

Verfahrenstechnische Maschinen - Chancen der gleichzeitigen Prozeß- und Maschinenentwicklung

Dietz, P.

Gekürzte Fassung eines Vortrages im Konstruktions-symposium der DECHEMA am 4. und 5. Februar 1999. Es werden einige konstruktionsmethodische Überlegungen anhand von Beispielen erläutert, die sich im Laufe des Sonderforschungsbereiches 180 ergeben haben und beinhalten im systematischen Teil die promotionsreifen Gedanken von Herrn Neumann, aber auch die Arbeiten der ehemaligen IMW-Mitarbeiter Ebert, Kruse, Bock und Rübhelke.

Cutted Version of a proceeding hold at the DECHEMA conference 4th and 5th february 1999. Based on papers of former IMW research stuff Neumann, Ebert, Kruse, Bock and Rübhelke, the use of modern design methods are shown at examples of precess engineering machines.

1 Entwicklungsprozesse in Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Alle verfahrenstechnischen Prozesse sind an die Nutzung von Maschinen, Geräten und Apparate gebunden, die aus Bereichen des Maschinenbaus bezogen oder speziell für das jeweilige Verfahren entwickelt werden. Hierauf beruht der Grundgedanke eines Sonderforschungsbereichs, an dem sich das IMW seit mehr als 12 Jahren beteiligt und der neben einer objektorientierten Entwicklung von Prozessen und Maschinen auch der Frage nachgeht, ob und wie neue, fachübergreifende Methoden zu einer gezielteren und gleichzeitigen Entwicklung von Prozeß und Anlage führen /1, 2/.

Das Ziel ist klar: Das in einigen Disziplinen bereits durchgeführte Prinzip einer parallelen Entwicklung von Produkten und Prozessen, das auch unter dem Stichwort "Concurrent Engineering" gehandelt wird, soll auf die Verfahrenstechnik übertragen werden /2/.

Bild 1 zeigt am traditionellen Ablauf einer verfahrenstechnischen Entwicklung, wie aus dem verfahrenstechnischen Grundfließbild ein detailliertes Fließbild und dann ein Installationsfließbild entsteht, aus dem die Konstruktionselemente der Anlage ausgesucht werden - der Entwickler oder Lieferant der Elemente weiß bis zur Veröffentlichung des Installationssche-

mas von dem Prozeß überhaupt nichts. Eine maschinenbaulich wie verfahrenstechnisch Weiterentwicklung im Wechselspiel von Prozeß und Verfahrenselementen ist so nicht möglich, da nur bekannte Standardelemente in die Überlegungen einbezogen werden können. Dabei läßt sich gerade an der verfahrenstechnischen Entwicklung sehr deutlich zeigen, daß ein Concurrent Engineering erhebliche Entwicklungspotentiale enthält (**Bild 2**), zumal Neuerungen bekanntlich in hohem Maße gekennzeichnet sind durch Entwicklungen aus anderen Fachgebieten.

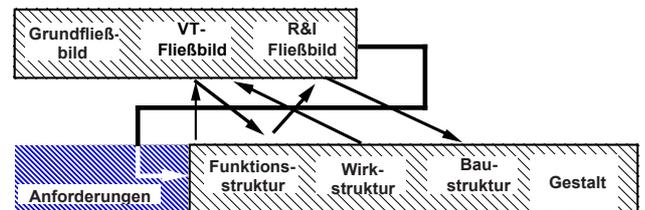


Bild 1: Traditionelle Entwicklung eines verfahrenstechnischen Prozesses und seiner Anlagen /2/

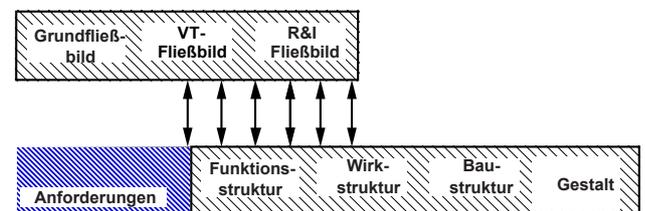


Bild 2: Integrierte Entwicklung von Prozeß und Anlage /2/

Es gibt sogar Methoden der Verfahrenstechnik, die eine solche fachbereichsübergreifende Neuerung verhindern, beispielsweise DIN 30600 (siehe /3/) zur Bildung von Baukastenstrukturen in verfahrenstechnischen Anlagen. In DIN 30600 ist die apparative Umsetzung einer Vielzahl existierender Unit Operations in Form schematisierter Bildzeichen zusammengefaßt, dadurch wird die Umsetzung abstrakter Prozeßschritte in Apparate- und Maschinenkonzepte durch das Angebot vorkonfektionierter Lösungselemente (z.B. Pumpen, Rührkessel, Brecher, etc.) vereinfacht. Im Zuge der Entwicklung einer verfahrenstechnischen Anlage oder Maschine ausgehend vom Grundfließbild bis hin zum R&I-Fließbild werden die Unit

Operations durch die ihnen entsprechenden Bildzeichen ersetzt, so daß die anlagentechnische Realisierung eines neuen Prozesses nur zu einer Kombination bekannter und verfügbarer Apparate und Maschinen führt.

2 Vorgehensweise zum Entwickeln verfahrenstechnischer Maschinen

Das Bestreben, den Entwicklungsprozeß als allgemeines Vorgehensmodell zu behandeln und ihn mit Hilfe systemtheoretischer Betrachtungen zu optimieren, ist nicht neu. In den bekannten konstruktionssystematischen Vorgehensweisen wie z.B. der Richtlinie VDI 2221 /4/, der Richtlinie VDI 2222 /5/, aber auch in der von Blaß in /3/ beschriebenen Vorgehensweise zur Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse wiederholt sich der Arbeitsschritt des Umsetzens von abstrakten Modulen der Aufgabenstellung hin zu Apparate- und Maschinenkonzepten, die, bezogen auf die Verfahrenstechnik, zu einer kompletten verfahrenstechnischen Anlage oder Maschine kombiniert werden. Trotz der Darstellung in einer Richtlinie, die den Eindruck eines gemeinsamen systematischen Vorgehens vermittelt, werden die Unterschiede aber bei genauer Betrachtung der einzelnen Entwicklungsschritte und ihrer Ergebnisse deutlich (**Bild 3**):

Während der erste Schritt, die Formulierung der Anforderungsliste, Grundlage jeder Entwicklungsarbeit ist und von für die Entwicklung von Produkten wie von Prozessen gleichartigen Methoden unterstützt wird /6/, wird im nächsten Schritt der maschinenbaulichen Entwicklung gemäß /4/ nach Funktionen und ihrer Realisierung mit Hilfe naturwissenschaftlicher Erkenntnisse gesucht, während nach /3/ in der verfahrenstechnischen Entwicklung ein erstes Grundfließbild erarbeitet wird, welches eine abstrakte Lösung zu der gestellten Aufgabe in Form einer Kombination unterschiedlicher, aber bereits festliegender Unit Operations ergibt, die nach vorgegebenen Regeln dargestellt werden /7/. Als Grundlage hierzu dient die Vorstellung, daß der verfahrenstechnische Prozeß (Prozeß der Stoffumwandlung) immer in die drei Hauptabschnitte nach **Bild 4** zerlegt werden kann. Damit kann die in den Sequenzen "Funktionsanalyse" und "Suche nach Lösungsprinzipien" der maschinenbaulichen Entwicklung beschriebene Suche nach neuen Lösungen nicht mit der Erstellung der Fließbilder aus einem Katalog "aller für das Verfahren erforderlicher Apparate und Maschinen und die Hauptfließlinien" /7/ verglichen werden. Auch bei einem weiteren Ver-

gleich der beiden Vorgehensweisen lassen sich formale und konzeptionelle Brüche nachweisen, die uns über neue Vorgehensweisen nachdenken lassen sollten, mit denen in einer integrierten Entwicklung von Anlage und Prozeß die "offene" und auf die Schaffung neuer Lösungen abgestimmte Methodik der Produktentwicklung für die Gestaltung und Optimierung des Prozesses ebenfalls genutzt werden.

Als Unterstützung zur Konkretisierung dieser Vorgehensweise bietet sich die VDI Richtlinie 2222 /5/ an, die im folgenden um Elemente der verfahrenstechnischen Vorgehensweisen angereichert wird. Der in **Bild 5** dargestellte Vorgehensplan ist in drei Spalten unterteilt. Die linke Spalte beinhaltet die einbezogenen Hilfsmittel wie z.B. DIN 28004 oder Kreativitätstechniken, in der rechten Spalte sind die zu erreichenden Arbeitsergebnisse zusammengefaßt. Die mittlere Spalte basiert entsprechend der Richtlinie VDI 2222 auf einer Unterteilung in vier Phasen: der Planungsphase, der Konzeptionsphase, der Entwurfsphase und der Ausarbeitungsphase. Die am Rand gezeichneten Vorgehensweisen deuten darauf hin, daß entsprechend /6/ ein ständiger Abgleich mit der Anforderungsliste erfolgen muß und daß die interaktive Optimierung von Prozeß und Maschine eine "Schleifenbildung" nach VDI 2221 erfordert.

