Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *75(2004), 121–153*

Ernst-Otto Reher & Gerhard Banse

Zum Zusammenhang von Empirischem und Theoretischem in den technologischen Wissenschaften – Grundzüge einer Allgemeinen Verfahrenswissenschaft

1 Einführung

Unter technologischen Wissenschaften sollen die Wissenschaften verstanden werden, bei denen der Arbeitsgegenstand (G) dominiert, das Arbeitsmittel (M) und die Arbeitskraft (K) dagegen nur eine untergeordnete Rolle spielen, d. h. G >> M, K (vgl. Fratzscher 2004). Zu diesen Wissenschaften zählen in erster Linie die Verfahrens- und Verarbeitungstechnik sowie die Fertigungstechnik. Es sollen zumindestens auch Energietechnik, Informationstechnik, Werkstofftechnik, Fördertechnik u. a. erwähnt und bedingt dazu gerechnet werden, denn auch in der Materialtechnik spielen Energie- und Informationsfluss als Querschnittswissenschaften (siehe Abb. 1) eine entscheidende Rolle.

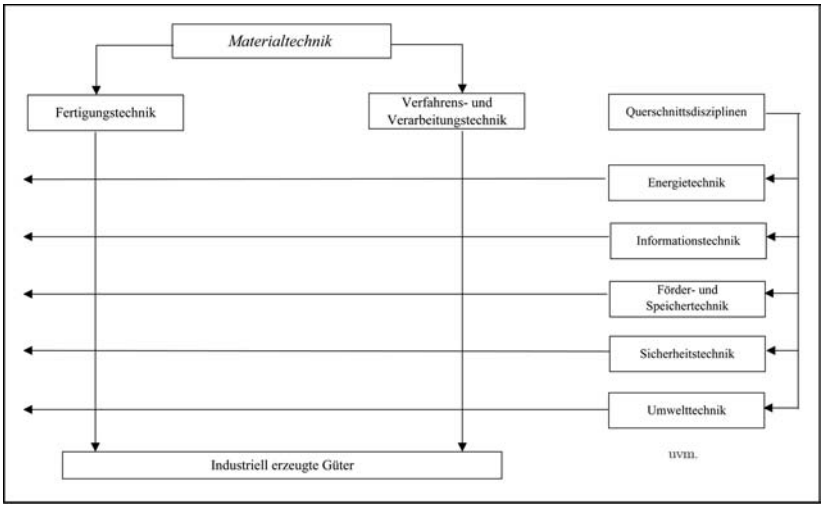

Abb. 1: Übersicht zur Materialtechnik

Das Theoretische in den technologischen Wissenschaften ist dadurch gekennzeichnet, dass mit theoretischen oder teilexperimentellen Daten (z. B. Stoffdaten) analytische, mathematische Modelle das Prozessverhalten allseitig und ausreichend beschrieben und simuliert werden kann, womit ein Beitrag zur Erklärung und vor allem zur Vorhersage entsprechender Prozesse und damit zu deren „Gestaltung“ möglich ist. Das Empirische in den technologischen Wissenschaften ist dadurch gekennzeichnet, dass mit empirischen, experimentell-statistischen Modellen das Prozessverhalten allseitig und ausreichend beschrieben und simuliert werden kann. Empirisches Wissen in theoretisches Wissen zu überführen, aber auch die zielgerichtete Generierung empirischen Wissens zu ermöglichen, ist auch für die technologischen Wissenschaften charakteristisch.

In Tab. 1 ist am Beispiel des Wärmeübergangs bei Dampfkondensation an einer vertikalen Wand der Übergang von empirischen Wissen in theoretisches Wissen dargestellt. Das theoretische Modell unterscheidet sich von dem empirischen Modell lediglich durch den Faktor. Die Übereinstimmung zwischen Empirie und Theorie kann in dem Fall hergestellt werden, wenn im Modell eine bisher unbekannte Oberflächenwellenstruktur des Kondensates einbezogen wird (vgl. Frolow 2003, S. 246ff.). In dem Falle ist jedoch dann eine numerische Modell-Lösung erforderlich.

Empirische Gleichung

$$Nu_e = 1{,}13 \cdot \sqrt[4]{Ga \cdot K_{Kond} \cdot \mathrm{Pr}}$$

Analytische Gleichung

$$Nu_t = 0{,}943 \cdot \sqrt[4]{Ga \cdot K_{Kond} \cdot \mathrm{Pr}}$$

Beachtung der Oberflächenwellenstruktur

Numerische Lösung / Software

$$Nu_n = Nu_e \rangle Nu_t$$

Tab. 1: Beispiel für den Zusammenhang von empirischem und theoretischem Wissen: Wärmeübergang bei der Dampfkondensation an einer vertikalen Wand

An diesem Beispiel soll lediglich der sich ergänzende Zusammenhang zwischen theoretischen und empirischen Wissen verdeutlicht werden.

Oft kann erst theoretisches Wissen in den technologischen Wissenschaften durch vorangegangenes empirisches Wissen erarbeitet werden. Für die Entstehung von theoretischem Wissen in den technologischen Wissenschaften war die Entwicklung anderer Disziplinen erforderlich, wie z.B. die numerische Mathematik, die Computertechnologie, die Materialwissenschaften u. v. a.

Reduktionistische und synthetische (komplex-theoretische) Ansätze waren erforderlich, um den theoretischen Anteil wesentlich voran zu bringen und die Annäherung der technologischen Wissenschaften in theoretischen Punkten vollziehen zu können und die Materialtechnik in einem einheitlichen Konzept gestalten zu können (siehe Tab.; vgl. Reher 2001)(siehe Abb. 2).

Wenn über den Zusammenhang von Empirischem und Theoretischem in den technologischen Wissenschaften reflektiert wird, dann wird einerseits vorausgesetzt, dass dabei kein „naives“ oder vereinfachtes Schema unterstellt wird (etwa hinsichtlich einer „voraussetzungslosen“ Beobachtbarkeit technischer „Phänomene“ oder einer „einfachen“ Verallgemeinerung des Empirischen zu theoretischen Konstrukten). Andererseits sind jedoch die dafür notwendigen gedanklichen Prozesse näher zu charakterisieren, insbesondere die Wechselbeziehungen von Analyse, Synthese/Integration und (Komplexitäts-)Reduktion.

Analyse meint Zerlegung oder Zerstückelung von Zusammengehörendem, die Teilung eines „Ganzen“, die „Auflösung“ eines Gegenstandes, die Zergliederung einer Einheit in eine Vielheit, eines Vorgangs in seine Phasen usw., generell das „Herauspräparieren“ und Fixieren elementarerer, einfacherer Bestandteile, Größen, Effekte, Zusammenhänge, Zustände usw. Im hier verwendeten Zusammenhang geht es weniger um „praktisch-analytische“ Vorgehensweisen (etwa im Rahmen der experimentellen Methode), sondern mehr um ideelle Operationen, etwa als Voraussetzung für Vergleich, Klassifikation, Typisierung usw. (die auch eine Grundlage für die Weiterentwicklung der Allgemeinen Technologie bilden). Die unit operations und die unit processes, aber auch die so genannte „Neun-Felder-Matrix“ des „Systems der technologischen Vorgänge“ (Horst Wolffgramm) bzw. der „Klassifikation der Sachsysteme“ (Günter Ropohl) basieren auf einem derartigen analysierenden gedanklichen „Zugriff“.

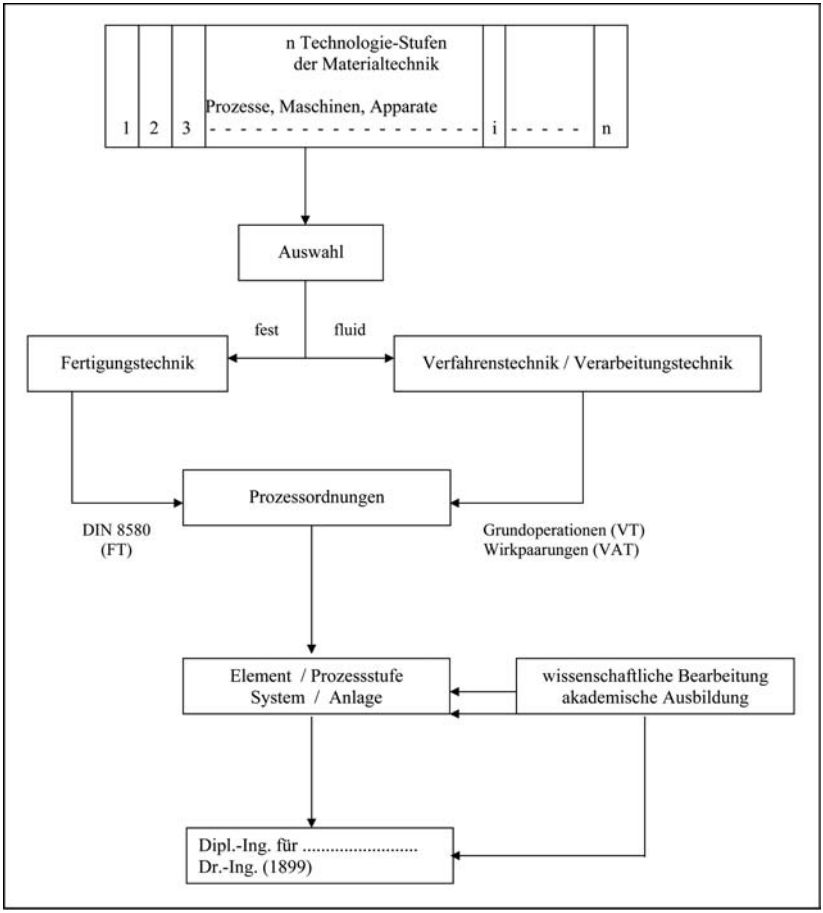

Abb. 2: Gestaltung der Materialtechnik

Analytische Tätigkeiten haben im allgemeinen eine spätere Syntheseleistung zum Ziel, das In-Beziehung-Setzen der durch Analyse gewonnenen „Elemente“, das Zusammenfügen von Teilen zu einem Ganzen („Neuem“), den „Aufbau“ komplizierterer Zusammenhänge (siehe Abb. 3). Deutlich ist, dass analytisches und synthetisches (synthetisierendes) Denken nicht zu trennen sind: „Obwohl analytische und synthetische Tätigkeiten in allen Wissenschaften eine entscheidende Rolle spielen, lässt sich in allgemeiner Form über die Operation der A[nalyse] und Synthese verbindlich recht wenig sagen, da

diese Operationen sehr stark vom Gegenstand und von den Forschungsmethoden der jeweiligen Einzelwissenschaften abhängen“ (Wessel 1991). Diese Vielfalt trifft auch auf die Technikwissenschaften insgesamt – und damit auch auf die verfahrenbezogenen – zu. Hier seien exemplarisch lediglich zwei Überlegungen hervorgehoben.

