Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *131 (2017), 131–146*

Klaus Hartmann

Technologie und Prozesstechnik – im Spannungsfeld von Industrie 4.0

Abstract

Die Veränderungen in der Produktionssphäre werden unter dem Begriff Industrie 4.0 zusammengefasst. Sie haben zum Ziel, die industrielle Produktion verstärkt mit Informations- und Kommunikationstechnik zu modernisieren, z.B. über Digitalisierung und Vernetzung. Das hat jedoch nicht zu einer Erhöhung der Arbeitsproduktivität geführt, im Gegenteil sinkt die Arbeitsproduktivität, so dass bezweifelt werden muss, ob Industrie 4.0 das Potential einer 4. Industriellen Revolution besitzt.

Innovationen auf allen Ebenen der Prozessindustrien sind die Grundlage für neue und hocheffektive Prozesse. Zur Intensivierung der Prozessindustrien werden Prinzipien und Gesetze der Grundlagenwissenschaften genutzt. Im Beitrag wird eine Innovation für Stofftrennprozesse vorgestellt, z.B. für die Entfernung von Kohlendioxid aus Rauchgasen, der Trocknung von Erdgas u.a., die einen wichtigen Beitrag zur Optimierung der Stofftrennung, dem Umweltschutz und zur Reduzierung des Ausrüstungsaufwands leisten kann.

Tendenzen und Probleme der modernen Technologien

Die Technologie hat sich aus „Sammlungen von Faktenwissen“ über Verfahren zur Herstellung unterschiedlichster Produkte zu einer Wissenschaft entwickelt, die auf komplexe Weise Grundlagenwissenschaften, technische Wissenschaften, Ökonomie und Ökologie verbindet und Grundlage für alle modernen Industriezweige geworden ist. Der gesamte Lebenszyklus der Produktionsprozesse und der Produkte selbst ist Gegenstand der Technologie geworden. Prozesssysteme und deren Hierarchien sowie die Modelle der Prozesse sind wichtige Elemente zur Beschreibung und Gestaltung optimaler industrieller Produktionsprozesse.

Die mit der Einführung von Rechnern verbundene umfassende Automatisierung der Produktionsprozesse, der Einsatz von Robotern in Fertigungsprozessen und die durch Digitalisierung freigesetzten Systemeffekte haben es ermöglicht, massenhaft und kostengünstig informationsverarbeitende Geräte und Ausrüstungen herzustellen, die nicht nur das gesamte Leben der Mensch-

heit verändert haben, z.B. die Mikroelektronik und das Internet, sondern auch auf die industriellen Prozesse und Verfahren selbst zurück wirken. So werden Apparate und Ausrüstungen auf 3D-Druckern hergestellt, durch die Entschlüsselung des Humangenoms 2003 und das Personal Genome Project, das allen Menschen Zugang zu ihrem Genotyp verschaffen wird, verändert sich die Medizin, das Gesundheitswesen, die pharmazeutische Industrie und es entwickelt sich die personalisierte Pharmakotherapie.

Die Veränderungen in der Produktionssphäre, die diese Vorgänge begleiten und ermöglichen, werden unter dem Begriff Industrie 4.0 zusammengefasst.

Die Grenzen zwischen den Prozessindustrien, d.h. der Stoffwirtschaft, der Energiewirtschaft, den Fertigungsindustrien und der Informationstechnik und anderen Industrien verschwinden zunehmend (Industriekonvergenz) und es werden neue Synergieeffekte ermöglicht – z.B. für die Energiespeicherung und Elektromobilität. Es entwickeln sich aber auch neue „emerging technologies“ – aufstrebende Technologien, Life Sciences (Lebenswissenschaften) und Nanotechnologie stehen dafür. Neue Anwendungsfelder werden wie die Künstliche Intelligenz, Big Data u.a. verstärkt erschlossen. Während diese Methoden, wie Fuzzy computing, neuronale Netze und Waveletanalyse bisher meist für technische Zwecke benutzt wurden, spielen sie jetzt eine zentrale Rolle in der Gesichtserkennungssoftware der Sicherheitsdienste.

Interessanterweise haben diese Veränderungen der Produktionssphäre nicht zu einer Erhöhung der Arbeitsproduktivität geführt. Im Gegenteil, seit Ende der 1990er-Jahre sinkt die Arbeitsproduktivität weltweit (siehe Abb. 1). Damit stellt sich auch die Frage, ob die jetzt stattfindenden Veränderungen und Industrie 4.0 das Potential einer 4. Industriellen Revolution besitzen.

Außerdem führt das Missverhältnis zwischen vorhandenen und geforderten Qualifikationen der wissensbasierten Gesellschaften auf dem Arbeitsmarkt zu beträchtlichen Arbeitsproduktivitäts- und Unternehmensinvestitionsverlusten – hauptsächlich durch Über- und Unterqualifizierung der Beschäftigten (vgl. OECD 2016, S. 25). Diskutiert wird in diesem Zusammenhang, ob ein Hochschulstudium von über 50% eines Jahrgangs tatsächlich zu qualitativen Veränderungen der wissensbasierten Gesellschaft und zu höherer Arbeitsproduktivität führen wird.