Wesentlich an diesem Vorgehensmodell ist, daß zur Erreichung der verfahrenstechnischen Ergebnisse in jeder Phase die Chance einer methodische Lösungssuche nach dem sogenannten TOTE-Schema /9/ gegeben wird, in dem aufgrund von Analyse, Synthese und Bewertung nach neuen Lösungen gesucht wird, die dann in den Ablauf der verfahrenstechnischen Entwicklung eingestellt werden und so das Lösungsfeld wesentlich erweitern (**Bild 6**).

Planungsphase

Die Forderung, die zur Problemstellung/Aufgabenstellung geführt hat, kann nach /6/ in ihrer Herkunft auf zwei unterschiedliche Quellen zurückgeführt werden:

- Realer Kunde: Eine Person oder eine Organisation als Fordernde(r).
- Imaginärer Kunde: Ein durch Marktanalysen, Umfragen, Wartungsberichte oder andere Quellen erzeugter Forderungssatz für ein neues System oder eine Änderung an einem bestehenden System eigener Herstellung.

In beiden Fällen ist nach der Festlegung der Aufgabenstellung ihre Klärung und Präzisierung erforder-

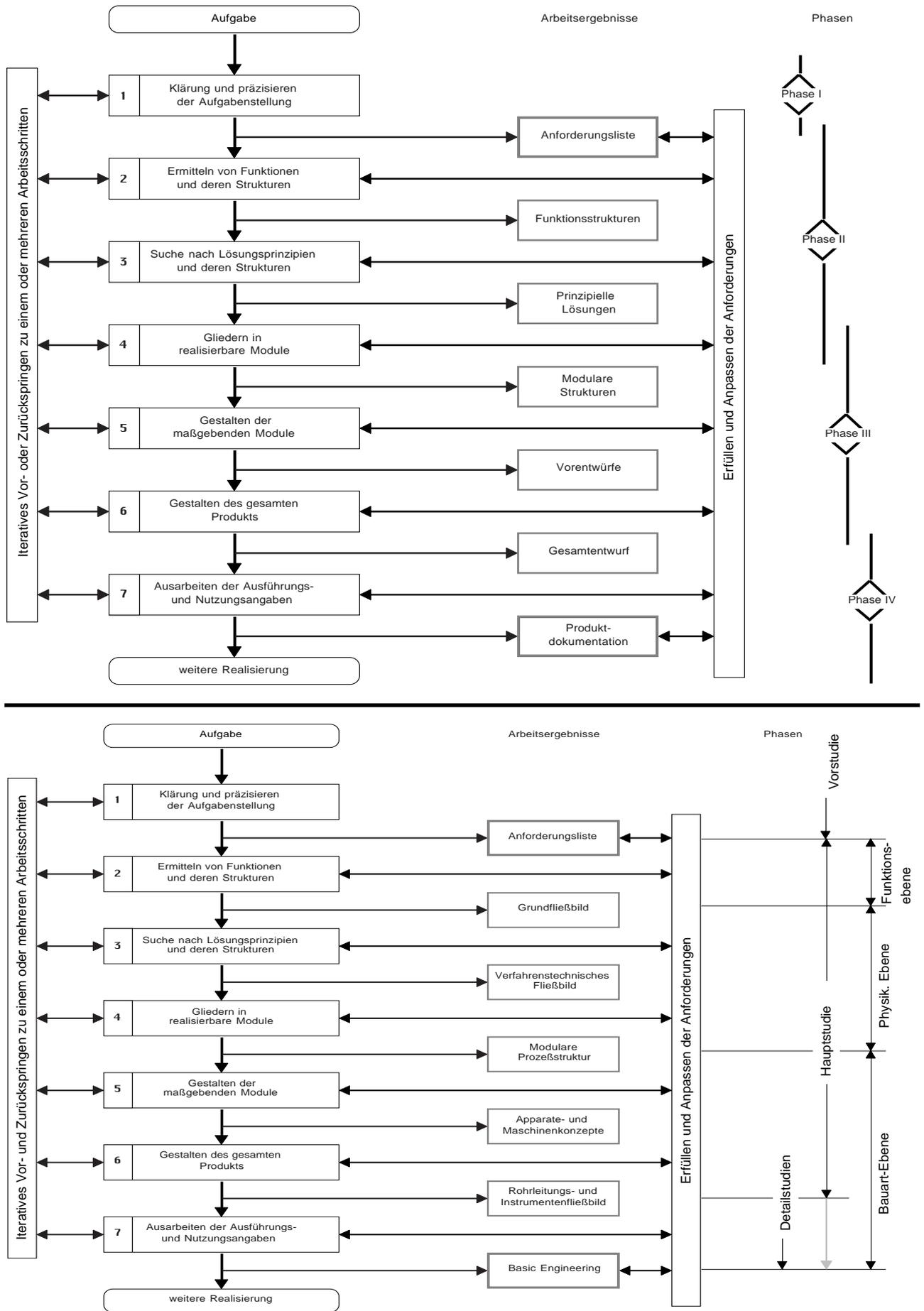


Bild 3: Vorgehensmodelle bei der Entwicklung nach VDI 2221 /4/. Oben: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren im Maschinenbau. Unten: Vorgehen bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse und Anlagen.