Erstens: Ausgehend von einer vorgegebenen Zielstellung oder Zwecksetzung bzw. vorgängigen Aufgabenstellung,[1] die als (technische) Funktion oder (technisches) Verhalten möglichst präzise formuliert werden muss (z. B. in Form eines Pflichtenhefts), besteht die Aufgabe des Entwurfshandelns (systemtheoretisch) in der Synthese einer Menge von geeigneten Elementen zu einem (technischen Sach-) System mit einer Struktur, das diese Funktion oder dieses Verhalten (bei Beachtung vielfältiger Randbedingungen) zu erfüllen bzw. zu realisieren gestattet (funktionserfüllende Struktur). Diese – als technisches „Gebilde“ oder „Sachsystem“ „vergegenständlichte“ – (funktionserfüllende) Struktur muss, mit anderen Worten, in der Lage sein, den beabsichtigten „Übergang“ eines „Arbeitsgegenstandes“ („Operand“) von einem Zustand Z_1 („Ausgangszustand“) in einen Zustand Z_2 („Endzustand“) zu bewirken („Transformationsprozess“, „Übergangsfunktion“ – vgl. Hubka 1973, S. 12f.). Dieses „Entwurfshandeln“ ist als eine konkretisierende Vorgehensweise aufzufassen: vom abstrakten Prinzip (z. B. als Idee einer funktionserfüllenden Struktur) ausgehend wird (häufig über Zwischenstufen, z. B. als Wirkpaarung), gestaltend, dimensionierend, bemessend und optimierend zum funktionsfähigen technischen (Sach-)System bei Berücksichtigung vielfältiger „Randbedingungen“ vorangeschritten.

Zweitens: Im Zusammenhang mit dem damit verbundenen synthetisierenden Problemlösungsprozess verweist Herbert Hörz auch auf die Rolle von (gelenkter) Phantasie und hebt hervor: „Es geht also um gelenkte Phantasie mit Hilfe des analytisch-synthetischen Denkens, um Problemlösungen (Intuitionen) zu erreichen. [...] Drittens ist das Problem in seine Elemente zu zerlegen. Je weiter diese Zerlegung geht, desto mehr Kombinationsmöglichkeiten für neue Synthesen existieren (siehe Abb. 4). Danach kann viertens das Möglichkeitsfeld der Elementkombinationen aufgestellt werden. Dabei entstehen für die gelenkte Phantasie Restriktionen dadurch, daß bestimmt werden muß, ob das, was wissenschaftlich möglich und technisch-technologisch realisier-

1 Damit ist über den Charakter des „Vorgegeben-Seins” noch nichts ausgesagt, denn diese Vorgabe kann eine „äußere” (z. B. über einen Auftraggeber), aber auch eine „innere” Quelle (z. B. als „Gespür” eines Erfinders für Mögliches und Notwendiges) besitzen.

bar ist, auch ökonomisch machbar, gesellschaftlich wünschenswert und durchsetzbar und human vertretbar ist“ (Hörz 1986, S. 40).

In beiden Gedankengängen wird nicht nur auf die Einheit von analytischem (analysierendem) und synthetischem (synthetisierendem) Denken verwiesen, sondern es wird zugleich deutlich, dass es dabei stets auch um einen (bewussten, „planvollen“) Umgang mit Vielfalt und Vielheit geht, zumeist als „Komplexität“ bezeichnet. Umgangssprachlich meint man damit zumeist die Anzahl der „Elemente“ bzw. „Teile“ einer umfassenderen Einheit („System“, „Ganzes“) einschließlich der zwischen ihnen bestehenden Beziehungen, Wechselwirkungen, Interdependenzen usw. Im hier interessierenden Zusammenhang ist jedoch – etwas anders – damit gemeint, welches „Maß“, welcher „Umfang“ der (tatsächlichen oder vermuteten) Relationen zu berücksichtigen, in die Überlegungen einzubeziehen usw. ist eine nichttriviale Aufgabe. „Alles“ zu bedenken oder zu berücksichtigen ist aus vielfältigen Gründen – ontologischer, kognitiver, methodologischer, (zeit-)ökonomischer, ethischer u. a. Art – nicht möglich. Also muss Komplexität – um die zu bearbeitende Aufgabe „operationalisierbar zu machen – „reduziert“ werden. „Die Nennung von Bedingungen, die [...] zu berücksichtigen und zu kontrollieren sind, muß in ihrem Umfang handhabbar bleiben“ (Poser et al. 1997, S. 92). In dieser Hinsicht schrieb bereits vor fast dreißig Jahren – bezogen auf die Chemie – das Mitglied unserer Sozietät Wolfgang Schirmer: „Die Chemie hat es bei fast allen wissenschaftlich und technisch interessierenden Reaktionen mit sehr komplexen Systemen zu tun. Wie wir im Zentralinstitut für physikalische Chemie bereits bei der Modellierung eines einfachen technischen Vorgangs, nämlich der Adsorption und der Desorption von Kohlenwasserstoffen an Zeolithen, feststellen konnten, wächst die Zahl der in technischen Prozessen zu berücksichtigenden Parameter so stark an, daß stets Vereinfachungen vorgenommen werden müssen, um das Modell für die Praxis ‚handhabbar’ zu machen. *Allein die Auswahl der vorzunehmenden Vereinfachungen stellt oft ein wissenschaftliches Problem von hohem Range dar*“ (Schirmer 1975, S. 23 – H.d.V.; E.-O. R; G. B.).

Diese „Komplexitätsreduktion“ enthält einerseits eine wissenschaftliche Komponente („Welche Reduktion ist vom gegenwärtigen wissenschaftlichen und technischen Entwicklungsstand her gerechtfertigt und legitim, d. h. führt – absehbar – zu keiner ‚Verzerrung’ des technischen Erscheinungsbildes bzw. relevanter Zusammenhänge?“). Andererseits basiert sie auf einem individuellen „Zugriff“, vor allem auf dem Auswahl-, Bewertungs- und Entscheidungsverhalten des Bearbeiters, d. h. auf dem bewussten oder spontanen,

reflektierten oder unreflektierten „Ausfüllen“ oder „Ausschreiten“ vorhandener (auch normativer) Räume innerhalb des wissenschaftlichen Arbeitens.

Allerdings haben es die Technikwissenschaften nicht nur mit dem Problem der notwendigen Reduzierung von Komplexität, sondern auch mit dem Gegenteil, der notwendigen „Erweiterung“ von Komplexität zu tun, und zwar mindestens in zweierlei Hinsicht: Einerseits muss oftmals unter Informationsmangel bzw. bei unvollständiger bzw. „unscharfer“ Information vorgegangen werden, d. h. zu Beginn des (als Planungsvorgang verstandenen!) wie auch immer gearteten technischen Prozesses sind zwar viele, aber möglicherweise z. B. nicht alle relevanten Informationen verfügbar, so dass diese – wenn möglich – erst noch zu generieren sind. Andererseits muss häufig auf sich verändernde oder neue Zielvorgaben bzw. „Rand“bedingungen vor allem wissenschaftlicher, technischer, politischer, ökonomischer oder juristischer Art reagiert werden („Dynamisierung der Begleitumstände“), die zu einer Veränderung bzw. Vergrößerung des zu Berücksichtigenden führen.

So erweisen sich Empirisches und Theoretisches nicht nur eingebunden in das vielfältige analytisch-synthetische Denken, sondern auch in die Beziehungen von Komplexitätsreduktion und Komplexitätserweiterung.

2 Zur Zerlegung und Zusammensetzung technologischer Objekte

Für die Materialtechnik war eine „grobe“ reduktionistische und synthetische Erkenntnisgewinnung bis ca. 1960/70 typisch (siehe Abb. 3 und 4), und erst später ist eine „Verfeinerung“ reduktionistischer und synthetischer Erkenntnisgewinnung an technologischen Objekten feststellbar. Die Voraussetzungen zur „Verfeinerung“ wurden im Wesentlichen durch die oben genannten Wissenschaftsdisziplinen möglich.