Der rationale Kern von Industrie 4.0 hat das Ziel, die industrielle Produktion verstärkt mit Informations- und Kommunikationstechnik zu modernisieren, z.B. über Digitalisierung und Vernetzung. Das setzt aber auch Innovationen in die Produktionssysteme selbst – der Prozesse und Anlagen voraus. Die derzeit 7,3 Milliarden Mobilfunkanschlüsse werden dazu nicht ausreichen – auch wenn es in fünf Jahren mehr als neun Milliarden sein

werden und laufend neue Smartphone-Generationen wie Strohfeuer auflodern und wieder verlöschen. Großes Innovationspotential besitzen jedoch 3D-Drucker, neue Syntheseverfahren in der chemischen Industrie, neue Speichertechniken für Elektroenergie.

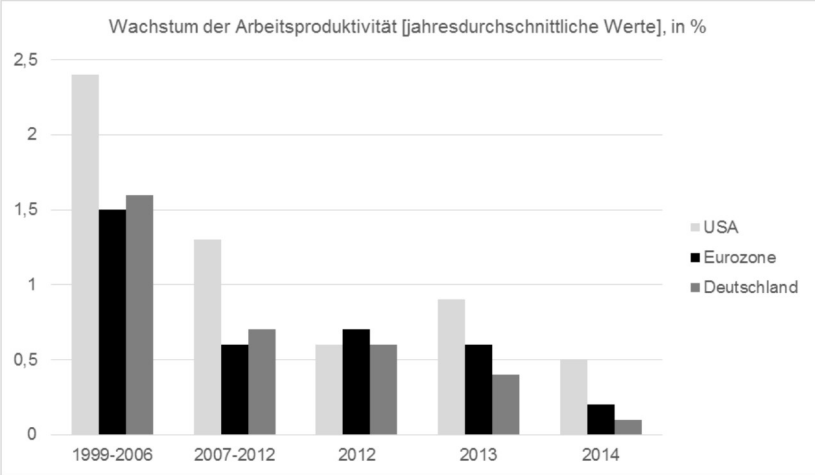


Abb. 1: Wachstum der Arbeitsproduktivität seit 1999 in % für die USA, die EU und Deutschland

Quelle: OECD Compendium of Productivity Indicators, 2016, S.19

Die chemische Industrie ist der dominierende und innovativste Zweig der Stoffwirtschaft. Bis Juni 2015 wurden 100 Millionen organische und anorganische Substanzen (individuelle Stoffe) und Sequencen in der Stoffdatenbank CAS registriert. Jede Woche wächst diese Datenbank um rund 100.000 neue Stoffe.

Industrielle Bedeutung haben allerdings nur ungefähr 100.000 Stoffe, von denen rund 10.000 in Mengen größer als 1.000 Tonnen pro Jahr industriell hergestellt werden, allein in Deutschland davon fast 30.000 Chemieprodukte. Dafür werden 19 Mio. Tonnen fossile Rohstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle) und 2,7 Mio. Tonnen nachwachsende Rohstoffe benötigt. Der Weltchemikalienmarkt hatte 2015 einen Umsatz von über 3,5 Billionen Dollar.

Prozessindustrie und Prozesstechnik im Spannungsfeld von Industrie 4.0

In den Prozessindustrien spielen Innovationen eine große Rolle – in der chemischen Industrie, in der Mikroelektronik – die Chipherstellung, Grundlage der Mikroelektronik, ist ein moderner Zweig der Prozessindustrien. Die Innovationen betreffen die Lebensmittelindustrie, die Baustoffindustrie, die biotechnologische Industrie, Energie- und Brennstoffindustrie, Metallurgie, Abfallverwertung die Feinchemikalien- und Pharmaindustrie um nur einen Teil zu benennen. Ohne ständige evolutionäre und revolutionäre Erneuerungen in den Prozessindustrien sind Fortschritte in der globalen Welt nur beschränkt möglich. Die Prozessindustrien sind die „Technologien" der Stoffwirtschaft und wichtige Elemente der gesamten Produktionssphäre wie in Abbildung 2 dargestellt.

Diese Elemente sind wiederum sehr komplexe hierarchisch aufgebaute Systeme, deren Hierarchieebenen wie in Abbildung 3 gezeigt, von den Wechselwirkungen der Moleküle bei chemischen Reaktionen (Moleküldesign) und