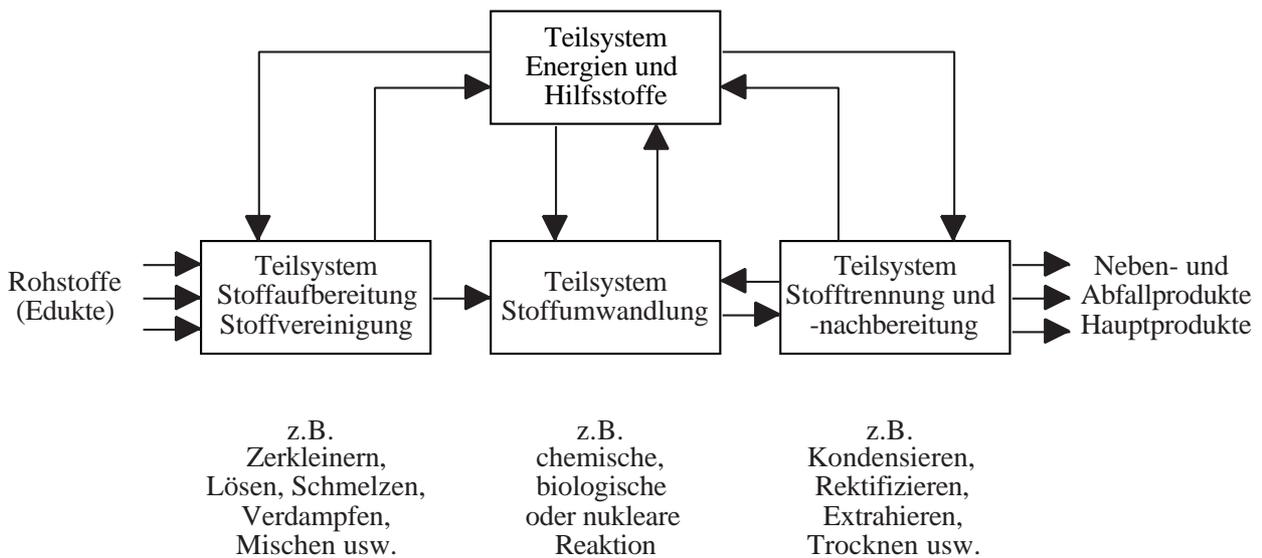


Bild 4: Die drei Hauptschritte eines verfahrenstechnischen Prozesses /3/

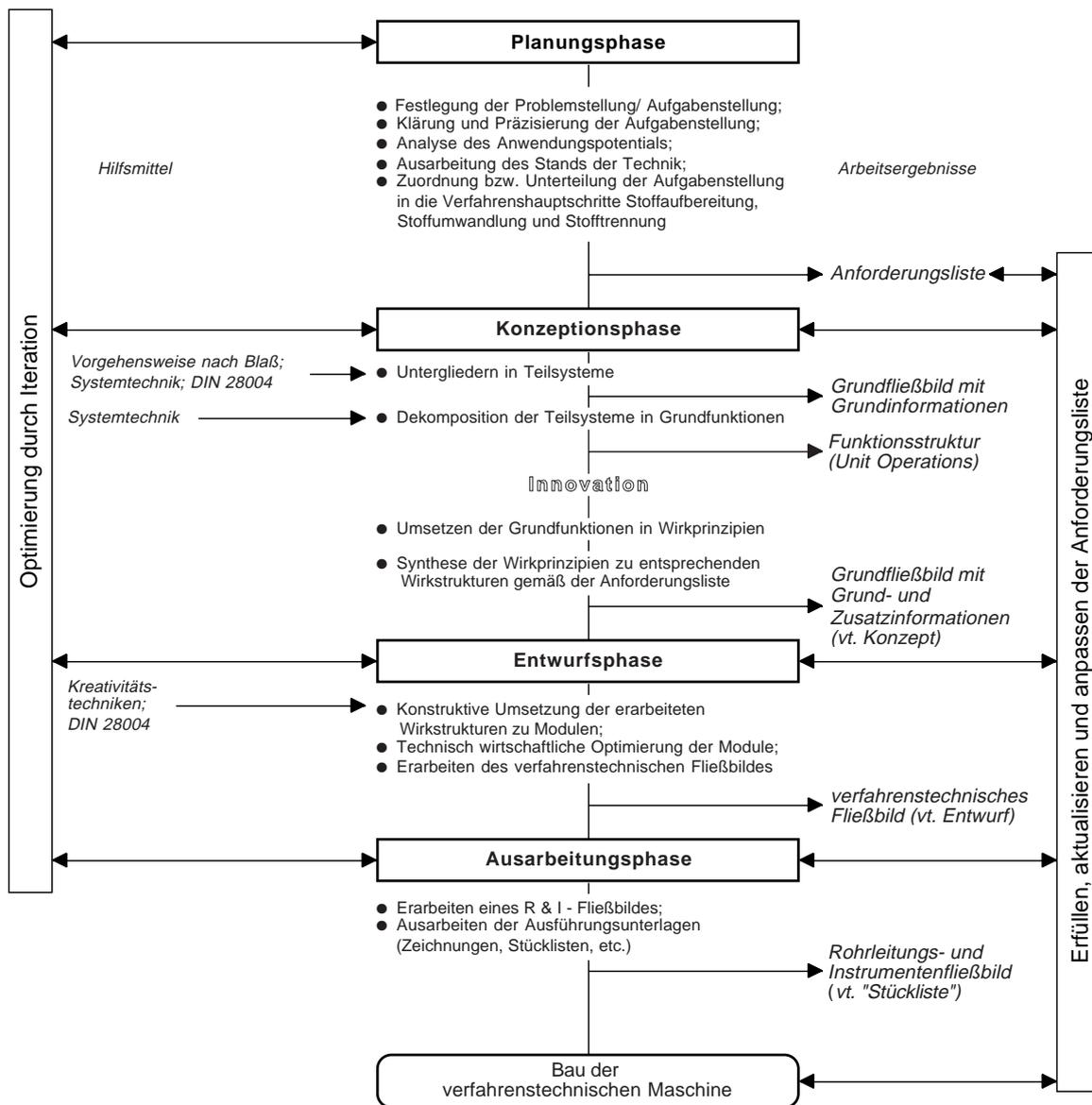


Bild 5: Vorgehensweise zur Entwicklung und Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen nach VDI 2221 und VDI 2222 unter Zuhilfenahme der Systemtechnik und der Vorgehensweisen nach Blaß und DIN 28004

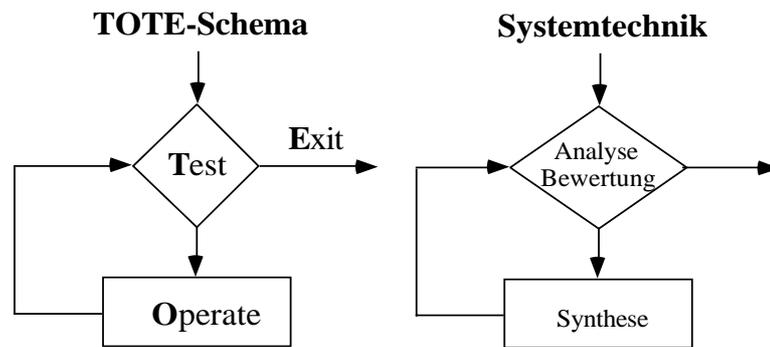


Bild 6: TOTE-Schema und Systemtechnik als Grundelement von Denk- und Handlungseinheiten /9/

lich, um zur Realisierung eines technischen Produktes eine einheitliche "Sprache" auch fachübergreifend zu finden /6/. Diese einheitliche "Sprache" ist die Grundvoraussetzung für eine korrekte Lösung der Aufgabenstellung, da weder der Fordernde und das die Aufgabenstellung bearbeitende Projektteam eine physikalische Einheit darstellen noch das aus Vertretern der Verfahrenstechnik, des Maschinenbaus, der Regelungstechnik usw. zusammengesetzte Team zur Problemlösung über die gleiche Ausbildung, den gleichen Erfahrungshintergrund und damit über die gleiche Sprachregelung verfügen.

Mit den aus der Aufgabenklärung gewonnenen Informationen (Patentrecherche, Konkurrenzanalyse, Marktanalyse usw.) wird eine Detaillierung, d.h. eine Unterteilung bzw. Zuordnung der Aufgabenstellung durchgeführt, wobei die in Bild 4 dargestellten Hauptschritte einen Einstieg bieten können. Es muß aber die Einschränkung gelten, daß ein detaillierter Verfahrensschritt oder eine verfahrenstechnische Maschine nicht zwingend alle drei Hauptschritte eines Prozesses beinhalten muß. Das Arbeitsergebnis "Anforderungsliste" der Planungsphase wird entwicklungsbegleitend bis zum Bau der verfahrenstechnischen Maschine permanent erweitert, aktualisiert, angepaßt und erfüllt.

Konzeptionsphase

Die Konzeptionsphase beginnt mit dem "Untergliedern in Teilsysteme" unter Einbeziehung der Hilfestellungen, die die Systemtechnik, die DIN 28004, die Richtlinie VDI 2222 und auch die Vorgehensweise nach Blaß /3/ bieten. Im Sinne der Systemtechnik wird in diesem Arbeitsschritt das komplexe System der Aufgabenstellung zu Teilsystemen geringerer Komplexität zerlegt /4/. Jede Funktion läßt sich dabei in Form einer Black-Box darstellen /5/, **Bild 7** ist eine sol-

che Darstellung für die Funktion "Stoff fördern" mit den in- und outputs "Energie, Stoff, Signal". Wesentlich gegenüber der Fließbilddarstellung ist, daß diese Funktion noch keine konstruktive Entsprechung hat und daher noch offen ist für neue Lösungsprinzipien, Kombinationen von Prinzipien oder sogar die Infragestellung dieser Funktion überhaupt. Gegenüber der üblichen Maschineentwicklung bildet bei der Entwicklung einer verfahrenstechnischen Maschine meist der Stoffstrom die Hauptfunktion, während der Signal- und Energiefluß eine untergeordnete Bedeutung besitzen .

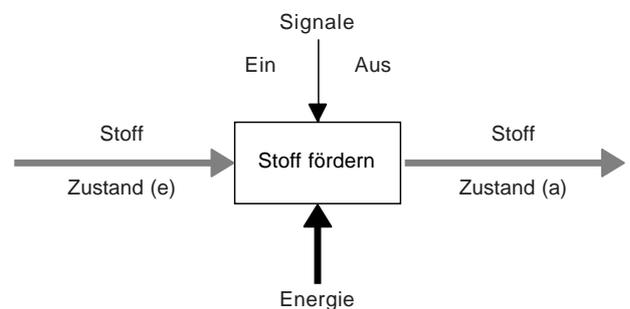


Bild 7: Black Box Darstellung einer Pumpe nach /5/

Die Darstellung eines Teilsystems durch eine funktionelle Struktur und die in /5/ beschriebene Dekomposition in weitere Grundfunktionen ähnelt der Darstellung in Form des Grundfließbildes, im Gegensatz hierzu stellen die Funktionen aber keine Unit Operations mit einer Entsprechung durch Anlagenkomponenten dar, sondern erlauben eine Rückführung auf naturwissenschaftliche Grundoperationen, die z.T. noch keiner technischen Lösung zugeführt wurden. Dies ermöglicht die Findung innovativer Problemlösungen, welche auf den im Rahmen der Maschinen- und/oder Anlagenentwicklung umzusetzenden verfahrenstechnischen Prozeß optimal abgestimmt sind, wie an dem nachfolgenden Beispiel verdeutlicht werden soll.

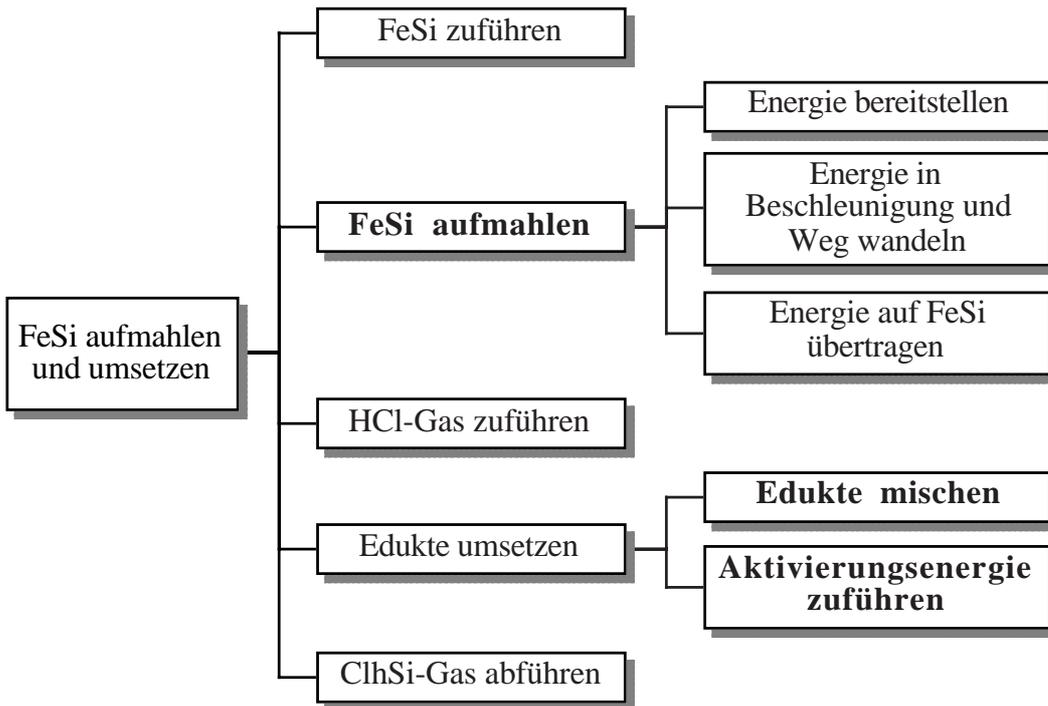
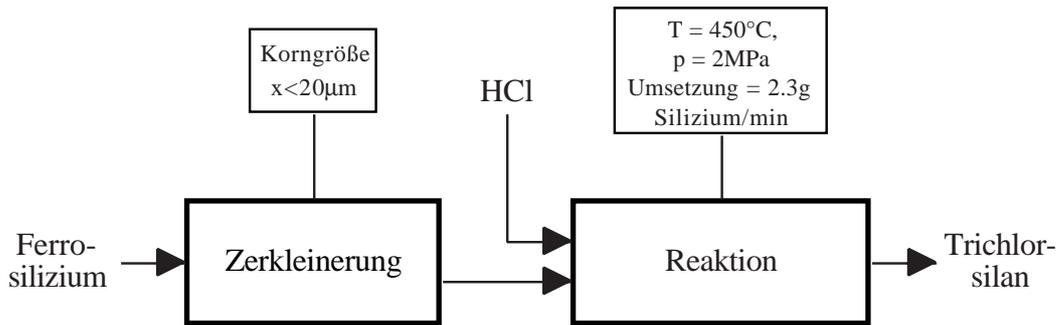