System Materialtechnik A						
1	2	- - - - - - - - - - -	n	n + 1	- - - - - - - - -	i

Zerlegung des Systems A in i-Elemente:

- Grundoperationen
- Wirkpaarungen
- Teilprozesse
- Mikroprozesse
- Nanoprozesse
- Molekulare Prozesse

Synthese der Elemente zu technologischen Systemen A_i*:*

- Technologisches System A_1 (Teilmenge aus A)
- Technologisches System A_2 (Teilmenge aus A)

  .
  .
  .
- Technologisches System A_n (Teilmenge aus A)

  .
  .
  .

  usw.

Abb. 3: Zerlegung und Synthese technologischer Objekte

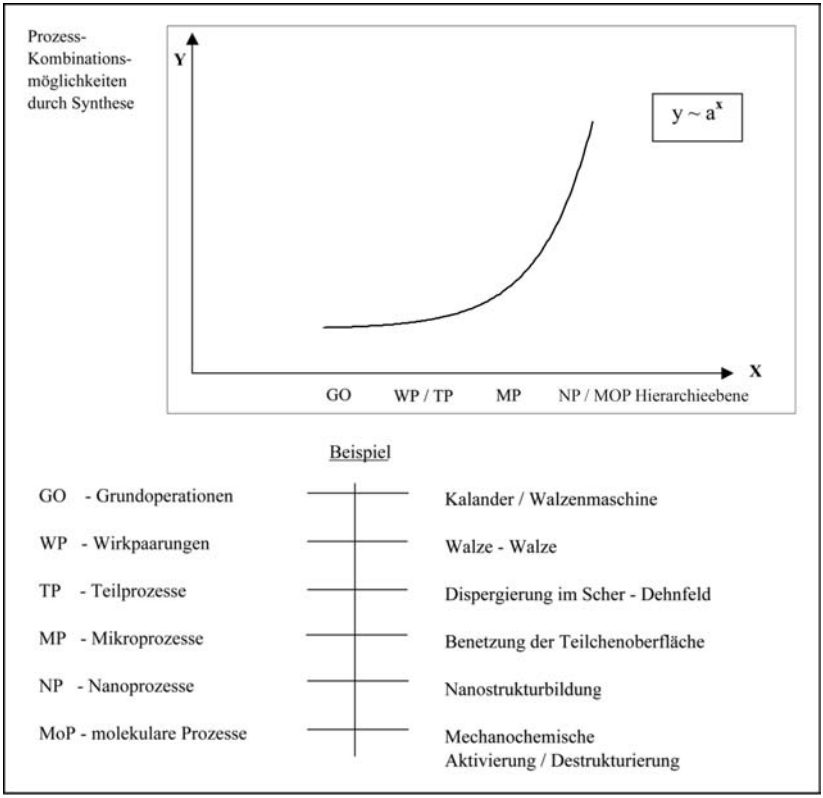

Abb. 4: Prozess-Kombinationsmöglichkeiten durch Synthese (Y) in Abhängigkeit von der Prozess-Hierarchieebene (X)

Die heutige Aggregierung des Wissens der Materialtechnik kann in drei komplexen Modulen vorgenommen werden (siehe Tab. 2 und Abb. 5):

- Stoffmodul;
- Prozessmodul;
- Systemmodul.

Bis ca. 1960 / 70

Erkenntnismethode	*Technologisches Verfahren*
Reduktion	Stoffkennzeichnung Grundoperationen
Synthese	Verfahrensschema

Ab ca. 1970

Reduktion	Stoffkennzeichnung Molekulare Prozesse Mikroprozesse Teilprozesse Makroprozesse Grundoperationen
Synthese (Komplexitätstheorie)	Verfahrensablauf Verfahrensstrukturierung Verfahrensoptimierung uvm.

In der Gegenwart

Gegenstandsbetrachtungen:

- Stoffmodul
- Prozessmodul
- Systemmodul

Tab. 2: Reduktion und Synthese in den Materialtechnologien

Die ständige Ausgestaltung der Module erfolgt sowohl durch empirisches als auch durch theoretisches Wissen der Materialtechnik. Der Trend aber der Theorie einen größeren Stellenwert heute einzuräumen wird durch die ver-

stärkte interdisziplinäre Arbeit gefördert und dokumentiert sich in der Entwicklung immer neuer „Werkzeuge“ (vgl. Hartmann 2003; Öhlschlägel 2004) und im Schrifttum der Materialtechnik. Das Konzept der Mikroprozesse (Elementprozesse), erst realisierbar durch die oben genannten Wissenschaftsdisziplinen, gestattete erstmals eine neuartige Gliederung der Prozesse der Materialtechnik (vgl. Reher 1981, 2002). Dieses Konzept integrierte damit auch die Reaktionstechnik in die Verfahrenstechnik und ermöglichte eine einheitliche Betrachtung der Verfahrens- und Verarbeitungstechnik und Fertigungstechnik.

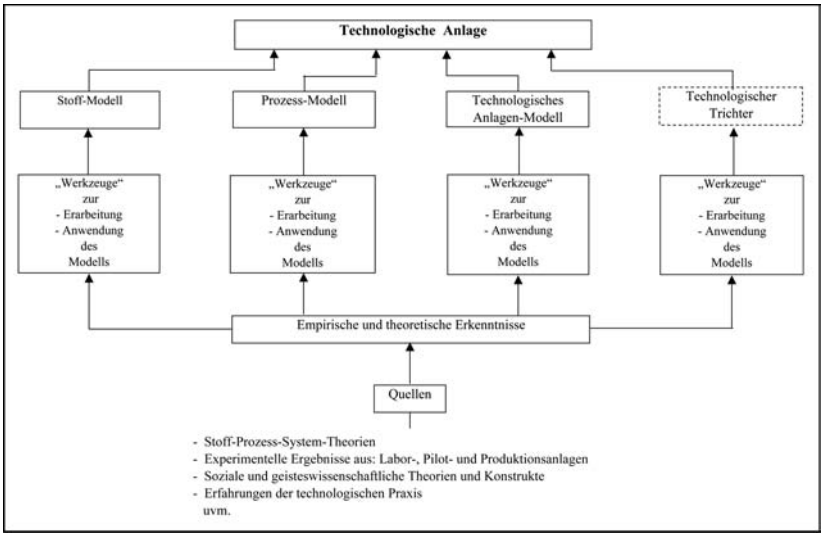

Abb. 5: Modelle zur Technologieentwicklung sowie zum Bau, Betrieb und Recycling technologischer Anlagen

Anhand der Stoff-, Prozess- und Anlagenmodelle (vgl. Abb. 5) wird der Zusammenhang von Theoretischem und Empirischem deutlich, auch, welche Weiterentwicklungen der drei Module durch die Technologien am Beginn des 21. Jh.s erkennbar gemacht werden können.

3 Die hierarchische Bearbeitung technologischer Verfahren der Materialtechnik

Für die Verfahren der Materialtechnik (physikalische, chemische, biologische oder gemischte Verfahren) sind drei Module von ausschlaggebender Be-

deutung (siehe Abb. 6), über die Wissen für Verfahrensentwicklung, -projektierung und Anlagenbau, für Verfahrensbetrieb und –recycling bereitgestellt werden muss. Dabei ist in allen drei Modulen sowohl empirisches als auch theoretisches Wissen enthalten und bildet die Grundlage für die Verfahrensrealisierung.

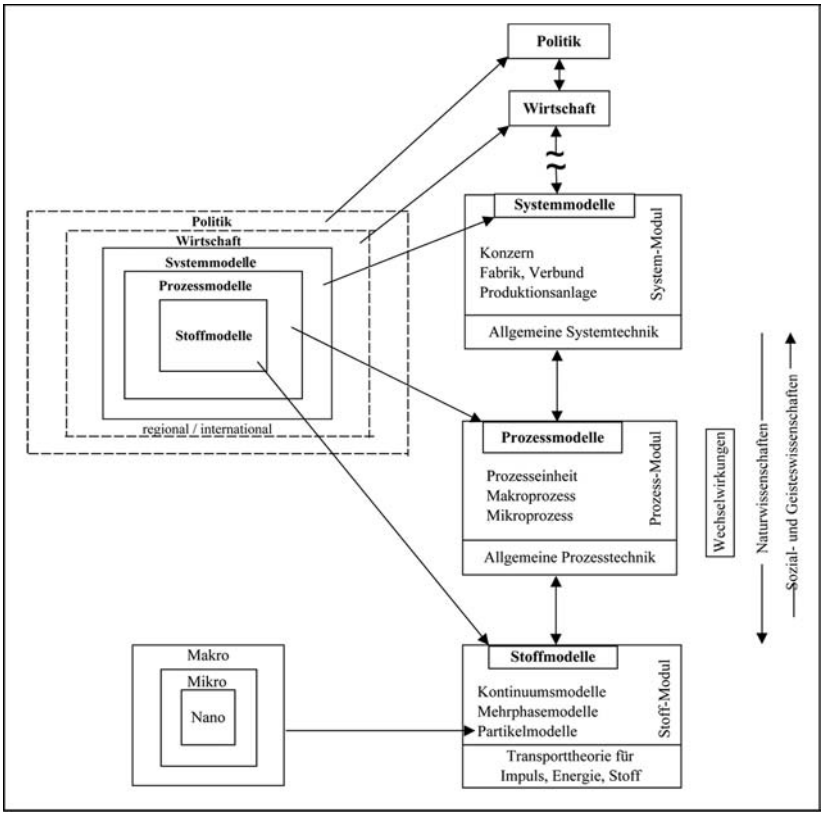

Abb. 6: Hierarchie der Materialtechnik

Die Tendenz, dass sich das Verhältnis von empirischem Wissen (E) und theoretischem Wissen (T) ständig ändert, kann über der Zeit $\frac{E}{T}(t)$ durch Analysen der Lehr- und Fachbücher und anderer wissenschaftlicher Publikationen des Fachgebietes der Materialtechnik nachgewiesen werden. Dabei wird festgestellt, dass das theoretische Wissen in den letzten Jahren schneller anstieg als

das empirische Wissen. Besonders gravierenden Einfluß auf das Verhältnis ($\frac{E}{T}$) haben die Computerwissenschaften und die Materialwissenschaften.