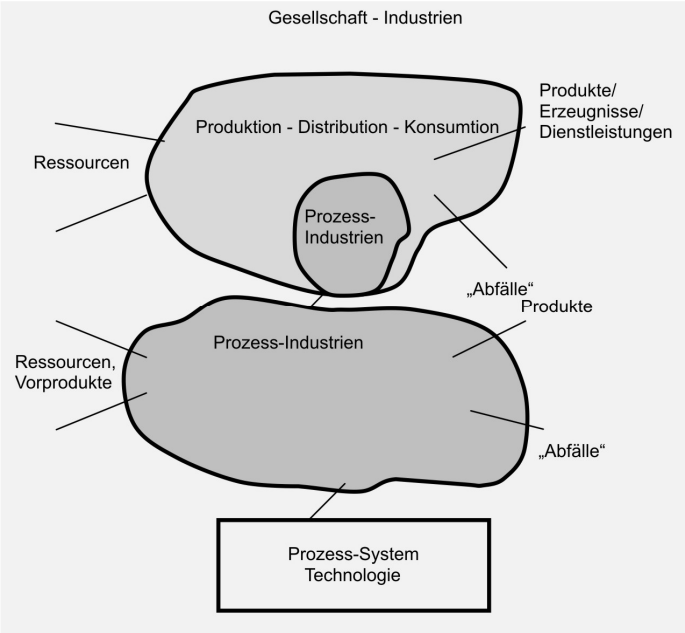


Abb. 2: Einordnung der Prozessindustrien und der Prozess-Systeme

Quelle: Hartmann/Fratzscher 2004, S. 106

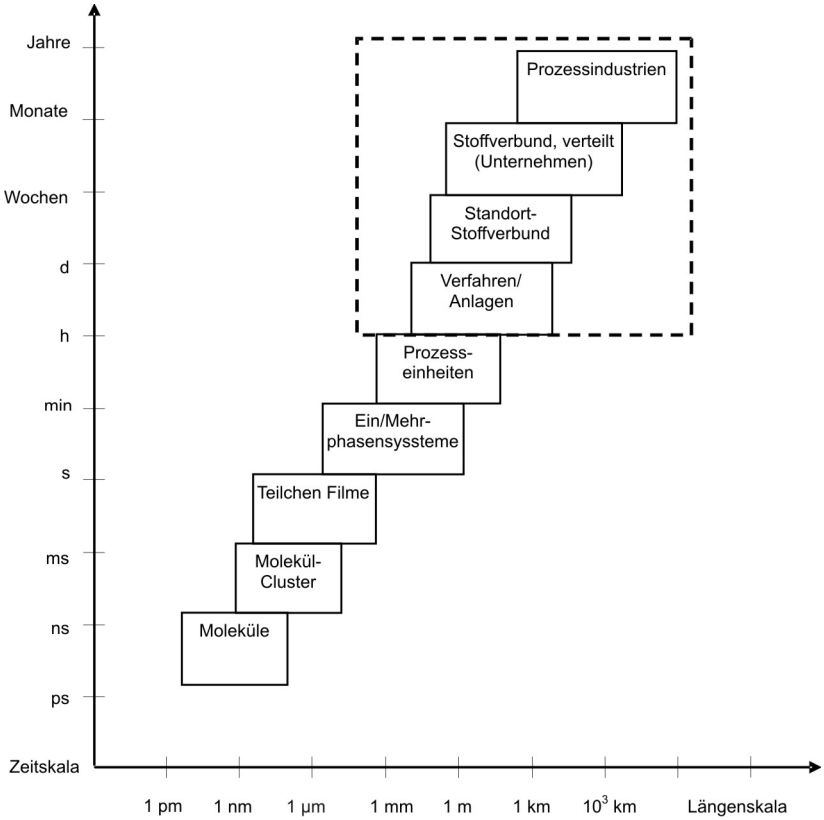


Abb. 3: Räumliche und zeitliche Skalen von Prozess-Systemen (technologischen Objekten) und deren Elementen sowie der Stoff- und Stoffmengenvielfalt

Quelle: Hartmann 2006, S. 126

Stofftrennungen, der Molekulargenetik in der Biotechnologie und Pharmatechnik bis zu stoff- und energiewirtschaftlichen Großanlagen mit Jahresdurchsätzen von Millionen Tonnen reichen.

Die Beherrschung dieser Vielfalt ist Gegenstand der Prozesstechnik. Diese ist konfrontiert mit folgende Problemen und Gestaltungsaufgaben:

– Hierarchische Strukturen von Technologien (Multi-Skalarität),
– Technologien als offene Systeme (Input/Output in Natur und Gesellschaft),

- Stofflich-energetische Aspekte von Technologien,
- Heterogenität von Technologien (Branchenübergreifende Strukturen, Logistik),
- Interdisziplinarität bei der Untersuchung, Gestaltung und beim Betreiben von Technologien,
- Qualitative und quantitative Methoden bei der Technologiegestaltung wie z.B. rechnergestützte Technologien,
- Technologien im Zeitalter der Wissensgesellschaft,
- Grenzen von Technologien (technisch-technologische, gesellschaftliche u.a.).