Bild 8: Aufbereitung des Problems in der Funktionsanalyse am Beispiel der Hydrochlorierung von Ferrosilizium zu Trichlorsilan nach /10/. Oben: Grundfließbild mit Grund- und Zusatzinformationen. Unten: Funktionsgliederung für die Gesamtfunktion "FeSi aufmahlen und umsetzen"

Für den Prozeß der Hydrochlorierung von Ferrosilizium zu Trichlorsilan soll eine maschinelle Umsetzung gefunden werden. Diese muß eine Mahlzone beinhalten, in der das Ferrosilizium zum Erhalten reaktiver Oberflächen aufgemahlen wird und einen beheizten Reaktor, in dem die Umsetzung des Ferrosiliziums zu Trichlorsilan unter Zuführung von gasförmigen HCl erfolgt.

Die Aufbereitung des Problems in einem verfahrenstechnischen Fließbild (**Bild 8** oben) gemäß der Vorgehensweise nach DIN 28004 und DIN 30600 um, so entsteht aufgrund des in der DIN 30600 bereitgestellten Bildzeichenkatalogs eine Vorfizierung auf die Hintereinanderschaltung einer für die Anforderungen geeigneten Mühle und eines entsprechenden Reaktors. Das Aufstellen einer Funktionsstruktur (**Bild 8** unten) der Gesamtfunktion "FeSi aufmahlen und umsetzen"

macht deutlich, daß die Teilfunktionen "FeSi aufmahlen", "Edukte mischen" und "Aktivierungsenergie zuführen" nach ihrer Umsetzung mit Hilfe der in /5/ angebotenen Lösungsmethoden für die jeweiligen Wirkprinzipien zu einer gemeinsamen Wirkstruktur einer Reaktionsmühle mit integrierten Funktionen des Mahlens und der chemischen Umsetzung in einem Reaktionsraum /11/ zusammengeführt werden können, die Verfahrensweise dieser Mühle kann wiederum als Fließbild dargestellt werden.

Entwurfsphase

Innerhalb der im Maschinenbau durch die Dimensionierung der Kraftflüsse, die Auswahl der Werkstoffe und die Festlegung der Wirkbewegungen gekennzeichneten Entwurfsphase wird die Dimensionierung

der Stoff- und Energieflüsse und damit die Festlegung der einzelnen Moduln der Anlage oder verfahrenstechnischen Maschine vorgenommen. Durch Berechnungen und Simulationen wird dieser Vorgang unterstützt, es können Kreativitätstechniken (Brainstorming, Syntectic usw.) oder diskursive Lösungsmethoden (Ordnungsschemata, Konstruktionskataloge usw.) zur Anwendung kommen - auch die in DIN 28004 angebotenen Informationen sind im Sinne eines Lösungskatalogs zu werten. Wie im vorhergehenden Schritt liegt die Chance der Innovation in der Abkehr von vorgefertigten Lösungen, im Falle der Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen wird hier wohl der intensivste Kontakt zwischen Verfahrenstechnikern und Maschinenbauern innerhalb des Projektteams herrschen.

Durch die technisch wirtschaftliche Optimierung der konstruktiven Umsetzung der erarbeiteten Wirkstrukturen im Sinne der Arbeitsinhalte der ersten Unterpunkte der Entwurfsphase (Bild 4) existieren die für das Erarbeiten des verfahrenstechnischen Fließbildes notwendigen Informationen:

- Alle für das Verfahren erforderlichen Apparate und Maschinen und die Hauptfließlinien (Hauptrohrleitungen, Haupttransportwege)
- Benennung und Durchflüsse bzw. Mengen der

Ein- und Ausgangsstoffe

- Benennung von Energie und Energieträgern
- Charakteristische Betriebsbedingungen

Über diese Informationen hinaus existieren bei einer interaktiven Arbeit Darstellungen und Dimensionierungsgrundlagen zu neuen Konstruktionen, wie dies in **Bild 9** am Beispiel der oben behandelten Reaktionsmühle gezeigt ist.

Ausarbeitungsphase

Mit der Ausarbeitung des verfahrenstechnischen Fließbildes im Rahmen der Entwurfsphase wird eine alle apparatebaulichen und maschinenbaulichen Komponenten umfassende Darstellung der zu entwickelnden verfahrenstechnischen Maschine realisiert. Dieses Arbeitsergebnis bildet nach nochmaliger Bewertung und Anpassung anhand der aktualisierten Anforderungsliste die Grundlage für die Ausführung der Maschine und Anlage. Im Fall der verfahrenstechnischen Maschine ist dies im wesentlichen die maschinenbaulich-fertigungstechnische Entwicklung der einzelnen Komponenten, die z.B. in Bild 3 unten nicht dargestellt ist. Die Darstellung einer solchen Entwicklung in einem R&I-Fließbild ist unter Umständen nicht mehr angebracht.

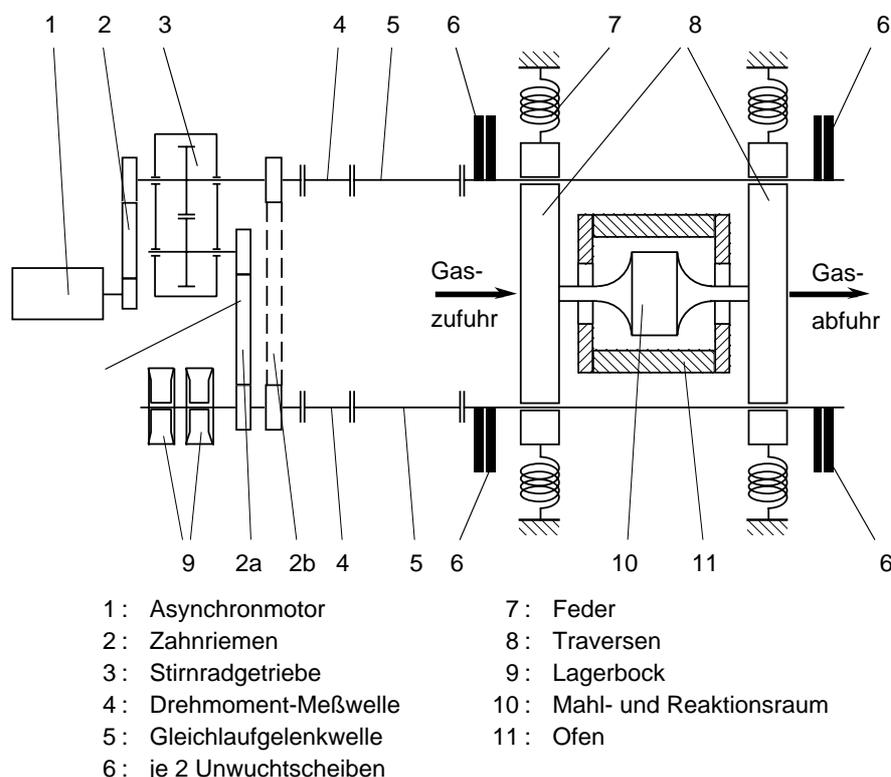


Bild 9: Prinzipskizze der Reaktionsmühle zur Hydrochlorierung von Ferrosilizium zu Trichlorsilan/11/

3 Anwendung der Methodik bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen

Die Erarbeitung einer interdisziplinären Methodik zur Produktentwicklung auf dem Gebiet der verfahrenstechnischen Maschinen ist der methodische Rahmen für den Sonderforschungsbereich 180, eine Reihe von Projekten befassen sich mit dem Entwicklungsprozeß selbst und seiner Modellierung /2, 6, 9, 10/, seiner Unterstützung durch EDV-Systeme, der Qualitätssicherung und der Werkstofftechnik in verfahrenstechnischen Maschinen. In einer beachtlichen Anzahl von Projekten wurden prozeß- und maschinenorientierte Untersuchungen durchgeführt, die sich auf die Realisierung, Verbesserung oder Erweiterung verfahrenstechnischer Prozesse durch Anwendung von Maschinen beziehen. Anhand einiger Beispiele aus diesen Prozessen soll eine kritische Betrachtung zur Anwendung der oben dargestellten Entwicklungsmethodik durchgeführt werden.