3.1 Zum Stoffmodul

Die Naturwissenschaften, aber auch die Technikwissenschaften (Mechanik, Thermodynamik, Rheologie, Werkstofftechnik) liefern Stoffdaten und prozessabhängige Stoff-Funktionen für die Materialtechnik. Die Stoffdaten werden oft als

- Kontinuumsmodelle,
- Mehrphasenmodelle,
- Partikelmodelle

präsentiert.

Zwischen den drei Modellformen existieren Übergangsformen, die je nach technologischer Aufgabenstellung benutzt werden können, z. B. Quasikontinuumsmodelle, wenn die Partikelgröße (d_p) wesentlich kleiner ist im Vergleich zu den prozessbestimmenden Abmessungen der technologischen Ausrüstung ($d_p << d_a$).

Höchste Anforderungen an die Prozesstechnik (Handhabungstechnik) werden heute durch die Nanotechnologie gestellt. In dieser Technologie besonders ist die Verschmelzung von Stoff (Teilchen) und Prozess deutlich ausgeprägt.

Die Ermittlung der Stoffdaten und Stoffmodelle erfolgt fast ausschließlich auf experimentellem Wege. In einigen ausgewählten Fällen liefert die statistische Physik grundlegende Gesetzmäßigkeiten für relativ einfache Stoffe. Da aber die Materialtechnik kompliziert aufgebaut und strukturierte Stoffsysteme bearbeitet, werden fast ausschließlich experimentelle Verfahren verwendet. Nicht selten können nur prozessabhängige Stoffdaten ermittelt werden.

Die Entwicklung der modernen Meßtechnik ermöglicht jedoch immer öfter Stoffdatenermittlungen auch unter extremen Prozessbedingungen der Materialtechnik, dabei ist die eigentliche Meßtechnik gekoppelt mit elektronischer Datenerfassung, -verarbeitung, -speicherung sowie Datenübertragung in das technologische System zur Steuerung von Prozessen in den Anlagen der Materialtechnik (vgl. Reher 2000; Reher/Göttfert/Sunder 2002).

Der Aufwand zur Ermittlung der Stoffdaten und Stoffmodelle wächst mit der Komplexität und Strukturierung der Erzeugnisse in technologischen Verfahren. Nicht selten gehören derartige Erkenntnisse zum „know-how“ der

Firmen und werden deshalb auch nicht veröffentlicht, auch nicht zur Prioritätssicherung in Patenten (z. B. Rheopexie von Streichmassen bei der Papierbeschichtung im vorigen Jahrhundert in den USA). Sehr oft stellt sich in der technologischen Praxis die Frage „Warum können die das und wir nicht?“. Die Ursache ist nicht selten in der unzureichenden Stoffkennzeichnung unter äußeren und inneren Einflüssen zu suchen. Die Bereitstellung präziser Stoffdaten und –modelle der Materialtechnik wird immer mehr zum technologischen „Nadelöhr“ bei der Verfahrensentwicklung.

„Werkzeuge“ in Form von Datenbanken, empirischen Formeln, Datenblättern u. v. m. werden ständig entwickelt. Für einzelne Stoffgruppen existieren Datensammlungen, Formeln u. v. m. (vgl. z. B. Fratzscher/Picht 1993).

Welche grundsätzlichen Anwendungen erfahren die Stoffmodelle? Sie dienen der Komplettierung der Bilanzgleichungen (vgl. Reher 2002) und der Struktur-Eigenschafts-Bestimmung. Die Materialwissenschaften entwickeln stets neue Methoden, Techniken, Geräte zur Stoffkennzeichnung und sind somit eng mit den Prozessen der Materialtechnik verbunden.

3.2 Zum Prozessmodul

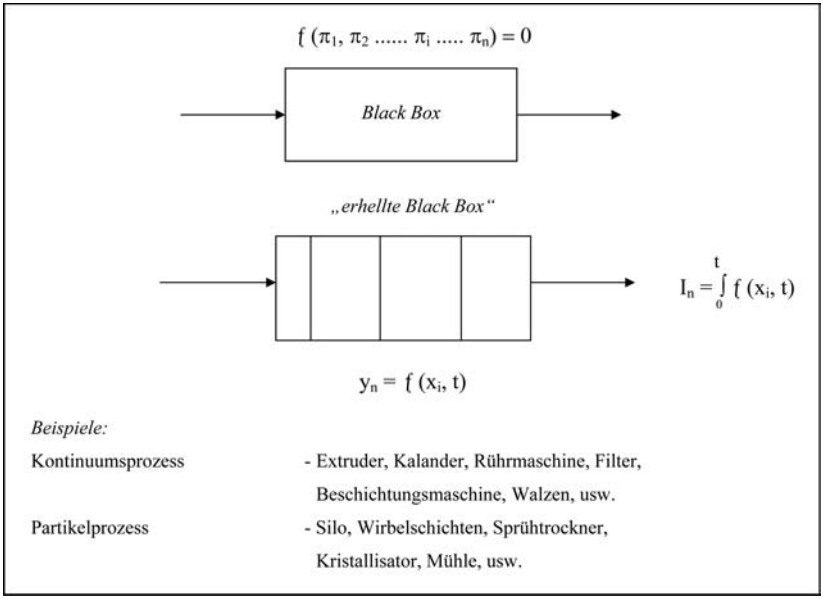

Abb. 7: Modelltypen

Dieser Modul beschränkt sich auf einzelne Apparate, Maschinen, Vorrichtungen in einem technologischen Verfahren der Materialtechnik (Grundoperationen, Trockner, Filter, Mühle, Rührkessel usw.). In früheren Jahren dominierte die „black box-Methode“ (siehe Abb. 7) zur Untersuchung der Grundoperationen.
Ähnlichkeitstheoretische, experimentellstatistische Korrelationen wurden für die Prozesseinheiten (Makroprozesse) erarbeitet und zur Weiterverwendung bei der Maßstabsübertragung („Scale-up“) benutzt (vgl. Zlokarnik 2002). Die Fachliteratur weist eine Fülle von derartigen Korrelationen aus mit der der Ingenieur seine anstehenden Dimensionierungsaufgaben lösen mußte. Das Promotionsgeschehen bis in die sechziger Jahre des vorigen Jahrhunderts war in der Materialtechnik wie folgt gekennzeichnet:

- Ableitung von Ähnlichkeitskennzahlen (π_i) aus einem z. Z. nichtlösbaren Differentialgleichungssystem des Prozesses oder mittels Dimensionsanalyse;
- Bereitstellung von Messtechnik zur Erfassung aller unbekannten Größen in den Ähnlichkeitskennzahlen (oft Eigenentwicklung einer Messtechnik erforderlich!);
- Aufbau einer oder mehrer Versuchsanlagen für die Maßstabsübertragung;
- Ermittlung von Ähnlichkeitskennzahlengleichungen (siehe Abb. 7);
- Durchführung eines „Scale-up“ und Dimensionierung einer Produktionseinheit und somit Überprüfung der Dimensionierungsvorschrift auf Brauchbarkeit;
- Eingang des Ergebnisses in Fach- und Lehrbücher.

Durch die Reduktion der technologischen Prozesseinheiten auf Teilprozesse (Mikro-, Elementprozesse) wurde es möglich durch analytische Berechnungsverfahren Teillösungen zu erhalten und später, beginnend in den dreißiger und vierziger Jahren des vorigen Jahrhunderts, numerische Lösungen von Gleichungssystemen der Materialtechnik zu erhalten (siehe Tab. 3). Mit der Entwicklung leistungsfähiger Computer können heute für komplizierte nichtlineare partielle Differentialgleichungssysteme numerische Lösungen für Elementprozesse erarbeitet werden (mit BIM 3D-Simulationen in Vorbereitung – vgl. Osswald 2003).

Werkzeuge (eine Auswahl)		
Stoffmodul	*Prozessmodul*	*Systemmodul*
• Theorie und Mess-vorrichtugen für Fluide und Festkörper (Sensoren) • Prüftechnik • Zustandsgleichungen • Empirische Gleichungen • Stoffdatensimulation • Softwarepakete z. B. Win Rheo • Datenblätter • Spezielle Literatur • Datenbanken • Nichtkommerzielle Prüf- und Messtechnik • z. B. wesentliche Materialgleichungen der Kunststofftechnik	• Empirische Korrelationen • Ähnlichkeitskennzahlen – • Gleichungen • Analytische Gleichungen • Numerische Lösungs-verfahren o FDM [x] 1930 – 1940 o (Flow Analysis Network FAN, Finite-Volumen-Methode) o FEM [x] 1960 – 1970 o (Control Volumen Aproach, CVA) o BEM in Vorbereitung für 3D – Simulationen o BIM in Vorbereitung für 3D – Simulationen • Software für Grundopera-tionen • MatCAD • Spezielle Löser für DGL, DGLS • MoldFlow • PolyFlow uvm. [x]..... Hele-Shaw-Modell	• Simulatoren • Optimierungswerkzeuge • Werkzeuge zum Zeichnen verfahrenstechnischer Fliessbilder (AUTOCAD) • Chemische Reaktoren • Wärmeübertragersysteme • Stofftrennsysteme • SBE, Simulation Based Engineering (Siemens) • Spezielle Literatur

Tab. 3: „Werkzeuge" der Materialtechnik

In Tab. 4 ist eine Auswahl von Elementprozessen und ihre Wiederfindung in den unterschiedlichen Prozesseinheiten enthalten. Dass auch noch mit der analytischen Lösungsverfahren erfolgreich gearbeitet werden kann, zeigt die

Modellierung, Simulation und Optimierung des Extrusionsprozesses (vgl. Hensen/Knappe/Potente 1989).

