrie eingesetzt [13]. Kirschnack und Huss [14] geben an, dass die 30 wichtigsten petrochemischen Erzeugnisse und die meisten der 300 wichtigsten organischen Chemikalien kontinuierlicher Fertigung entstammen. Auf den Rängen mit geringeren Volumina findet jedoch in über 90 % der Fälle die absatzweise Produktion Anwendung. Charakteristisch für die kontinuierlichen Prozesse ist die andauernde, zeitgleiche Zugabe von Rohstoffen und Entnahme von End- sowie Nebenprodukten unter Zu- oder Abfuhr von Energie. Die im absatzweisen Betrieb festgelegte zeitliche Abfolge der Prozessschritte wird bei kontinuierlichen Prozessen durch Varianz des Ortes abgebildet: Wie der Vergleich mit absatzweiser Herstellung in Abbildung 2-1 zeigt, finden prinzipbedingt alle einzelnen Operationen gleichzeitig statt, jedoch an unterschiedlichen Stellen in der Anlage.

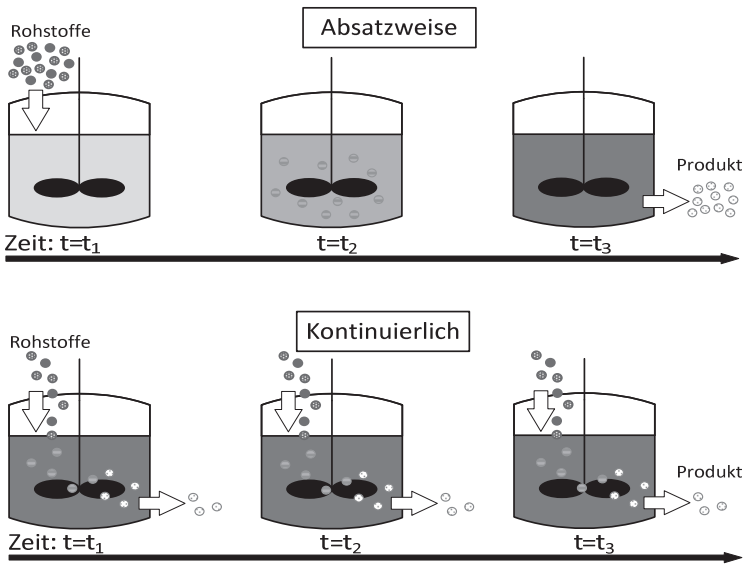


Abbildung 2-1: Prinzipvergleich zwischen absatzweiser und kontinuierlicher Herstellweise (angelehnt an [15]).

Zu Beginn des kontinuierlichen Anlagenbetriebs werden die Prozessparameter während der instationären Anlaufphase hin zu ihren Sollwerten geführt. Dies umfasst beispielsweise die Temperaturänderungen des Anlagenmaterials aufgrund von Heiz- oder Kühlströmen, welche die Komponenten ab Prozessstart durchfließen. Der Regelfall des kontinuierlichen Betriebs ist der stationäre Betrieb im Anschluss. Während diesem bleiben alle Prozessparameter bis auf kleine Abweichungen zeitlich konstant [2]. Nach Erreichen dieses stabilen Betriebspunkts sorgt ein Regelsystem bis zum Abschalten und Reinigen der Anlage dafür, dass sich die Prozessparameter auf möglichst konstantem Niveau innerhalb zulässiger Grenzen bewegen.

Im Jahr 2009 schätzte Federsel [16], dass etwa 10 - 20 % der Prozesse in der feinchemischen und pharmazeutischen Industrie in kontinuierlichem Betrieb stattfinden. Diese stellen die Basis der petrochemischen und grundchemischen Industrie dar, in der starker Wettbewerb, strikte Umwelt- und Sicherheitsbestimmungen und niedrige Profitmargen die Notwendigkeit hocheffektiver, wirtschaftlicher, sicherer und atomeffizienter Chemieprozessen begründen. Im Gegensatz zur grundchemischen Industrie, welche Basischemikalien herstellt, setzt die feinchemische Industrie allerdings primär auf die existierende Infrastruktur von Mehrzweckbatch- oder Semi-batchreaktoren [5]. Die Grenze der Produktionskapazität für Verfahren, ab der üblicherweise nur noch kontinuierlicher Betrieb Anwendung findet, liegt bei 5.000 t a^{-1} [7]. Manche der im vorhergehenden Abschnitt genannten Nachteile der absatzweisen Herstellung lassen sich durch Umstellung der Betriebsweise auf kontinuierliche Produktion verbessern. Dabei ergeben sich die im Folgenden erläuterten Eigenschaften für den kontinuierlichen Betrieb verfahrenstechnischer Prozesse.

Wie bei absatzweisem Betrieb kann jedes einzelne Ausrüstungsteil zur selben Zeit nur in genau einem Prozess Verwendung finden. Aufgrund der Dauerbelegung ist es zur zeitgleichen Durchführung mehrerer Verfahren daher erforderlich, mehrfach benötigte Ausrüstungsteile in entsprechender Anzahl zu beschaffen. Dies führt dazu, dass kontinuierliche Prozesse meist in einer dedizierten Anlage realisiert werden. Anders als im Fall des absatzweisen Betriebs ist eine Produktflexibilität der Einzelanlagen dann nicht gegeben. Hinsichtlich der Variabilität des Durchsatzes besteht ebenfalls nur geringer Spielraum, da kontinuierlich arbeitende Anlagen auf einen bestimmten Betriebspunkt bzw. Lastbereich ausgelegt und optimiert sind. Eine Abweichung davon geht immer mit einer Verschlechterung der Gesamteffizienz einher.

Durch Verlagerung der zeitlichen Dimension der Prozessschritte auf die örtliche Dimension wirkt es sich bei kontinuierlichen Anlagen vorteilhaft und sicherheitstechnisch positiv aus, dass deren Anlageninhalt meist geringer ausfällt als bei absatzweisem Betrieb in Rührkesseln. Bei der Anlagenplanung minimierte Totvolumina reduzieren das Gefahrstoffvolumen zusätzlich, sodass kontinuierliche Prozesse ihren absatzweisen Entsprechungen diesbezüglich überlegen sind [4, 13, 17].

Im Gegensatz zum absatzweisen Betrieb ist es bei kontinuierlichen Prozessen nicht möglich, eine genaue Verweilzeit für jedes Molekül anzugeben. In der Regel muss die Durchmischungs- und Verweilzeitcharakteristik kontinuierlich betriebener Anlagen experimentell ermittelt werden, vor allem in kritischen Fällen. Denn es ist aufgrund von Rückvermischungseffekten oder zeitweiser Ablagerung nicht mit Sicherheit vorhersagbar, wie lange sich ein einzelnes Teilchen in der Anlage aufhält. Dies wirkt sich insbesondere negativ auf die Rückverfolgbarkeit der verwendeten Rohstoffchargen bis in das Endprodukt aus. Aus dem gleichen Grund erweist sich die Bestimmung der betroffenen Produktmenge im Störfall als nicht trivial. Hier