3.1 Beispiel 1: Entwicklung eines Hochgeschwindigkeits-Windsichters

Bei diesem Beispiel sei die Konzeptions- und die Dimensionierungsphase besonders betrachtet. Die verfahrenstechnische Aufgabe ist die Entwicklung eines Klassierprozesses für Partikel mit einer Trenngrenze von 1 µm. Die Funktionsstruktur des Sichtvorgangs wird aus den Hauptschritten des Prozesses (Bild 4) detailliert aufbereitet und als Flußbild für den Stoff- und Energiefluß im Klassierungsprozeß in **Bild 10** dargestellt. Der Unterschied dieser funktionsbezogenen Struktur zum Grundflußbild ist offensichtlich, im vorliegenden Fall führte diese auf die physikalische Grundfunktion "Partikel in unterschiedliche Richtungen beschleunigen" mit der Aufgabe der Suche nach entsprechenden Kräften. Ein Funktionskatalog physikalischer Effekte zur Erzeugung von Kräften und seine Auswertung bezüglich ihrer Anwendung zur Beschleunigung von Partikeln führt zu dem in **Bild 11** dargestellten Zusammenhang der Kraftgrößen in Abhängigkeit von den Partikelgrößen - sich überschneidende Linien deuten auf Kraftkombinationen hin, die für eine Klassierung genutzt werden können. Beispielsweise bildet im Korndurchmesserbereich 1 bis 10 µm die Kombination der (volumenabhängigen) Zentrifugalkraft (3) mit der (flächenabhängigen) laminaren Strömungskraft (6) einen Klassiereffekt. Die Graphen für die Lorenzkraft (7) und die Zentrifugalkraft (3) schneiden sich im Bereich kleiner 0,01 µm - beispielsweise ausgenützt bei der Messung von Mo-

lekularmassen, der Schnittpunkt von Auftriebskraft (2) und Strömungskraft (6) wird bei größeren Partikeldurchmesser in der Flotation genutzt. Das Diagramm enthält auch Kraftkombinationen, die bis heute nicht zur Klassierung genutzt werden, obwohl sie geeignet erscheinen.

Auch in der Entwurfsphase gelang die Gestaltung möglicher neuer Prinzipien für die Erzeugung von Wirkflächen und Wirkbewegungen nur durch eine Rückführung auf Grundfunktionen, wie sie in **Bild 12** am Beispiel der Kräftekombination (3)-(6) gemäß Bild 11 dargestellt ist. Die Ausführung der darin mit "P" bezeichneten Funktionen mit Hilfe eines morphologischen Suchschemas führt zu einer vollständigen Übersicht aller Klassiermöglichkeiten nach diesem Prinzip und enthält alle Wirkprinzipien bekannter Windsichter (**Bild 13**). Im vorliegenden Fall schloß sich eine systematische Auswahl der verschiedenen Lösungsprinzipien und eine Präzisierung der Anforderungsliste für das zu entwickelnde Maschinenelement, den Windsichterrotor, an.

Obleich es sich bei dem vorliegenden Beispiel nur um einen Ausschnitt eines verfahrenstechnischen Prozesses und von vornherein um die Entwicklung einer Maschine geht, wird doch in der Vorgehensweise deutlich, daß die im Bereich der Produktanwendung entwickelten Methoden ein Innovationspotential auch für die Entwicklung des Prozesses bilden. Man erkennt auch die notwendige Zusammenarbeit zwischen Maschinenbau und Verfahrenstechnik im Bereich der Aufgabedefinition, der Entwicklung der Funktionsstruktur und der (hier nicht dargestellten) Bewertung und Auswahl der Lösungen.

3.2 Beispiel 2: Entwicklung eines Reaktionsverdichters für das Recycling von Kunststoffen

Im Gegensatz zum vorhergehenden Beispiel handelt es sich hier um die Entwicklung eines neuartigen verfahrenstechnischen Prozesses zum chemischen Recycling von Kunststoffen mit dem Ziel neuer Produkte, -öle oder -wachse. Die Idee dieses Vorhabens beruht auf der Degradation von Polymeren in überkritischem Wasser, wobei eine thermische und reaktive Zerkleinerung und damit Reduzierung der Molmasse eintritt. Batchversuche in der chemischen Verfahrenstechnik mit Kunststoffgemischen ergaben eine Verflüssigung von bis zu 75% des Aufgabegutes, eine gute Abtrennung anorganischer Materialien und die Reaktionsbedingungen für einen zu entwickelnden

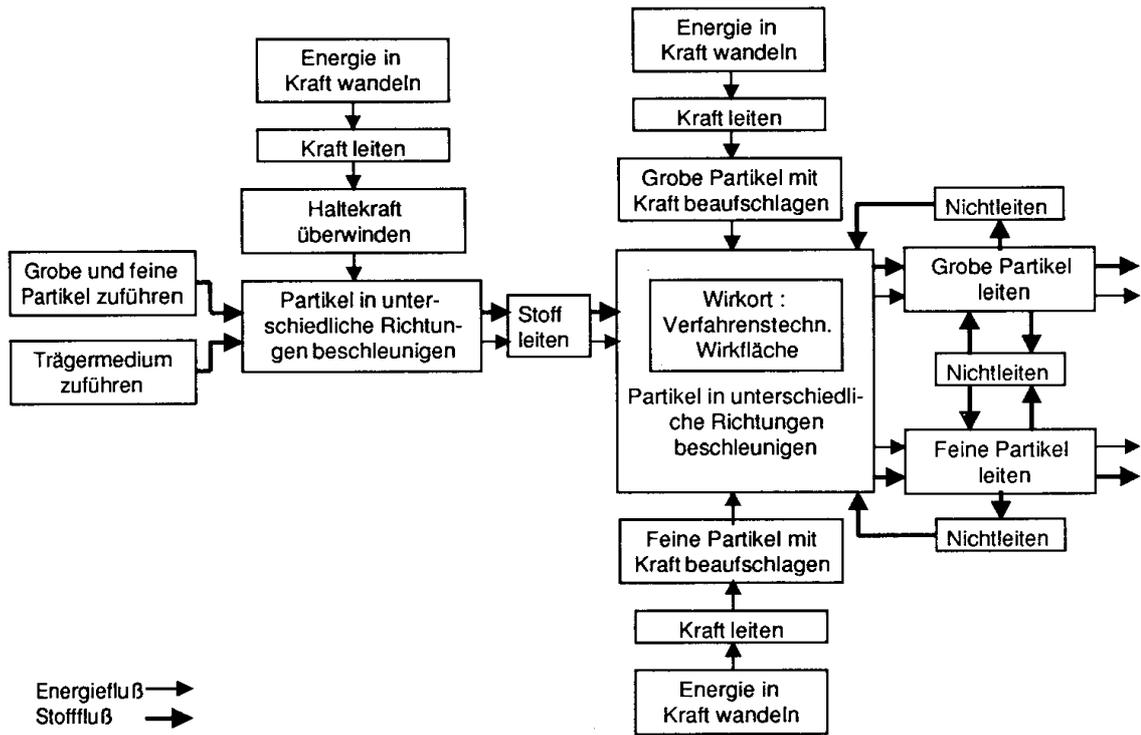


Bild 10: Darstellung des Stoff- und Energieflusses im Klassierprozeß /12/

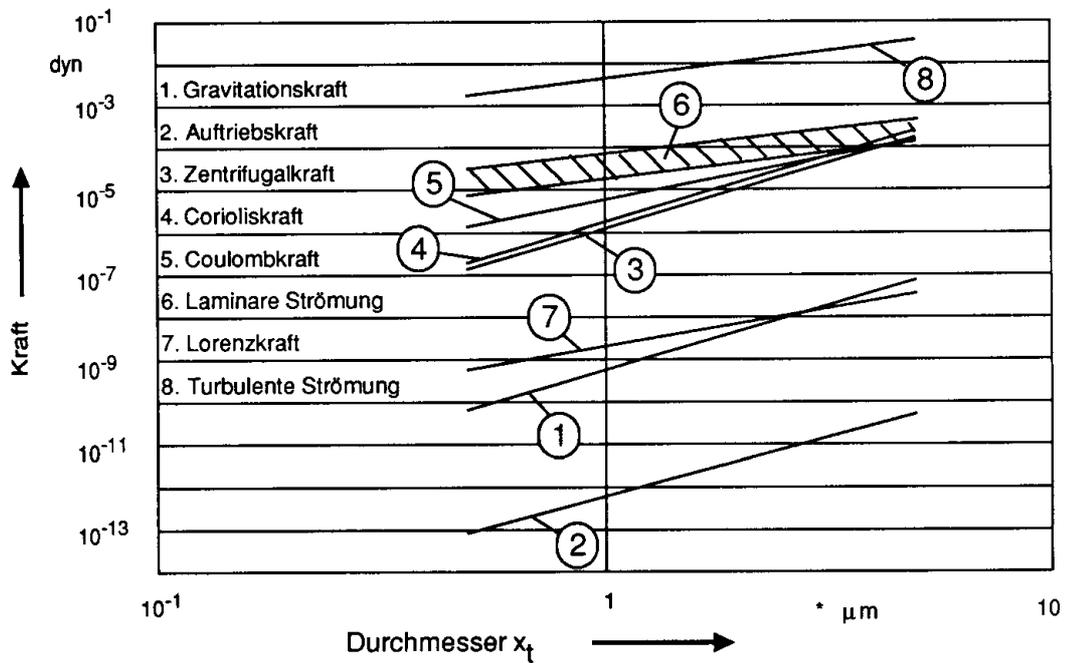


Bild 11: Darstellung der Kraft auf ein Einzelpartikel in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser für verschiedene Potentialkräfte aus dem Bewertungskatalog "Kraftwirkung auf Partikel" /12/