Elementprozess (Auswahl) (isotherm, nichtisotherm, mit oder ohne Kinetik)	*Technologische Zuordnung* (Auswahl)
a) Fluide Stoffe Kanalströmungen mit festen Wänden	Rohrleitungen, Formwerkzeuge, Rohrreaktoren, Wärmeübertrager, Heizkörper, Verteilerkanäle
Kanalströmungen mit bewegten Wänden aber $\frac{\partial p}{\partial x_i} = 0$	Förderschnecken
Kanalströmungen mit bewegten Wänden und $\frac{\partial p}{\partial x_i} \neq 0$	Extruder, Spritzgussmaschinen, Walzenmaschinen, Kalander, Kneter, Rakelbeschichtungsmaschinen
Ein- und mehrschichtige Filmablaufströmungen	Wärmeübertrager, Rieselfilmkolonnen, Kühltürme, Entgasungsapparate, Tauchbäder
Körperumströmungen	Absetzbecken, Fallrohre, Sprühtürme, Wirbelschichten, Trockner, Kristallisatoren, hydraulische und pneumatische Förderung
Durchströmung komplizierter Gebilde	Schüttschichten, Filterkuchen, Adsorber, Extraktoren, Verteilerkanäle
Dehnströmungen	Fadenbildung, Foliendehnung, Beschichtungsantragsverfahren, Drahtziehvorrichtung
Schüttgutströmungen	Silos, Dosiergeräte, Verpackungsmaschinen, Einfülltrichter, Schneckenförderung, Extruder
b) Feststoffe Wärmeleitung	Folienbildung, Filmbildung, Granulatschmelzen, Sintern, Schweißen
Spanbildung	Trennen, Reiß-, Scher-, Lamellen- und Fließspan, Pflügen, Hobeln
Schneiden	Schneidemaschinen, Ein- und Mehrmessermaschinen, Quer- und Längsschneiden

Tab. 4: Elementprozesse der Materialtechnik

In naher Zukunft wird sich jedoch immer stärker die Entwicklung von Programmsystem durchsetzen, um komplexe Vorgänge auf der Basis der Elementprozesse zu modellieren. Die Synthese der Elementprozesse zur Dimensionierung von Prozesseinheiten stellt in einigen Fällen noch eine nichtlösbare Aufgabe dar, z. B. Übertragung der Vorgänge am Einzelobjekt auf eine Gesamtheit bei Partikelprozessen (Wirbelschicht, pneumatischer Transport u. v. m.).

Das Promotionsgeschehen in den technologischen Wissenschaften gestaltet sich heute vorrangig in der Form

- Reduktion des komplexen Vorgangs;
- numerische (selten analytische oder halbanalytische) Berechnungen der Prozessfelder (Geschwindigkeiten, Deformationen, Temperaturen, Spannungen, Drücke, Konzentrationen usw.);
- Synthese der Elementelösungen und Bestimmung integraler Prozessgrößen (siehe Abb. 7);
- Überprüfung der Lösungen am Objekt;
- Ableitung von Näherungslösungen für die Ingenieur-Praxis oder Software.

Der Zuwachs an Theoretischem gegenüber dem Empirischem wird somit deutlich und ist auch in der Literatur verfolgbar (vgl. z. B. Dantzig/Tucker 2001).

Die Reduktion und die Prozesselementesynthese bilden die Grundlage für die Herausbildung einer Allgemeinen Prozesstechnik (vgl. Reher 2002). Dabei muss beachtet werden, dass der Grad der Reduktion auch noch eine Synthese gestattet, die das technologische Prozessverhalten ausreichend beschreibt. So kann z. B. mit dem Wärmeübergang an einem Einzelteilchen keine Übertragung auf eine Wirbelschicht vorgenommen werden. Zwischen Einzelteilchen und Wirbelschicht ist eine weitere Hierarchieebene einzuführen (z. B. Porenströmung mit Fluktuationen oder Ähnlichem).

Die Reduktion des technologischen Prozesses ist nur dann zweckmäßig, wenn

(a) auf reduzierten Ebenen technologische Erkenntnisse gewonnen werden, die sonst nicht erhalten werden können,

(b) durch Synthese das Gesamtverhalten der Prozesseinheit bestimmt werden kann (siehe Tab. 5).

Reduktion / Elementprozesse	*Synthese / Maschine*
Einschneckenextruder	
Schüttgut - Einzugszone Aufschmelzzone Plastizier-, Misch-Zone Entgasungszone Ausstoss-Zone	Druckverteilung Antrieb Wärmeübergang Ausstoss
Kalander	
Materialverteilung Materialformung Materialkonditionierung	Spaltdrücke Antriebe Wärmeübergang Ausstoss
Trockner	
Oberflächenverdunstung Kapillar - Transport (Konzentrationsgradient-, Thermogradient-, Druckgradient - Transport)	Energieverbrauch Trocknungszeit Trocknerbemessung
Beschichtungsmaschine	
Materialverteilung Schichtbildung Schichtauftrag, -benetzung Schichtverfestigung	Abzugsgeschwindigkeit Antrieb Schichtdicke Wärmeübergang

Tab. 5: Beispiele für Reduktion und Synthese in der Materialtechnik / Prozessstufe

Die numerische Mathematik und die Computertechnologie haben bestimmenden Einfluss auf den Prozessmodul. Da der Prozessmaschinen- bzw. Apparateeinsatz oftmals branchenübergreifend ist, lohnt es sich für eine Vielzahl von Wirkpaarungen (z. B. Walzen; siehe Tab. 6) universelle „Werkzeuge“ zu entwickeln.

Technologie Beispiele	Funktion der Wirkpaarung	Zielgrößen der Modellierung	Haupteinflußfaktoren auf die Zielgrößen
Polymerverarbeitung Folien, Profile, Reifen, Informations- aufzeichnungs- materialien	Formen, Kaschieren, Entgasen, Glätten, Beschichten	Oberflächenqualität, Dickentoleranz, Energieaufwand Haftfestigkeit	Druck, Temperatur, Konstruktion, Kinematik
Lebensmitteltechnik Schokoladen- produktion, Teigherstellung	Mischen, Entgasen, Conchieren	Homogenität Energieaufwand	Druck Temperatur
Polygrafische Technik Bedrucken	Beschichten	Haftfestigkeit, Oberflächenqualität	Druck, Spannung
Zellstoff- und Papiertechnik Papiertechnik	Verfestigen, Glätten	Dickentoleranz, Oberflächenqualität	Geometrie, Druck
Textiltechnik Gewebe- beschichtung	Imprägnieren	Oberflächenqualität, Energieaufwand	Druck
Metallverarbeitung Walzen von Blechen und Bändern	Formen	Oberflächenqualität, Energieaufwand	Druck, Geometrie
Pharmazeutische Technik Salbenherstellung	Mischen	Homogenität	Druck
Silikattechnik Herstellung von gewalztem Glas und Keramik	Formen	Oberflächenqualität, Energieaufwand	Druck, Temperatur

Tab. 6: Die Wirkpaarung Walze-Walze in der Stoffwirtschaft / Materialtechnik

3.3 Zum Systemmodul

Die Reduktion technologischer Prozesse (Prozessmodule) bedarf der Synthese, die durch Systemtechnik (z. B. Systemverfahrenstechnik) vorgenommen wird und zur Strukturierung und Dimensionierung technologischer Verfahren (Anlagen) führt.

Während früher die klassische Technologie qualitative Ablaufdarstellungen des Material- und Energieflusses ermöglichte, ist es heute durch die Informationstechnologie möglich geworden eine quantitative, numerische Beschreibung komplexer technologischer Vorgänge vorzunehmen. Umfangreiche Werkzeuge der Systemverfahrenstechnik wurden entwickelt (vgl. Hartmann 2003). Die Werkzeuge der Systemtechnik beinhalten nicht nur Inhalte der direkten Stoffwandlung, sondern integrieren weitere Sachgebiete, wie z. B. Sicherheitstechnik, Anlagentechnik, Automatisierungstechnik, Ökonomie, Ökologie u. v. m. Sicher sind weiterreichende Probleme der Soziotechnik noch nicht in ausreichendem Maße Gegenstand der Systemtechnik geworden, sollten aber in der Allgemeinen Systemtechnik aufgenommen werden (vgl. Hilty/ Kastenholz 2004).

Durch die Informationstechnologie wandelte sich der Systemmodul von seiner qualitativen, beschreibenden Seite zu seiner quantitativ-numerischen Seite der Materialtechnik.