Innovationen auf allen Ebenen sind die Grundlage für neue und hocheffektive, Ressourcen schonende Prozesse und Anlagen, die den Anforderungen an eine sich ständig ändernde Produktpalette bei stetiger Variation der Rohstoffe und Zwischenprodukte. Es sind aber nicht nur Veränderungen in der Technologie selbst, die aus eigengesetzlichen Entwicklungen von Wissenschaft und Technik kommen, sondern auch aus den Arbeitsteilungs- und Globalisierungsprozessen der Weltwirtschaft und der Umweltpolitik. Eine nachhaltige Veränderung in der Stoffwirtschaft ist die zunehmende Modifizierung der „Verbundwirtschaft“, d.h. der vertikalen und horizontalen Integration von Technologien, die auf einem oder wenigen Rohstoffen oder Zwischenprodukten basierend ein umfangreiches Netzwerk von Verfahren zur Herstellung unterschiedlichster Zwischen- oder Endprodukte bilden. Diese neuen „Verbundsysteme“ konzentrieren sich auf spezielle Produktgruppen oder höherveredelte Zwischenprodukte, die eigentlichen Rohstoffe oder Zwischenprodukte werden in anderen „Verbundsystemen“ hergestellt bzw. in den Rohstoff-Förderländern.

Auch die Umorientierung der Unternehmen auf Kernkompetenzen und weltweite Entwicklungsverbünde und Kooperationen führen schrittweise zur Abkehr von der traditionellen Verbundwirtschaft. Die Globalisierung der Beschaffungs- und Absatzmärkte führt zur Auskopplung nichtprofitabler Prozesssysteme. Nichtprofitabel ist häufig die Produktion von Roh- und Zwischenprodukten, die wirtschaftlich nur noch von einigen wenigen Produzenten hergestellt werden.

Die Rationalisierung der Versorgungsketten und der Logistik führt zu einer neuen räumlichen Verteilung der Interaktionspartner und zur komplexen Bewertung nicht nur der Hauptprozesse durch Kennziffern, sondern auch der produktorientierten Infrastruktur, Pipelines und Verkehrsmittel werden zu Zwischenlagern für die Unternehmen.

Zur Intensivierung der technologischen Prozesse der Prozessindustrien kann eine Vielzahl von Prinzipien genutzt werden, die sich aus der Thermodynamik, Kinetik und u.a. Grundlagenwissenschaften ableiten lassen:

- Prinzip der günstigsten Triebkraftausnutzung:
  Vergrößerung oder Reduzierung der Temperatur-, Konzentrations- und Druck-Differenzen,
- Prinzip der günstigsten Rohstoffausnutzung:
  Beeinflussung des Gleichgewichtes und der Selektivität,
  Rückführung von Reaktanden, Anwendung des Gegenstromprinzips,
  Überschuss einer „billigen" Komponente bei Reaktionen,
  Einfrieren von „günstigen" Konzentrationsverhältnissen bei komplexen Reaktionen,
- Prinzip der günstigsten Energieausnutzung:
  Energie- (Wärme) Regeneration (direkte Wärmeübertragung, indirekte Wärmeübertragung, Rekuperation),
  Mehrstufigkeit der Prozessführung,
  Kombination exothermer und endothermer Prozesse,
  Teilen und Mischen von großen Stoffströmen zu Reduzierung des Trennaufwands,
- Prinzip der günstigsten Ausnutzung der Ausrüstung:
  Hohe Prozessgeschwindigkeiten,
  Beseitigung von Transportwiderständen,
  Kontinuierliche Betriebsweise,
  Reduzierung von Prozessstufen.
  Optimale Belegungsplanung bei Mehrprodukt- und Mehrzweckanlagen und optimale Steuerung der Prozesse, Miniaturisierung der Ausrüstungen.

Eine solche neue Richtung der Technologiegestaltung (Mikroverfahrenstechnik) besteht in der Miniaturisierung der Ausrüstungen zur Durchführung von industriellen Stoffwandlungen in so genannten Mikrostrukturapparaten, Chipreaktoren genannt (vgl. Hartmann 2004, S. 114). Diese haben sehr kleine Abmessungen zwischen 1 mm und 10 µm. Dieser neuartige Ausrüstungstyp besitzt eine Reihe bemerkenswerter Eigenschaften:

- Hohe Prozessintensität durch Mikromischung der Komponenten. Die Mischzeit verringert sich gegenüber den traditionellen Mischern um Größenordnungen.
- Sehr große Oberflächen- zu Volumenverhältnisse. Dadurch können Stoffwandlungen bei höheren Temperaturen sogar isotherm durchgeführt wer-

den (sehr schnelles Aufheizen und Abkühlen) ohne Zusatz von Lösungsmitteln.
- Erzielung sehr hoher Raum-Zeitausbeuten und Selektivitäten, dadurch wird der Anfall von Nebenprodukten reduziert und die Produkte werden reiner.
- Einsparungen bei aufwendigen Trenn- und Aufbereitungsoperationen.
- Realisierung neuer Synthesewege, z.B. Gewährleistung eines erwünschten Isomeren-Verhältnisses.
- Geringere Reaktionsvolumina und damit verbundene höhere Prozesssicherheit.
- Im Prinzip geringer Aufwand für die Modellierung, da die Auslegung stark experimentorientiert ist.