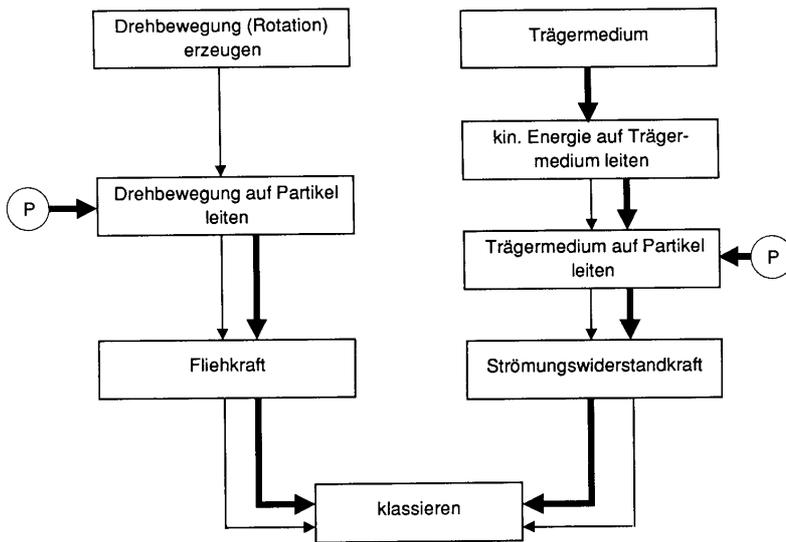


Bild 12: Spezielle Funktionsstruktur für "Partikel durch Strömungswiderstandskraft und Fliehkraft klassieren" /12/

Partikel mit Strömung beaufschlag.		Richtung zur Fliehkraftwirkung		
		↑ ↓	← →	0
Rotation auf Partikel Leiten				0
freie Strömung				0
gerichtete Strömung	axial	0		
	radial		0	0
magnetisches Feld				
elektrisches Feld				
Impuls/Stoß Drehteller		0		
Reibung				

Bild 13: Morphologisches Schema zur Suche nach Lösungskombinationen für "Partikel mit Strömungsgeschwindigkeit beaufschlagt" und "Rotation auf Partikel leiten" /12/

kontinuierlichen Prozeß: 450 bis 500°C und 20 bis 40 MPa Druck. PVC-Anteile im Polymergemisch führen zur Bildung von gasförmigen Zwischenprodukten und Korrosionsangriff auf das Reaktormaterial /14/.

Ergebnis der verfahrenstechnischen Überlegungen ist das Grundfließbild (**Bild 14**), das als Grundlage zur Klärung der Aufgabenstellung und zu einer ersten

Funktionsbetrachtung führt. Ableitbar hieraus ist z.B., daß die Kunststoffe in einen Zustand versetzt werden müssen, in dem sie bei den o.a. Bedingungen gefördert werden können. Die Auswertung der Batchversuche und die Umsetzung in einem Team aus Vertretern des Maschinenbaus und der Verfahrenstechnik führte zu einer detaillierten Vorstellung des Prozesses als Grundfließbild - hier erwies sich die Arbeit mit Fließbildern als vorteilhaft, weil der zu erarbeitende Prozeß ganz eindeutig von den Stoffströmen her definiert ist und zunächst der Bereich des eigentlichen Reaktors (Reaktionsverdichters) mit den integrierten Funktionen des Druck- und Temperatureaufbaus einschließlich der Kreislaufförderung aus dem Prozeß heraus definiert werden mußte. **Bild 15** umreißt dann den eigentlichen Entwicklungsbereich der verfahrenstechnischen Maschine.

Mit diesen Angaben kann eine Funktionsanalyse einsetzen, wie sie in **Bild 16** dargestellt ist. Man beachte, daß das Fließbild Bild 14 Festlegungen von Unit Operations enthält, die in der Funktionsstruktur wieder verlassen werden, um den Weg zu Innovationen zu öffnen - dieser Schritt war von nicht unerheblichen Diskussionen im Entwicklungsteam begleitet. Man erkennt so ganz deutlich, daß die funktionsbezogene Betrachtung die Chance einer weit über die bekannten Elemente, z.B. Pumpen, Ventile usw., gehende Innovation erlaubt und daß sie vor allem die Chance einer Lösung mit der Erfüllung mehrerer Funktionen in einem Funktionsraum gibt. Die weitere Vorgehensweise führte zu dem in **Bild 17** gezeigten Reaktionsverdichter, der aus einer Schwingschieber-Kolbenpumpe, die das erzeugte Fluid-Feststoff-Gemisch in die Reaktionszone fördert, aus in den Eduktstrom integrierten statischen Mischern, aus der Reaktionszone und aus der Strömungsmaschine für die Erzeugung des inneren Kreislaufs besteht. Konstruktiv können die Hochdruckpumpen zur Förderung des Gemisches und zur Erhaltung des Kreislaufs zusammengelegt werden. Im Kurbelgehäuse befindet sich der unterkritische Teil des Reaktionsraums, hier dient das Reaktionsgemisch

aus der Reaktionszone und aus der Strömungsmaschine für die Erzeugung des inneren Kreislaufs besteht. Konstruktiv können die Hochdruckpumpen zur Förderung des Gemisches und zur Erhaltung des Kreislaufs zusammengelegt werden. Im Kurbelgehäuse befindet sich der unterkritische Teil des Reaktionsraums, hier dient das Reaktionsgemisch

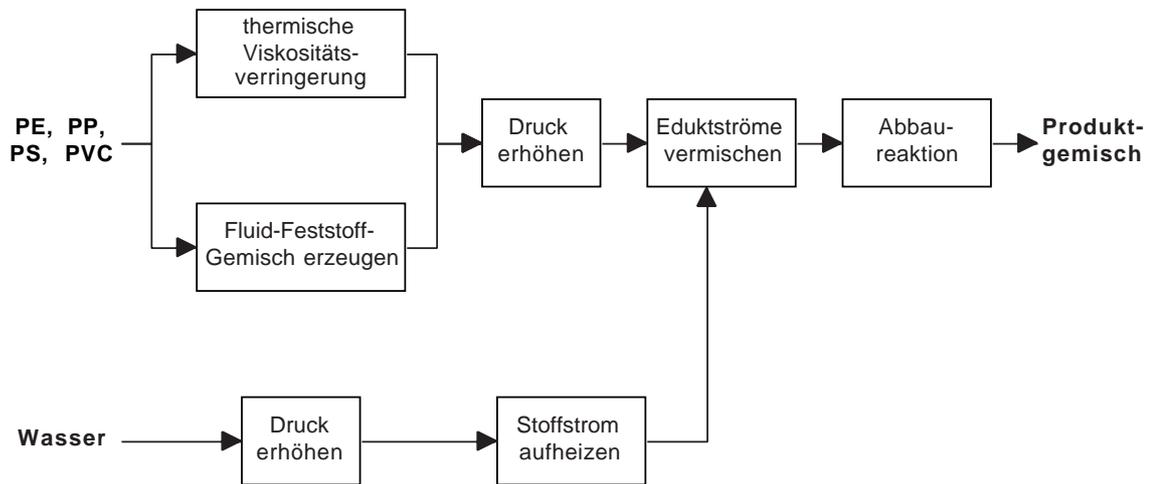


Bild 14: Grundfließbild mit Grundinformationen zum Prozeß "Polymerdegradation" /8/