4 Technologien am Beginn des 21. Jahrhunderts und Anforderungen an die Materialtechnik

Die im vorangestellten Abschnitt dargestellten Methoden und Module zur Bearbeitung technologischer Aufgabenstellungen der Materialtechnik haben sich in der Praxis bewährt und werden methodisch und inhaltlich weiterentwickelt und angewendet. Die Integration weiterer Wissenschaftsdisziplinen wird die Module weiter präzisieren helfen (siehe Tab. 7). Besonders sichtbar wird der wachsende Einfluss der Interdisziplinarität, wenn man sich die bisher erkannten Technologien am Beginn des 21. Jh.s ansieht.

Stoffmodul	Naturwissenschaften Materialwissenschaften Mechanik / Rheologie Thermodynamik Messtechnik Informationstechnologie
Prozessmodul	Numerische Mathematik Computertechnik Konstruktionstechnik Prozessmesstechnik Mikrotechnik Sensorik
Systemmodul	Numerische Mathematik Informationstechnologie Kybernetik Umwelttechnik Sicherheitstechnik Ökonomie Ökologie Ethik Politik

Tab. 7: Integration wesentlicher Wissenschaftsdisziplinen in die Module der Materialtechnik (Werkstoff-Verfahrenstechnik) im 21. Jh.

In einer von Hariolf Grupp herausgegebenen Arbeit werden „neun größere zusammenhängende Oberthemen“ benannt (vgl. Grupp 1995): Neue Werkstoffe, Nanotechnologie, Mikroelektronik, Photonik, Mikrosystemtechnik, Software und Simulation, Molekularelektronik, Zell-Biotechnologie, Produktions- und Managementstechnik.

Ein Novum für die genannten „Oberthemen“ ist, dass die Technologien am Beginn des 21. Jh.s nicht nach herkömmlichen Gesichtspunkten getrennt werden können. So unterschiedlich auch die Entwicklungslinien sein mögen, sie wirken letztlich alle zusammen und bedingen sich einander. Für alle neun „Oberthemen“ hat dabei die Materialtechnik als „Werkstoff-Verfahrenstechnik“ eine Schlüsselfunktion (siehe Abb. 8).

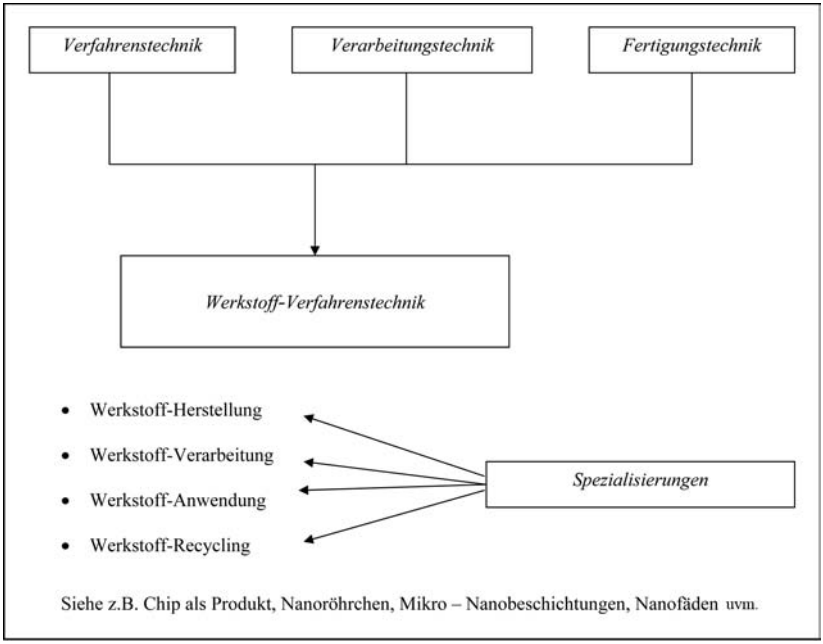

Abb. 8: Bestandteile der Werkstoff-Verfahrenstechnik

Die Herstellung funktionsstrukturierter Produkte (z. B. Chip-Herstellung) durch neue naturwissenschaftliche Basiseffekte, wird stärker als bisher zum Gegenstand technologischer Forschungen und Entwicklungen werden. In der Literatur wurde auf den Wandel der Verfahrenstechnik in eine Verfahrenstechnik für strukturierte Stoffsysteme (Verarbeitungstechnik) aufmerksam gemacht (vgl. Frey 1995). In der o. g., von Grupp herausgegebenen Arbeit wird die Ablösung der Fertigungstechnik durch die Verfahrenstechnik proklamiert (vgl. Grupp 1995). Unter der Werkstoffverfahrentechnik kann die Einheit der bisher existierenden Verfahrenstechnik, Verarbeitungstechnik und Fertigungstechnik verstanden werden.

Unter Beachtung der neun Oberthemen der neuen Technologien sollen nun erweiterte Ausgestaltungen der Stoff-, Prozess- und Systemmodule versucht werden.

4.1 Zum Stoffmodul

Große Bedeutung bekommt das stoffliche Verhalten im Mikro- und Nanobereich der Teilchen sowie von super-supramolekularen Strukturen. Die Natur- und Materialwissenschaften erzeugen neuartige Strukturen und studieren die Eigenschaften derartiger strukturierter Stoffsysteme. Dabei werden völlig neuartige und unerwartete Eigenschaften, wie halbleitend, supraleitend, toxisch u. v. a. festgestellt. Einige Tendenzen der Weiterentwicklung des Stoffmoduls für die Materialtechnik lassen sich wie folgt formulieren:

- Kontinuumseigenschaften für extreme Prozessbedingungen;
- Partikeleigenschaften, Agglomerateeigenschaften;
- Bindungseigenschaften in Festkörpern;
- Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Compounds, Mischungen, statistischen Ansammlungen, strukturierten Materialien, Verbunden, Gelen u. v. m.;
- Werkstoffsimulations-Verfahren;
- Molekular-Modelling Verfahren;
- Automatisierte Stoffdatengewinnung aus Produktionsanlagen u. v. m.

Verstärkte interdisziplinäre Forschungen (siehe Tab. 7) werden den Stoffmodul für die Werkstoff-Verfahrenstechnik weiter vervollkommnen, besonders in Hinblick auf Partikelverhalten und Strukturstabilitäten in Produktionsverfahren.

4.2 Zum Prozessmodul

Die Miniaturisierung der Produkte führt zur Herausbildung einer Mikroprozess-Werkstoff-Verfahrenstechnik mit erweiterten und neuartigen Methoden und Instrumentarien. Es werden ultradünne Schichten, ultraglatte Oberflächen, laterale Nanostrukturen, Cluster, nanokristalline Hohlfasern, Zylinder, Fäden, Röhren, Mikrokabel, Mikrokondensatoren, Nanodrähte u. v. m. in technologischen Prozessen hergestellt. Die Verfahren sind noch größenteils bisher unter Laborbedingungen erprobt und bedürfen einer Übertragung auf Produktionsbedingungen. Aus der Sicht der heutigen, bekannten Prozesse, werden die: Kristallisation, Membranverfahren, Fadenbildungs-, Schichtbildungsprozesse eine große Rolle spielen. Einige Tendenzen der Weiterentwicklung des Prozessmoduls lassen sich wie folgt formulieren:

- Partikelprozesse (Mikro-, Nanobereich; vgl. Gilles/Kienle 2002);
- flexible Mikroprozesse / multivalente Nutzung;
- Scale-down-Verfahren / Mikroausrüstungen;

- Präzisionswerkzeuge für Handhabungstechniken;
- Selbstorganisation zur Herstellung komplexerer, stabiler Strukturen;
- Einfluß äußerer Felder auf die Prozessabläufe (z. B. Elektrospinnen von Nanofäden);
- Nutzung von Viren zur Herstellung von Bauteilen für Nanostrukturen (halbleitende Nanodrähte) u. v. m.

Nur durch interdisziplinäre Arbeiten (siehe Tab. 7) können Technologien erkundet und entwickelt werden, die unter Produktionsbedingungen funktionieren.

4.3 Zum Systemmodul

Der Systemmodul muss komplexer als bisher gestaltet werden. Nicht nur ökonomische, ökologische Restriktionen, die von Ingenieuren wahrgenommen werden können sind zu integrieren, sondern zusätzlich sind soziale, ethische, politische u. a. Restriktionen als Folgewirkungen durch präventive Technikbewertungen durch interdisziplinäre Arbeiten (siehe Tab. 7) mit den Sozial- und Geisterwissenschaften zu erarbeiten.

Einige Tendenzen der Weiterentwicklung des Systemmoduls lassen sich wie folgt formulieren:

- Erhöhung der Komplexität der Systemwerkzeuge;
- Anwendung der künstlichen Intelligenz, kognitive Systeme, Fuzzy Logic, etc.;
- Entwicklung der Mikrosystemtechnik;
- flexible, wissenschaftsbegleitende Technologien u. v. m.

Für die weitere Ausgestaltung dieses Moduls der Werkstoff-Verfahrenstechnik ist eine interdisziplinäre Arbeit unumgänglich (siehe Tab. 7).

In Tab. 8 sind die präzisierten Phasen der technischen Realisierung in der Materialtechnik skizziert.