Prototypen dieser Technologien – in Schuhkartongröße – werden bereits betrieben mit Jahreskapazitäten bis 50 t/a. Industrielle Anlagen werden durch „scale out“ oder „numbering up“, d.h. durch mehrfache parallele Wiederholungen der miniaturisierten Prozesseinheiten ertüchtigt, um die gewünschte Kapazität zu erreichen (Mini-Konti-Betrieb). Wirtschaftliche Vorteile sind:

- Schnellere Anforderungsentwicklung (von der Anfrage bis zum Produkt). Der „Modellierungsaufwand“ wie bei Großanlagen entfällt weitgehend.
- Verkürzung der Projektrealisierungszeiten, Parallelisierung der einzelnen Prozess-Schritte.
- Verteilte (kooperative), integrierte und parallele Produktentwicklung und modulare Produktgestaltung.
- Punktgenaue Bedienung des Marktes mit den verlangten Produkten.
- Anpassung an Unternehmen spezifische Anforderungen (Customizing) im Produktspektrum.
- „Konstruktion“ von Produkten mit genau vorgegebenen Eigenschaften, z.B. bei Nanomaterialien.
- Vereinfachung des „Behördenengineerings“.

Haupteinsatzgebiete sind die Synthese von Feinchemikalien, pharmazeutische Produkte, spezielle Pigmente (Nanomaterialien), Synthesen, die in Großanlagen zu unerwünschten Nebenprodukten führen und Screening im Laborbereich.

Neben der „prozessorientierten“ Komponente wird die „produktorientierte“ Komponente verstärkt Gegenstand der Prozessindustrie. Über das Produkt-Design kommt nicht nur der Aspekt der Rohstoffe/Ausgangsstoffe,

sondern auch die der späteren Entsorgung in das Feld der Technologie (Konstruktion, Recycling, Demontage).

Ständig kürzer werdende Produktentwicklungszeiten erfordern eine frühzeitige Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen dem Produkt und aller damit in Verbindung stehenden Prozesse und der Umwelt.

Weitere wichtige Entwicklungen in der Technologie sind mit den Forderungen nach Nachhaltigkeit, der Betrachtung der gesamten Lebenszyklen von Produkt und Prozess-System sowie der Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bewertungskriterien verbunden (Lebenszyklusanalyse).

Optimale Lösungen für einen neuartigen Prozess (Verfahren) vom Standpunkt der Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit/Umweltfreundlichkeit sind:

- Hohe Atom-Effizienz (keine unerwünschten Nebenprodukte durch optimale Veränderungen der Molekül-Strukturen der Einsatzstoffe),
- Biotechnologien mit verbesserten Enzymen,
- Inhärente Sicherheit und Zuverlässigkeit,
- Einfachheit und Reduzierung der Prozess-Schritte (neue Katalysatoren und umweltfreundliche Lösungsmittel),
- Hoher bzw. vollständiger Umsatz der eingesetzten Rohstoffe,
- Günstig verfügbare Einsatzprodukte,
- Akzeptanz der Technologien durch die Umwelt und die Bevölkerung.

Für die Berechnung, Auslegung, Konstruktion, den Betrieb, die Steuerung und die Instandhaltung von Prozesssystemen war die Entwicklung und Bereitstellung von „Wissens“ in seinen verschiedenen Formen und Ausprägungen für technologische Systeme erforderlich (vgl. Hartmann 2008, S. 109). Für den industriellen (kommerziellen) Nutzer steht inzwischen eine Vielzahl hochentwickelter rechnergestützter Werkzeuge für die Bearbeitung vieler technologischer Aufgaben zur Verfügung.

Eine Weiterentwicklung und Verbreiterung dieser Werkzeuge erfordert:

- Offene Modellstrukturen auf gemeinsamen Plattformen,
- Einbeziehung der Heterogenität der Objekte und Modelle,
- Konsequente Nutzung von Modellspeichern zur Erreichung eines hohen Grades der Wiederverwendbarkeit aller Wissenskomponenten,
- Schaffung offener Verbunde von Software-Werkzeugen zur Beschleunigung der Modellbildung (Zeitfaktor) und zur Reduzierung der Aufwendungen (Kostenfaktor),

– Systeme mit verteilten Ressourcen und kostengünstige Zugriffsmöglichkeiten auf diese Werkzeuge über das Internet,
– Anwendung des Prinzips der „best practice"-Vorgehensweise zur Erhöhung der Qualität der Modelle und des Nutzens bei deren Anwendung.

Hochgeschwindigkeitselemente – Innovative Hochleistungsböden

Ein Beitrag zur Intensivierung von Verfahren mit hohen Durchsätzen – Millionen Tonnen im Jahr bzw. Milliarden Kubikmetern – wie der Destillation von Rohöl, der Ammoniak- und Methanolsynthese, der Erdgastrocknung, der Entfernung von Kohlendioxid aus Rauchgasen von Kohlekraftwerken u.a. besteht in der Optimierung des Stoff- und Energieaustausches für die Stofftrennung und den Umweltschutz und damit auch zur Reduzierung des Ausrüstungsaufwands. Stofftrennkolonnen sind immer noch dominierende Ausrüstungen einer Chemieanlage – durch Größe und Anzahl der Kolonnen aber auch durch die damit verbundenen Investitionen.

Eine innovative Technologie für die Intensivierung von Stofftrennprozessen besteht in der optimalen Gestaltung der Stoff- und Energieaustauschvorgänge, die auch eine Verkleinerung der Ausrüstungen führt (vgl. Hartmann 2001, S. 122). Das erfordert allerdings auch neuartige Konstruktionen für die Stoffaustauschelemente, die hier kurz vorgestellt werden.