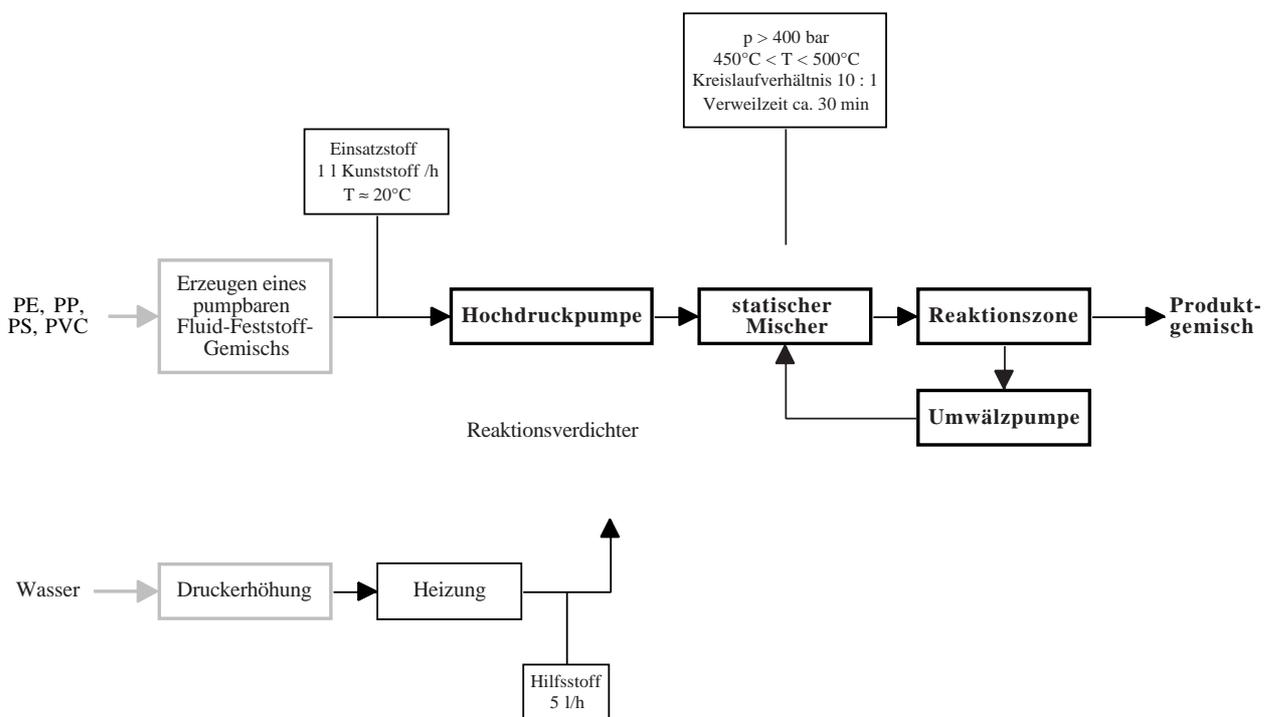


Bild 15: Grundfließbild mit Zusatzinformationen, Entwicklung aus Bild 14 zur Definition des Umfangs und der Anforderungen an einen Reaktionsverdichter /8/

gleichzeitig als Schmiermittel und Sperrflüssigkeit, die einen Leckvolumenstrom durch die konstruktiven Spalte der Pumpe unterbindet. Die Druckdifferenz zwischen Kurbelgehäuse und Reaktionsraum wird über die Strömungsverluste im beheizten Bypass, in dem das Wasser seine überkritische Prozeßtemperatur erreicht, eingestellt. Das Prozeßwasser wird über eine separate Kolbenpumpe in das Kurbelgehäuse eingebracht.

Die Darstellung der Funktionsweise ist als verfahrenstechnisches Fließbild in **Bild 18** dargestellt. Es ist nicht zu übersehen, daß es aus der Analyse der konstruktiven Lösung erstellt wurde und daß die hier ge-

wählte Lösung zur Erhaltung des Kreislaufs einer besonderen Darstellungsart bedarf. Auch hier ist durch die Einbeziehung von methodischen Elementen aus dem Maschinenbau - vorwiegend im Zeitpunkt der Entwurfsphase - eine Lösung für eine verfahrenstechnische Maschine entstanden. Besonders zu erwähnen ist der dritte Partner in diesem Projekt: Die Betriebsbedingungen und der verstärkte korrosive Angriff der Reaktionspartner erforderte die Einbeziehung einer speziellen Werkstoffentwicklung für den Reaktionsverdichter.

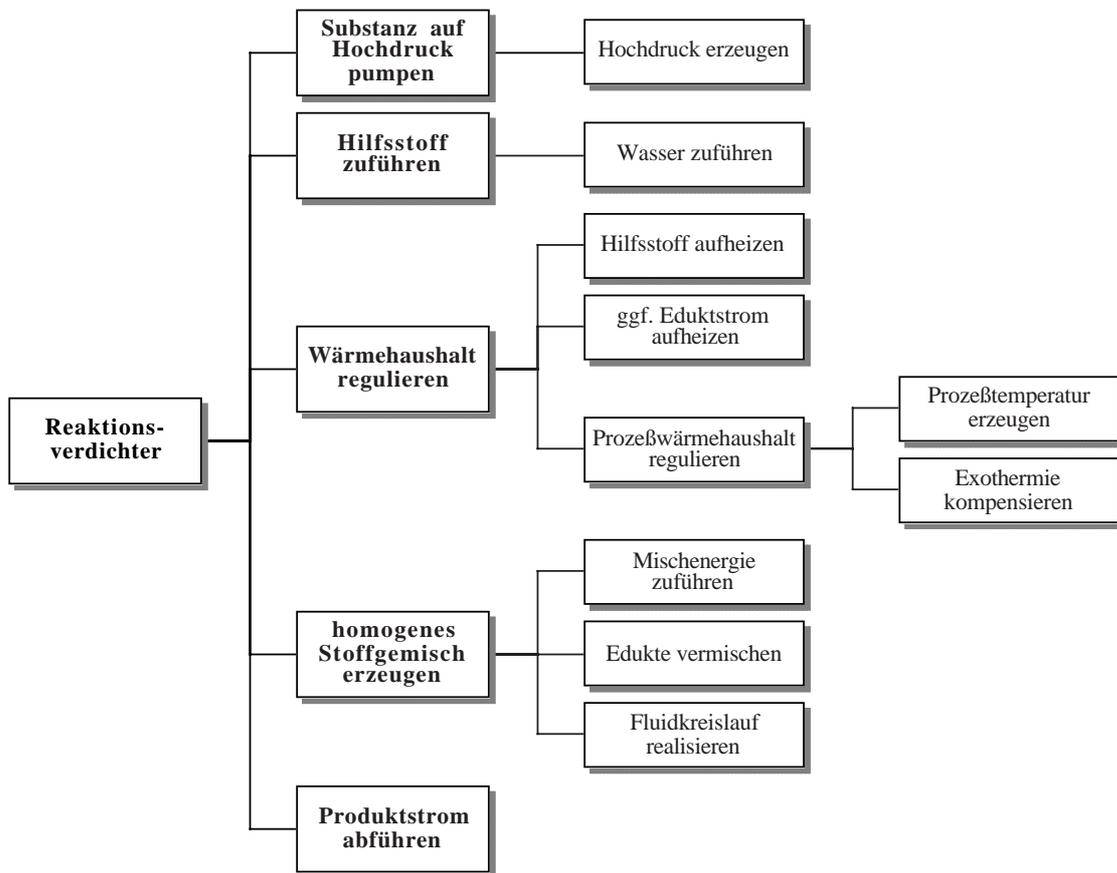


Bild 16: Funktionsstruktur des Reaktionsverdichters für das Recycling von Kunststoffen/8/

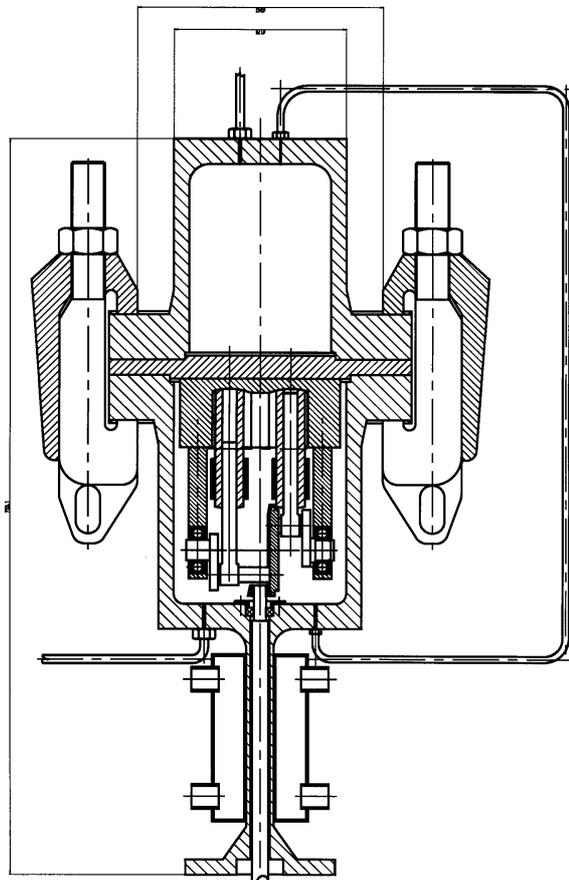
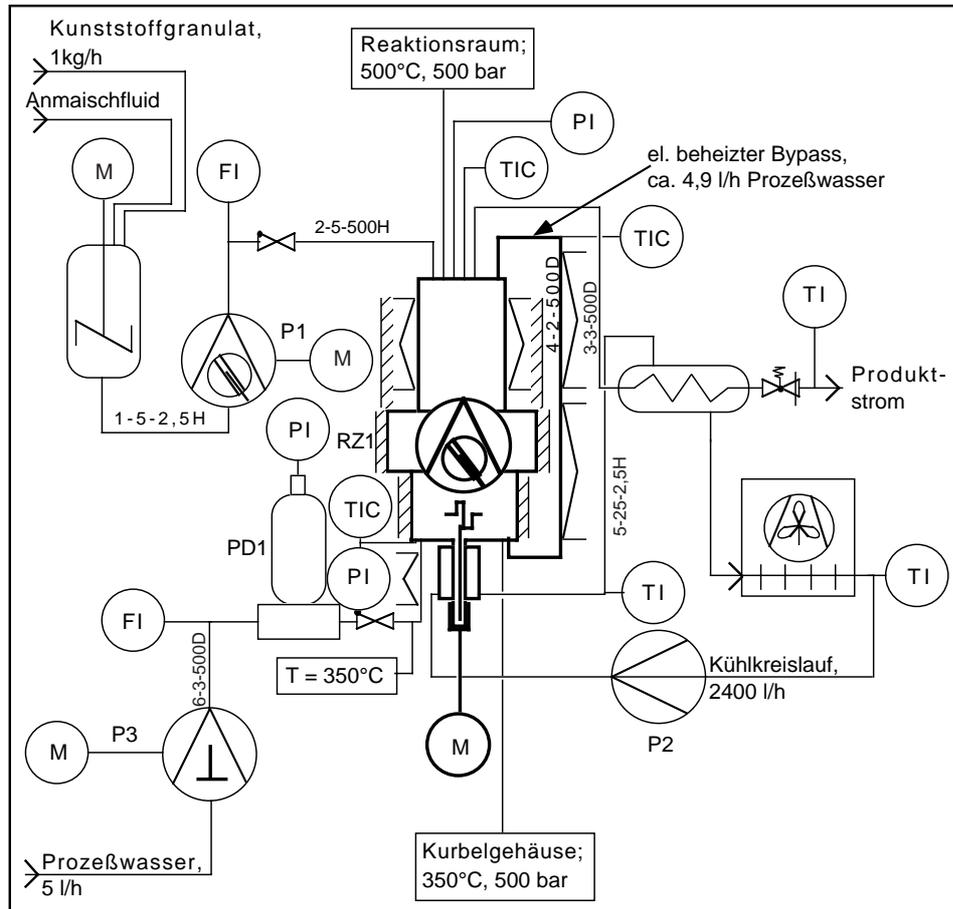