Kognition	neue physikalische, chemische biologische Basiseffekte erkennen und fördern für verschiedene Technikfelder
Invention	Materialtechnologien erkunden zur Umsetzung der naturwissenschaftlichen Basiseffekte in innovative Produkte
Innovation	Technologiebereitstellung für die wirtschaftliche Erzeugung von Produkten
Diffusion	Gesellschaftliche Akzeptanz und Verwendung der Erzeugnisse

Tab. 8: Phasen der technischen Realisierung in der Materialtechnik

5 Zur Realisierung technologischer Lösungen

In den bisherigen Ausführungen wurde deutlich, dass der „Übergang von der Theorie zur Praxis", d. h. die Konkretisierung (Dimensionierung, Bemessung und Gestaltung) einschließlich der Vergegenständlichung technologischer Lösungen ein Prozess ist, bei dem die ursprüngliche (oftmals nur gedanklich präsente) Zahl möglicher Varianten zunehmend eingeschränkt wird. Notwendig ist das infolge vielfältiger Restriktionen vor allem (natur-)wissenschaftlicher, technischer, ökonomischer, politischer, rechtlicher, kultureller, sozialer, anthropologischer und ethischer Art, die die Realisierung der einen oder anderen (abstrakt möglichen) Lösung „verbieten".

Der sogenannte „Technologie-Trichter" (siehe Abb. 9) verdeutlicht, dass der Weg von der Forschung über die Entwicklung und die Optimierung bis zur Zulassung einer technologischen Neuerung zugleich der Weg vom naturwissenschaftlich Möglichen über das technisch-technologisch Realisierbare und das ökonomisch und ökologisch Machbare bis zum sozial, juristisch, politisch und human Vertretbaren ist.

Für (natur-)wissenschaftliche, technische, ökonomische und wohl auch einige anthropologische (Arbeitswissenschaft!) Restriktionen gibt es anerkannte,

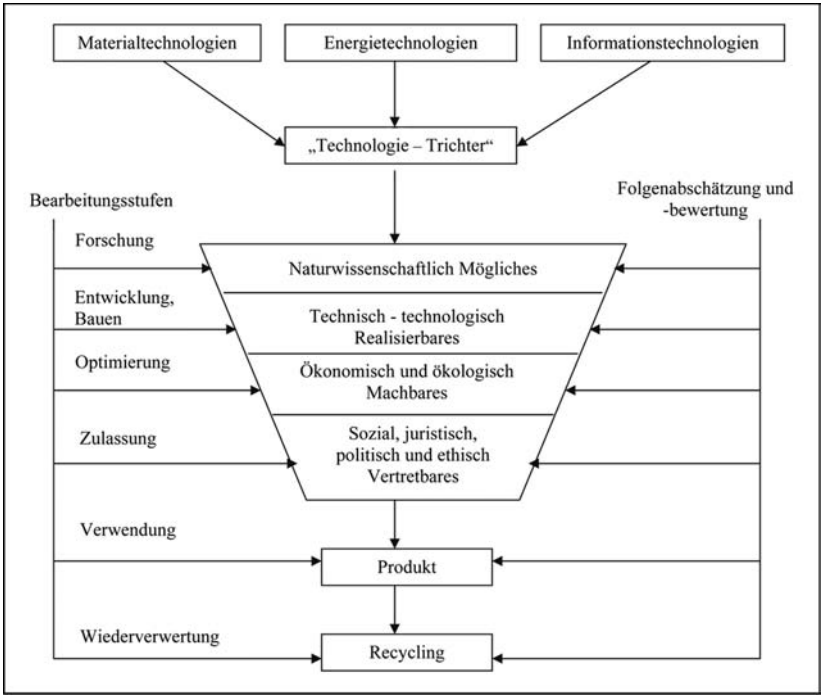

Abb. 9: „Technologie-Trichter“

bewährte und auch mathematisierte Verfahren ihrer Berücksichtigung und Einbeziehung in den o. g. Prozess der Konkretisierung technologischer Lösungen. Anders jedoch bei den anderen Restriktionen. Sie beginnen erst langsam, an Aufmerksamkeit zu gewinnen, vor allem im Rahmen von Prozessen der Folgenabschätzung und -bewertung, die jedoch durchgängig Anwendung finden sollten. *Technikbewertung* bedeutet entsprechend der VDI-Richtlinie 3780 vom März 1991 „das planmäßige, systematische, organisierte Vorgehen, das

- den Stand der Technik und ihre Entwicklungsmöglichkeiten analysiert,
- unmittelbare und mittelbare technische, wirtschaftliche, gesundheitliche, ökologische, humane, soziale und andere Folgen dieser Technik und möglicher Alternativen abschätzt,
- aufgrund definierter Ziele und Werte diese Folgen beurteilt oder auch weitere wünschenswerte Entwicklungen fordert,
- Handlungs- und Gestaltungsmöglichkeiten daraus herleitet und ausarbeitet,

so dass begründete Entscheidungen ermöglicht und gegebenenfalls durch geeignete Institutionen getroffen und verwirklicht werden können“ (VDI 1991, S. 2). Dabei sind die Werte „Funktionsfähigkeit“, „Sicherheit“, „Gesundheit“, „Umweltqualität“, „Wirtschaftlichkeit“ (einzelwirtschaftlich), „Wohlstand“ (gesamtgesellschaftlich) sowie „Persönlichkeitsentfaltung und Gesellschaftsqualität“ entscheidungsrelevant.

Durch den Prozess der Technikbewertung bzw. durch die sie fundierenden (z. B. Trendextrapolation, Delphi-Expertenumfrage, morphologische Klassifikation oder Relevanzbaum-Analyse) bzw. ergänzenden (z. B. Umweltverträglichkeitsprüfung, Ökobilanzierung, Risikoanalyse oder Qualitätsmanagement) Methoden ist es möglich, Erkenntnisse hinsichtlich ökonomisch, ökologisch, sozial, psychologisch, rechtlich u. a. bedeutsamer Zusammenhänge zu gewinnen, die jedoch oftmals nicht in einer mit mathematischen Mitteln zugänglichen Weise vorliegen (siehe Tab. 9). Das sei nur am Beispiel der Risikoanalyse kurz gezeigt.

• Trendextrapolation	• Umweltverträglichkeitsprüfung
• Delphi-Expertenumfrage	• Ökobilanzierung
• Morphologische Klassifikation	• Risikoanalyse
• Relevanzbaum-Analyse	• Qualitätsmanagement
	• Modellierung und Simulation soziotechnischer Systeme

Tab. 9: Methoden der Technikbewertung („Technologie-Trichter“)

Risikoüberlegungen, -analysen, -bewertungen und -entscheidungen stehen im Zusammenhang mit Bemühungen, Sicherheit (hier: im technischen Bereich) „herzustellen“. Risikowissen ist Wissen für den Umgang mit der Unbestimmtheit zukünftiger Zustände; es versucht einen Zusammenhang zwischen (zukünftigem) menschlichen Entscheidungshandeln, Unbestimmtheiten hinsichtlich eintretender Folgen sowie Verantwortung für Handlungsresultate herzustellen und bezieht sich auf die Schätzung von Eintrittshäufigkeiten, die Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten, die Ereignisvoraussage und die Handlungsauswahl (vgl. Hoyos 1987, S. 53f.). Um dem entsprechen zu können, wurde die Risikoanalyse mit folgendem Anspruch entwickelt: „Für jedes Teil des Systems ist anzugeben, welche Störungen und welche Versagensfälle denkbar sind und welche Zustands-änderungen des Systems sich daraus ergeben könnten, wobei die Zustandsänderungen auch noch abhängig sein

können von Störungen und Versagensfällen an anderen Teilen des Systems, die entweder unabhängig oder abhängig vom auslösenden Ereignis gleichzeitig oder unwesentlich später auftreten könnten. [...] Für jede Zustandsänderung des Systems sind die Auswirkungen quantitativ für jede einzelne in Betracht kommende Art der Auswirkung zu ermitteln. [...] Für jede Art der Auswirkungen ist anzugeben, mit welcher mittleren Häufigkeit oder Wahrscheinlichkeit sie auftreten könnten" (Lindackers 1984, S. 14). Auf dieses Weise wurde versucht, das Risiko „zu kalkulieren": „Das kalkulierte Risiko, ausgedrückt in Erwartungswerten für Schaden pro Zeiteinheit, ist das Produkt der Risikoanalyse. Kennt man die Erwartungswerte für unterschiedliche Systeme oder Systemkomponenten, dann können Risikomanager Strategien der Risikominimierung durchsetzen" (Renn 1991, S. 6–7 f.).

Dabei konnte auf Erfahrungen im Umgang mit Risiken sowohl in der Versicherungswissenschaft als auch in der Betriebswirtschaft zurückgegriffen werden. Deren Risikokalkulation basierte auf folgenden Voraussetzungen:

(a) es liegt ein geschlossener, bekannter und homogener Ereignisraum vor;
(b) Bezugsbasis sind stets Populationen (als statistische Gesamtheiten) und keinesfalls Einzelindividuen oder -ereignisse;
(c) vorliegende Erfahrungen ermöglichen die Erfassung statistischer Regelmäßigkeiten und die Bestimmung von Schadenseintritts-Wahrscheinlichkeiten;
(d) Schäden sind infolge einer einheitlichen monetären Basis vergleich- und kompensierbar.

Das ist für den Bereich der Technik nur selten realisierbar. Zusätzlich ergeben sich methodische Schwierigkeiten für die Realisierung des „Programms" der traditionellen Risikoanalyse hinsichtlich

- der Vollständigkeit von Daten;
- der Grundlage von Daten;
- von Mehrfachausfällen gleicher Ursache („common mode"-Ausfälle);
- der Erfassung des menschlichen Einflusses;
- der Modellierung von Ereignisabläufen;
- der subjektiven Annahmen.