Bei den neu entwickelten Elementen[1] handelt es sich um einen Hochgeschwindigkeitsboden zur Trennung von Gas- und Flüssigkeitsgemischen. Der Boden gestattet die Schaffung von hochkompakten Anlagen und somit eine Kosten- und Massensenkung bei der Errichtung von Kolonnen mit hohen Durchsätzen. Die bevorzugten Einsatzgebiete dieses Bodens liegen in der Aufbereitung von Erdgasen und Rauchgasen sowie dort, wo kleine Massen und hohe spezifische Leistungen wichtig sind wie im Offshore-Einsatz. Ein Längsschnitt des neuen Bodens ist in Abbildung 4a dargestellt. Der Stoffaustausch erfolgt in den neuartigen Kontakt- und Trennelementen (KTE), eine Ansicht ist in Abbildung 4b gezeigt. Bei diesen KTE handelt es sich um offene vertikale Stutzen, die am Austritt mit einem Fliehkraftabscheider ausgerüstet sind.

Im unteren Bereich befindet sich ein Axialwirbler, welcher die Flüssigkeit in feine Tröpfchen zerteilt. Die Stutzen sind fest mit dem Boden verbunden. Über Umfangsbohrungen im unteren Bereich erfolgt die Flüssigkeitszufuhr. Auf den Boden gelangt die Flüssigkeit über einen Zulaufschacht.

1 Hochgeschwindigkeitsstoffaustauschboden, Deutsches Patent 198 28 884, (1998), High Speed Mass Transfer Tray, USA. Patent 6,227,524, (1999)

Über einen Ablaufschacht wird sie auf den darunter liegenden Boden geführt. Der Füllstand wird über die Verwendung von Wehren gewährleistet. Die Kontakt- und Trennelemente werden vom Gas axial von unten nach oben durchströmt. Aufgrund des auftretenden hydrostatischen Druckes wird die Flüssigkeit in das KTE eingesaugt und durch den im Stutzen befindlichen Wirbler in feine Tröpfchen zerteilt. Das entstehende Gas-Flüssigkeits-Gemisch erhält, durch die am Wirbler befindlichen Schaufeln, einen Drallimpuls. Aufgrund der auftretenden Zentrifugalkräfte bewegen sich die Flüssigkeitströpfchen in Richtung Rohrwand und bilden dort einen Flüssigkeitsfilm, der sich durch die Reibungskräfte des Gasstromes nach oben bewegt. In der Abscheidezone des KTE findet eine Trennung der Flüssigkeit vom Gasstrom statt. Die Flüssigkeit verlässt das KTE über einen Ringspalt am oberen Ende und fließt auf den Boden zurück und das Gas wird über einen Ablenkring abgeführt.

Da dieser Boden mit sehr hohen Gas/Dampfgeschwindigkeiten in den KTE arbeitet und den Durchlassquerschnitt besser als Glocken- bzw. Ventilböden nutzt, ergibt sich eine höhere Gesamtgeschwindigkeit in der Kolonne damit ein hoher Durchsatz bei kleinen Kolonnenabmessungen. Wenn die Be-

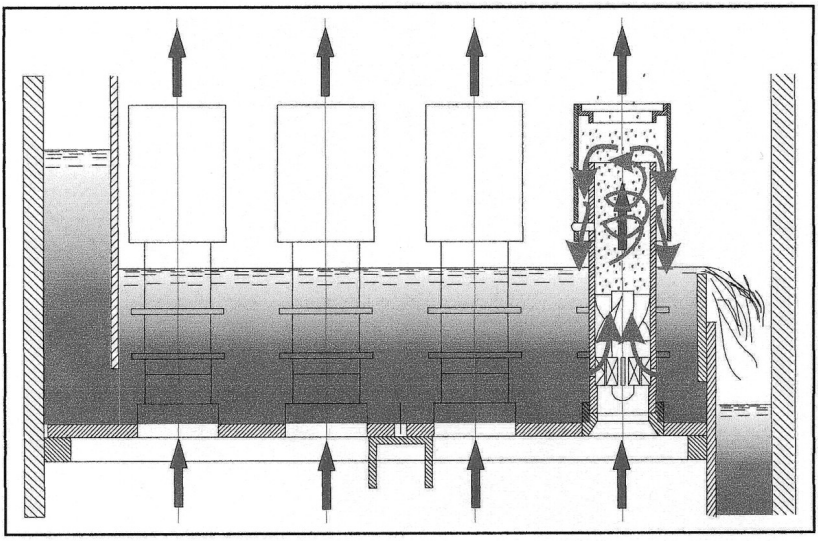


Abb. 4a: Längsschnitt durch einen Hochgeschwindigkeitsboden

Quelle: Hartmann 2004, S. 123

lastungsbereiche und die Betriebsbedingungen sehr stark variieren und eine hohe Flexibilität erforderlich ist, kann dies durch eine Kombination von Hochgeschwindigkeitsböden und Ventilböden optimal realisiert werden. Die KTE können auch separat als hocheffektive Tropfen- und Staubabscheider eingesetzt werden.