Bild 17: Konstruktionszeichnung der Reaktionszone eines Reaktionsverdichters für das Recycling von Kunststoffen/8/



	P1	P2	P3	PD1	RZ1
Benennung	Schwingschieberkolbenpumpe	Kreiselpumpe	1-Zyl.-Kolbenpumpe	Pulsationsdämpfer	Reaktionszone
Techn. Daten				1l Nennvolumen	3l Reaktionsvolumen
				$p_{zul} = 550 \text{ bar}$	in. Kreislauf 10:1
				Gewicht: 13 kg	
Fördervolumen	1 - 7 l/h gegen 550 bar	2400 l/h	2-8 l/h gegen 550 bar		$V_{\text{Kreislauf}} = 60 \text{ l/h}$
Betriebstemp.	$T = 20^\circ\text{C}$	$T = 35^\circ\text{C}$	$T = 25^\circ\text{C}$		$T = 500^\circ\text{C}$
Werkstoffbez.	2.4856		1.4571		1.4980

Bild 18: Darstellung der Funktionsstruktur des Reaktionsverdichters als verfahrenstechnisches Fließbild /8/

3.3 Beispiel 3: Entwicklung einer Reaktionsmühle

In diesem Beispiel seien die Angaben vervollständigt, die bereits im methodischen Teil des Berichtes angeführt wurde. Aus dem Gedanken der Vereinigung der Prozessschritte Zerkleinerung und chemische Reaktion bei der Herstellung von Chlorsilanen aus Ferrosilicium und Chlorwasserstoff entstand auf dem gleichen Weg der Anwendung konstruktionsmethodischer Vorgehensweisen (**Bild 8**) eine Prototypmühle (**Bild 9**), die eine verfahrenstechnische Optimierung des gleichzeitigen Mahl- und Reaktionsprozesses ermöglichte. Dabei erwies sich, daß der Mahlprozeß zweckmäßigerweise so zu gestalten ist, daß mög-

lichst kein permanenter Freiraum in Strömungsrichtung entsteht und gleichzeitig eine gute Durchmischung von Feststoff und Reaktionsgas anzustreben ist. Dies führte aus den Versuchsergebnissen heraus zu neuen Anforderungen an die Maschine: Beschleunigungen über 45 g und Amplituden über 5 mm führen zu deutlicher Verbesserung von Mahl- und Reaktionsergebnissen, verlangen aber nach einer Umkonstruktion der Mühle nach den Prinzipien von Leichtbau und extrem hohen Dauerfestigkeitswerten. Zur Zeit wird mit diesen Anforderungen in einem durch die DE-CHEMA geförderten Projekt eine Hochleistungs-Reaktionsmühle mit kontinuierlichem Stofffluß entwickelt.

4 Zusammenfassung

Zur Entwicklung von konstruktiven Komponenten und Anlagen für die Verfahrenstechnik mit ihren komplexen Aufgabenstellungen wird am Beispiel der verfahrenstechnischen Maschinen eine systematisch-methodische Vorgehensweise vorgestellt, die eine fachübergreifende Entwicklungsarbeit unterstützt.

Dabei wurde anhand der in der Richtlinie VDI 2221 beschriebenen Methodik zum Entwickeln und Konstruieren Technischer Systeme, der in Richtlinie VDI 2222 beschriebenen Konstruktionsmethodik, von Beispielen zu konstruktionssystematischen Vorgehensweisen in der Verfahrenstechnik, des Einsatzes der Systemtechnik als Problemlösungsmethodik in der Verfahrenstechnik und der DIN 28004 gezeigt, daß alle diese Vorgehensweisen interessante und innovative Elemente enthalten, daß sie aber durch ihre branchenspezifische Ausrichtung und die Belegung durch einseitige Beispiele eine Bearbeitung übergreifender Aufgaben nur schlecht unterstützen. Aus der Kombination der Vorgehensweisen wurde eine Empfehlung gegeben, die bei grundsätzlicher Führung der verfahrenstechnischen Entwicklung durch Fließbilder die Einbeziehung von Methoden innovativer Lösungsfindung aus dem Maschinenbau nutzt, um sowohl die Prozeß- wie die Maschinenentwicklung flexibler zu gestalten.

Die Beispiele zeigen, daß die deutlichen Innovationspotentiale auch zu neuen Forderungen sowohl auf der Prozeß- als auch auf der Maschinenseite führen.

5 Literatur

- /1/ Dietz, P.: Konstruktionssystematische Überlegungen und beanspruchungsgerechtes Gestalten von Maschinen in der Verfahrenstechnik. Konstruktion 45 (1993), Nr. 1, S. 17 - 24. Springer
- /2/ Dietz, P.: Der SFB 180: Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen - eine Übersicht. Berichte und Ergebnisse aus dem Sonderforschungsbereich 180. Kolloquium am 15./16. Februar 1996. Clausthal
- /3/ Blaß, E.: Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse. Otto Salle Verlag, Frankfurt am Main, 1989
- /4/ Richtlinie VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Ausschuß Methodisches Konstruieren. VDI Handbuch Konstruktion

1983

- /5/ Richtlinie VDI 2222: Konstruktionsmethodik; Konzipieren technischer Produkte. VDI Gesellschaft Konstruktion und Entwicklung, Ausschuß Konstruktionsmethodik. VDI Handbuch Konstruktion 1977
- /6/ Kruse, P.: Anforderungen in der interdisziplinären Systementwicklung: Erfassung, Aufbereitung, Bereitstellung. Dissertation; TU Clausthal 1995
- /7/ DIN 28004: Fließbilder verfahrenstechnischer Anlagen, Fließbilderarten, Informationsgehalt. Deutsche Normen 1977
- /8/ Neumann, U.: Konstruktionsmethodische Vorgehensweise zur Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen und Anlagen am Beispiel eines "Reaktionsverdichters" für das Recycling von Kunststoffen durch den Einsatz von überkritischem Wasser. Diss. TU Clausthal 1996
- /9/ Hartmann, D.: Modell zur qualitätsgerechten Konstruktion. Diss. TU Clausthal 1995
- /10/ Schönert, K.; Hoffmann, U.; Dietz, P.: Entwicklung und Erprobung einer Reaktionsmühle für nichtkatalytische Gas-Feststoffumsetzungen während der Mahlung ("Reaktionsmühle"). Sonderforschungsbereich 180, Arbeitsbericht 1991-1992-1993. Clausthal 1993
- /11/ Dietz, P.; Bock, U. : Bestimmung des Leistungseintrags in einer Schwingmühle. IMW-Institutsmittteilung Nr. 17 (1992). Clausthal-Zellerfeld
- /12/ Ebert, J.: Ein Beitrag zur systematischen Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen, dargestellt an der Konzeption und Gestaltung einer Feinstklassiermaschine. Diss. TU Clausthal 1989
- /13/ Rübhelke, L.: Konstruktive Lösungen und Auslegungsmethoden für Hochgeschwindigkeitsabweiseradsichter aus Leichtbauwerkstoffen in der Verfahrenstechnik. Diss. TU Clausthal 1994
- /14/ Hoffmann, U. und Gronwald, P.: Chemischer, thermischer und mechanischer Abbau von Polymeren in einem Hochdruckverdichter mit simultaner Reaktion für das Recycling von Kunststoffen (Reaktionsverdichter). Abschlußbericht zum Teilprojekt 12 des Sonderforschungsbereichs 180. Clausthal 1998