Diese Defizite führen nun dazu, dass Risikoabschätzungen nur selten quantifiziert vorliegen, häufiger sind qualitative Aussagen, komparative Abschätzungen oder subjektive Einschätzungen. Das hat selbstverständlich Konsequenzen für das methodische Vorgehen in den Technikwissenschaften, dass weitgehend auf mathematisierten Ansätzen basiert – womit auf den Grundgedanken dieser Ausführungen – die Einheit von Empirischem und Theoretischem – zurückverwiesen wird.

Soziotechnische Systeme (vgl. Hilty/Kastenholz 2004) werden mit den Mitteln der Modellierung und Simulation analysiert, um in Informationssysteme zur Planung, Implementierung und Optimierung von technologischen Systemen angewendet werden zu können. Quantifizierungen stehen somit auch in dem Modul „Technologischer Trichter“ (siehe Tab. 9 und Abb. 9) im Mittelpunkt der Forschung und Entwicklung.

6 Schlussbemerkungen und Ausblick

Dieser Beitrag wurde im Tagungsschwerpunkt „Allgemeine Verfahrenswissenschaft als technologische Grundlagenwissenschaft“ vorgetragen. Es stellt sich nun die Frage „Was könnte eine Allgemeine Verfahrenswissenschaft in Lehre, Forschung und Praxis in der Zukunft leisten?“

Angeregt durch das Ergebnis des (1.) Symposiums „Allgemeine Technologie – Vergangenheit und Gegenwart“ in Berlin im Jahre 2001 (vgl. Banse/Reher 2001), auf dem zwischen einer Allgemeinen Technologie als Grundlagenwissenschaft der Technik (Technologiebegleiter) und einer Allgemeinen Verfahrenswissenschaft als technologischer Grundlagenwissenschaft (Technologieschöpfer) unterschieden wurde, entstand – auch in Anlehnung an eine Allgemeine Konstruktionswissenschaft (vgl. Hansen 1974; Hubka/Eder 1992) – die Überlegung zur Ausarbeitung einer Allgemeinen Verfahrenswissenschaft. Erste Überlegungen (vgl. Arbeitskreis „Allgemeine Technologie“ 2004) führten zur Erkenntnis, dass dieses äußerst komplexe Vorhaben eine interdisziplinäre Leistung erfordert, an dem neben Technikwissenschaftlern und Naturwissenschaftlern auch Sozial- und Geisteswissenschaftler mitwirken müssen.

Die Darstellung der Verfahrensgenese, Modelle, Methoden, Werkzeuge, Algorithmen, Restriktionen u. v. m. betreffen

- die Verfahrensentwicklung;
- die Verfahrensprojektierung und den Anlagenbau;
- den Verfahrensbetrieb, und
- das Verfahrensrecycling.

Die Basis für das Vorhaben liefert die vorhandene Kenntnis der speziellen Fachliteratur. Eine derartige verallgemeinerte Darstellung könnte für Studierende, aber auch für den Praktiker ein Leitfaden zum Studium und zur Lösung anstehender Probleme werden. Durch die Verfahrensforschung und -entwicklung könnte der aktuelle Stand des Wissens stets garantiert werden. Ein interdisziplinäres Autorenteam garantiert die komplexe Betrachtung der Technologie und liefert damit einen Beitrag zur „Allgemeinen Technologie“.

Symbolverzeichnis

Nu	Nusselt-Kennzahl
Ga	Galilei-Kennzahl
K_{kond}	Kondensations-Kennzahl
Pr	Prandtl-Kennzahl
n, e, t	Indizes, numerisch, experimentell, theoretisch
VT	Verfahrenstechnik
VAT	Verarbeitungstechnik
FT	Fertigungstechnik
π_i	dimensionsloser Komplex (Kennzahl)
t	Zeit
x_i	Koordinaten
y_n	abhängige Variable
I_n	Integralwert
$\frac{\partial p}{\partial x_i}$	Druckgradienten

Literatur

Arbeitskreis „Allgemeine Technologie“. In: Leibniz-Sozietät e. V., Berlin (Hg.) (2004): Geschichte, Leistungen, Perspektiven einer Wissenschaftsakademie sui generis“. Berlin, S. 12–13

Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.) (2002): Allgemeine Technologie – Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft. Berlin (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 50 (2001), Nr. 7)

Dantzig, J. A.; Tucker III, Ch. L. (2001): Modeling in Materials Processing. Cambridge

Fratzscher, W.; Picht, H.-P. (1993): Stoffdaten und Kennwerte der Verfahrenstechnik. Leipzig/Stuttgart

Fratzscher, W. (2004): Zur Stellung und Struktur der Technikwissenschaften. In: Symposium zum 150. Geburtstag von Wilhelm Ostwald 16.9.2003 in Großbothen. Mitteilungen der Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft, Sonderheft 18 (2004), S. 8–32

Frey, W. (1995): Wandel in der Verfahrenstechnik – Anforderungen an die Ausbildung. In: Chemie-Ingenieur-Technik, 67 (1995), Heft 2, S. 155–159

Frolow, W. F. (2003): Vorlesungen zur Verfahrenstechnik. St. Petersburg (russ.)

Gilles, E.-D.; Kienle, A. (2002): Particulate Processes: A special Issue of Chemical Engineering Science. In: Chemical Engineering Science, 57, no. 20, pp. 4255–4428

Grupp, H. (Hg.) (1995): Technologie am Beginn des 21. Jahrhunderts. 2. Aufl. Heidelberg

Hansen, F. (1974): Konstruktionswissenschaft – Grundlagen und Methoden. Berlin

Hartmann, K. (2003): Werkzeuge für die Systemverfahrenstechnik. Berlin (Technische Universität)

Hensen, F.; Knappe, W.; Potente, H. (1989): Kunststoffextrusionstechnik. Bd. I: Grundlagen. München/Wien

Hilty, L. M.; Kastenholz, H. G. (2004): „Technologie und Gesellschaft“: Neue Abteilung der EMPA in St. Gallen. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis, 13, Nr. 1, S. 58–60

Hörz, H. (1986): Analytisch-synthetisches Denken, Phantasie und Intuition in der technischen Forschung. In: Banse, G.; Wendt, H. (Hg.): Erkenntnismethoden in den Technikwissenschaften. Eine methodologische Analyse und philosophische Diskussion der Erkenntnisprozesse in den Technikwissenschaften. Berlin, S. 36–43

Hoyos, C. Graf (1987): Einstellungen zu und Akzeptanz von unsicheren Situationen: Die Sicht der Psychologie. In: Bayerische Rück (Hg.): Gesellschaft und Unsicherheit. Karlsruhe, S. 49–65

Hubka, V. (1973): Theorie der Maschinensysteme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Berlin u. a.

Hubka, V.; Eder, W. E. (1992): Einführung in die Konstruktionswissenschaft. Übersicht, Modell, Anleitungen. Berlin u. a.

Lindackers, K.-H. (1984): Einführung in Teil I. In: Lange, S. (Hg.): Ermittlung und Bewertung industrieller Risiken. Berlin u. a., S. 11–14

Oelschlägel, F. (2004): Werkzeuge der Prozessverarbeitungstechnik und Rheologie. Halle (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, FB Ingenieurwissenschaften)

Osswald, T. A. (2003): Verarbeitungsprozesse mit Modellen beschreiben. In: Kunststoffe, 10 (2003), S. 130–134

Poser, H.; Hubig, Ch.; Jelden, E.; Debatin, B. (1997): Algorithmus und Unsicherheit. In: Mackensen, R. (Hg.): Konstruktionshandeln. Nicht-technische Determinanten des Konstruierens bei zunehmendem CAD-Einsatz. München/Wien, S. 83–152

Reher, E.-O. (1981): Mikroprozesse der Verarbeitungstechnik – Grundlage zur Entwicklung der Prozessverarbeitungstechnik. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Leuna-Merseburg, 23 (1981), Heft 3-4, S. 487–494

Reher, E.-O. (2000): Zur Rheologie von Polymerschmelzen. In: Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 43 (2000), Nr. 8, S. 5–23

Reher, E.-O. (2002): Ansätze zur Entwicklung einer Allgemeinen Prozesstechnik der Stoffwandlung. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Allgemeine Technologie – Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft. Berlin, S. 87–101 (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 50 (2001), Nr. 7)

Reher, E.-O.; Göttfert, A.; Sunder, J. (2002): Rheologische On-Line-Prüftechnik in Prüf- und Produktionsanlagen der Kunststofftechnik. In: Verfahrenstechnik, 36 (2002), Heft 10, S. 72–74

Renn, O. (1991): Risikowahrnehmung und Risikobewertung: Soziale Perzeption und gesellschaftliche Konflikte. In: Chakraborty, S., Yadigaroglu, G. (Hg.): Ganzheit-

liche Risikobetrachtungen. Technische, ethische und soziale Aspekte. Köln, S. 06-1 – 06-62

Schirmer, W. (1975): Diskussionsbeitrag. In: Fuchs, K.: Zur Bedeutung der theoretischen Physik für die Naturwissenschaften. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften der DDR, Heft 5 N, S. 22–26

VDI (1901): VDI-Richtlinie 3780 „Technikbewertung – Begriffe und Grundlagen". Düsseldorf (VDI), März

Wessel, H. (1991): Analyse. In: Hörz, H.; Liebscher, H.; Löther, R.; Schmutzer, E., Wollgast, S. (Hg.): Philosophie und Naturwissenschaften. Wörterbuch zu den philosophischen Fragen der Naturwissenschaften. Neuausgabe. Bd. 1: A-M. Berlin, S. 53–55

Zlokarnik, M. (2002): Scale-up. Modellübertragung in der Verfahrenstechnik. Weinheim