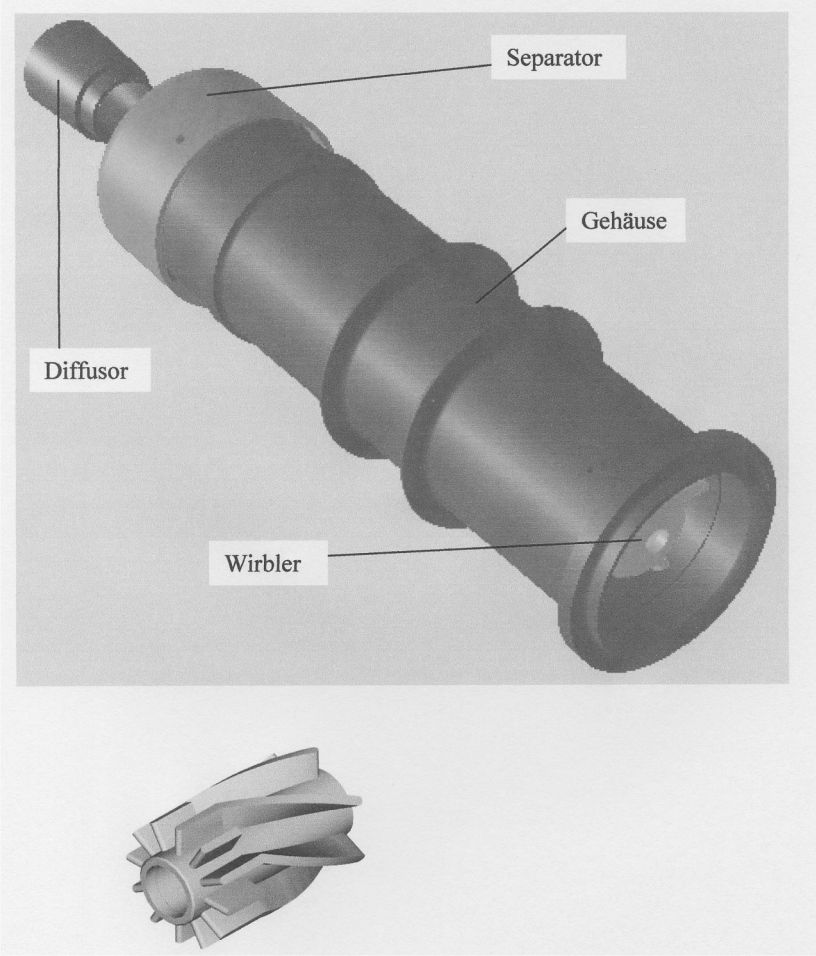


Abb. 4b: Bestandteile eines Hochgeschwindigkeitselements

Quelle: Hartmann 2001, S. 22

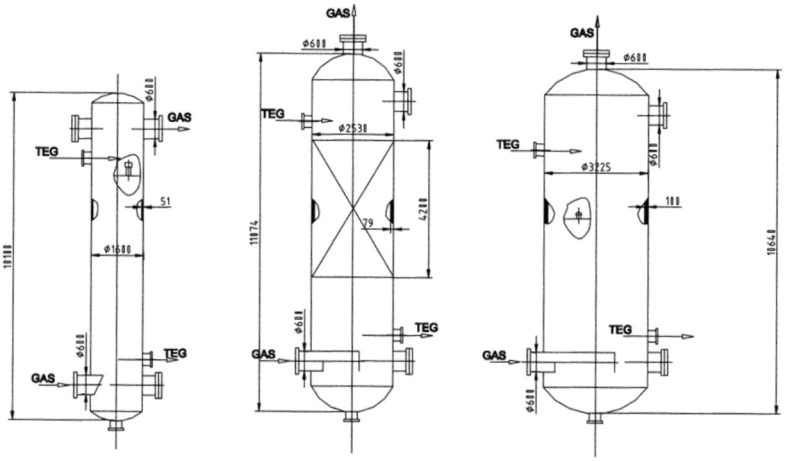
Diese Hochgeschwindigkeitsböden, welche durch spezielle Kontakt- und Abscheideelemente den Stoffaustausch verbessern und den Gasdurchsatz um ein Mehrfaches vergrößern, tragen zu einer wesentlichen Verringerung der Ausmaße der Absorptionskolonne bei. Dadurch können die Kolonnen kostengünstiger erstellt werden als herkömmliche Boden- oder Packungskolonnen bei vergleichbaren Durchsätzen.

Damit können kompakte Absorber für sehr hohe Durchsätze gebaut werden, die die Investitionskosten gegenüber Kolonnen mit strukturierten Packungen auf die Hälfte reduzieren lassen.

In Abbildung 5 wird deutlich, dass Kolonnen mit Hochgeschwindigkeitseinbauten wesentlich günstiger sind als konventionelle Kolonnen mit Glockenböden oder Packungskolonnen. Außerdem haben sie folgende Vorteile:

- Verringerung der Gesamtkosten für eine Kolonne auf die Hälfte gegenüber den zur Zeit eingesetzten besten Konstruktionen bei gleichzeitiger Erhöhung des Durchsatzes auf das bis zu Fünffache,
- Verringerung der Kolonnenabmessungen auf die Hälfte und des Apparategewichts bis auf ein Fünftel gegenüber anderen Konstruktionen,
- Einsatz als hochkompakter multifunktionaler Apparat für absorptive und destillative Trennaufgaben,
- hohe Stabilität und Flexibilität des Betriebsverhaltens,
- Unempfindlichkeit gegenüber Abweichungen von der horizontalen Lage (z.B. bei Schwankungen von Offshore-Plattformen),
- Unterdrückung der Schaumentwicklung innerhalb der Kolonne,
- Vormontage der Einbauten beim Hersteller, dadurch Zeiteinsparungen bei zeitkritischen Investitions- oder Modernisierungsvorhaben.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Parameter von Hochgeschwindigkeitsböden mit Bodenkolonnen, Füllkörperkolonnen und Kolonnen mit Strukturierten Packungen verglichen, die die Vorteile deutlich zeigen.



Kolonne mit Hochgeschwindigkeitsboden Highspeed Tray Masse 22 t	Kolonne mit Strukturierten Packungen Masse 67 t	Glockenbodenkolonne Masse 105 t

Abb. 5: Absorber-Kolonnen (Höhe, Durchmesser, Masse)[a]

a – für einen Durchsatz von 500.000 Nm^3/h zur Erdgastrocknung für Hochgeschwindigkeitsböden mit Kolonnen mit strukturierten Packungen und Glockenböden

Quelle: Hartmann 2004, S. 125

Tab. 1: Vergleich wichtiger Kenngrößen von Boden- und Packungskolonnen und dem Hochgeschwindigkeitsboden

Typ	Hochgeschwindigkeits-Boden – HighspeedTray	Bodenkolonne		Füllkörperkolonne	Strukturierte Packungen
		mit Rücklaufschacht	ohne Rücklaufschacht		
Austausch	Kontinuierlich in Kolonne: Gegenstrom in Einbauten: Gleichstrom	Stufenweise, Kreuzgegenstrom	Stufenweise, Gegenstrom	Kontinuierlich, Gegenstrom	Kontinuierlich, Gegenstrom
Strömungsregime	Feinste Tröpfchen und Film	Blasen/Tropfen	Blasen/Tropfen	Film/Blasen	Film
Konstruktion	Böden	Böden	Böden	Schüttung ungeordnet	Packung strukturiert
Flüssigkeitsverteilung	Flüssigkeitswehr auf jedem Boden	Flüssigkeitswehr auf jedem Boden	Nur am Kopf	Nur am Kopf bzw. mehrfache Zwischenverteilung	Alle 1 bis 3 m bzw. nur am Kopf
Bauart	Hochgeschwindigkeits-Boden – HighspeedTray ®	Glockenboden Siebboden Ventilboden	Siebboden	z.B. Raschigringe Pallringe Interpack	z.B. Sulzer-Packung
max. Belastungsfaktor F_m	11	1,5 bis 2,5	2 bis 2,5	1 bis 2,5	2 bis 3
Trennstufenzahl n_t	2	1 bis 2	1 bis 2	0,5 bis 2	5 bis 2
$n_t \cdot F_m$	33	2 bis 4	2 bis 3	1 bis 3	10 bis 6
Spez. Kolonnenvolumen $1/(n_t \cdot F_m)$	0,045 bis 0,15	0,5 bis 0,25	0,5 bis 0,3	1 bis 0,3	0,1 bis 0,2
Geschwindigkeitsänderung	4 bis 8	10	5	1,5	1

Quelle: Hartmann 2001, S. 117

Literatur

Hartmann, Klaus (2001): Hightech und Highspeed – Miniaturisierung von Stoffaustauschapparaten mit neuen Hochgeschwindigkeitsböden, Verfahrenstechnik 35, Nr. 4, S. 22–24

Hartmann, Klaus; Fratzscher, Wolfgang (2004): Grundlagen der Herausbildung einer Allgemeinen Technologie der Stoffwirtschaft – Neue Tendenzen und Entwicklungen. In: Banse, Gerhard.; Reher, Ernst-Otto (Hg.): Fortschritte bei der Herausbildung der Allgemeinen Technologie (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 75). Berlin, S. 105–120

Hartmann, Klaus (2006): Manuskript „Grundlagen der Systemverfahrenstechnik“. St. Petersburg (Technologische Hochschule)

Hartmann, Klaus (2008): Verallgemeinertes Fachwissen und konkretisiertes Orientierungswissen – Grundlagen für die Analyse und Synthese modularer technologischer Systemmodelle. In: Banse, Gerhard; Reher, Ernst-Otto (Hg.): Verallgemeinertes Fachwissen und konkretisiertes Orientierungswissen zur Technologie (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 99). Berlin, S. 105–125

OECD (2016): OECD Compendium of Productivity Indicators 2016. Paris