

Kamprath-Reihe

Hemming / Wagner

Verfahrens- technik



WAGNER TECHNIK SERVICE

Fliederweg 25
D-68789 St. Leon-Rot

Telefon (06227) 51143 E-Mail wagner@wts-online.de
Telefax (06227) 53421 Internet www.wts-online.de



Seminare

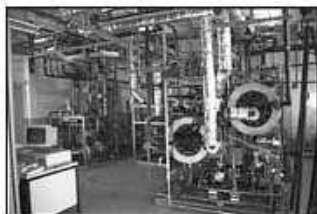
- Rohrleitungstechnik
- Wärmeträgertechnik
- Wärmeaustauscher und Wärmeübertragung
- Planung im Anlagenbau



Fachliteratur



- Wärmeträgertechnik mit organischen Fluiden
- Strömung und Druckverlust
- Rohrleitungstechnik
- Festigkeitsberechnungen im Apparate- und Rohrleitungsbau
- Wärmeübertragung
- Wärmeaustauscher
- Kreislumpen und Kreislumpenanlagen
- Regel- und Sicherheitsarmaturen
- Betriebshandbuch Wärme
- Head Transfer Technique with Organic Media
- Lufttechnische Anlagen
- Technische Wärmelehre
- Planung im Anlagenbau
- Wasser und Wasserdampf im Anlagenbau
- Verfahrenstechnik



Beratung

Gutachten

- Von der IHK Rhein-Neckar öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für:
**WÄRMETRÄGERTECHNIK
THERMISCHER APPARATEBAU und
ROHRLEITUNGSTECHNIK**

Werner Hemming/Walter Wagner
Verfahrenstechnik

Kamprath-Reihe

Dipl.-Ing. Werner Hemming/Dipl.-Ing. Walter Wagner

Verfahrenstechnik

12., korrigierte Auflage

Vogel Business Media

Dipl.-Ing. **WERNER HEMMING**

1925 in Wetzlar/Lahn geboren. Maschinenbaustudium an der Ingenieurschule in Gießen und an der Technischen Hochschule Aachen. Konstruktionsingenieur im Werkzeugmaschinen- und Apparatebau. Durchführung von Entwicklungs- und Planungsaufgaben für Kernenergieanlagen. Ab 1963 Lehrtätigkeit. Autor und Redakteur technischer Fernlehrgänge. Zeitweise Lehrbeauftragter für mechanische Verfahrenstechnik, Werkzeugmaschinen und Mathematik an der Fachhochschule Konstanz. Verfasser zahlreicher Fachaufsätze.

Dipl.-Ing. **WALTER WAGNER**

Jahrgang 1941, absolvierte nach einer Lehre als Technischer Zeichner ein Maschinenbaustudium und war 1964 bis 1968 Anlagenplaner im Atomreaktorbau; anschließend begann er eine Ausbildung zum Schweiß-Fachingenieur und war ab 1968 Technischer Leiter im Apparatebau, Kesselbau und in der Wärmetechnik. 1974 bis 1997 bekam er einen Lehrauftrag an der Fachhochschule Heilbronn, von 1982 bis 1984 zusätzlich an der Fachhochschule Mannheim und von 1987 bis 1989 an der Berufsakademie Mosbach. Im Zeitraum 1988 bis 1995 war er Geschäftsführer der Hoch-Temperatur-Technik Vertriebsbüro Süd GmbH. Seit 1992 leitet er Beratung und Seminare für Anlagen-technik: WTS Wagner-Technik-Service. Er ist außerdem Obmann verschiedener DIN-Normen und öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Wärmeträgertechnik, Thermischer Apparatebau und Rohrleitungstechnik.

Dipl.-Ing. **WALTER WAGNER** ist Autor folgender Vogel Fachbücher (Kamprath-Reihe):

Festigkeitsberechnungen im
Apparate- und Rohrleitungsbau
Kreiselpumpen und Kreiselpumpenanlagen
Lufttechnische Anlagen
Planung im Anlagenbau
Regel- und Sicherheitsarmaturen
Rohrleitungstechnik
Strömung und Druckverlust
Wärmeaustauscher
Wärmeträgertechnik
Wärmeübertragung
Wasser und Wasserdampf im Anlagenbau
DIETZEL/WAGNER: Technische Wärmelehre
HEMMING/WAGNER: Verfahrenstechnik

Zur Themenreihe gehören ebenfalls
aus der Vogel Business Media:

H. J. Bullack: (CD-ROM)
Berechnung von Druckbehälter-Bauteilen
Berechnung von Sicherheitseinrichtungen
Berechnung von Kunststoffbehältern
Flanschberechnungen nach EN 1591
Berechnung metallischer Rohrleitungsbauteile 1
Pipe Elements/Rohrleitungsbauteile

Weitere Informationen:
www.vbm-fachbuch.de

ISBN 978-3-8343-3412-1

12. Auflage 2017

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.
Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form
(Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem
anderen Verfahren) ohne schriftliche
Genehmigung des Verlages reproduziert oder
unter Verwendung elektronischer Systeme
verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.
Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich
genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 1975 by Vogel Business Media

GmbH & Co. KG. Würzburg

Vorwort

Das Buch vermittelt eine Gesamtschau über den vielfältigen und weitverzweigten Fachbereich «Verfahrenstechnik». Es gibt eine erste Einführung in die wichtigsten Grundverfahren der mechanischen, thermischen und chemischen Verfahrenstechniken sowie der Bioverfahrenstechnik. Das ermöglicht auch dem Fachfremden einen Einstieg in diesen wichtigen Technikzweig.

Leserkreis und besonders angesprochene Lesergruppen

Die Literatur über die Verfahrenstechnik ist sehr umfangreich und in zahlreiche Spezialgebiete aufgespalten. Es ist für den Nichtfachmann daher recht schwierig, sich in diesem komplexen Gebiet zurechtzufinden. Das Buch wendet sich daher zunächst an alle, die sich einen ersten Überblick über die Verfahrenstechnik verschaffen wollen. Weiter wurde das Buch für diejenigen geschrieben, die innerhalb ihres eigenen Fachgebietes verfahrenstechnische Erkenntnisse, Methoden oder Geräte anzuwenden haben.

Besonders angesprochen sind hier:

- ❑ Ingenieure und Techniker des Apparatebaus.
- ❑ Alle, die sich im Rahmen des Umweltschutzes mit der Reinhaltung von Wasser und Luft beschäftigen müssen.

Das Buch ist aus dem Fachhochschulunterricht hervorgegangen. Infolgedessen ist es auch gedacht für:

- ❑ Studierende des Maschinenbaus, der physikalischen Technik, der technischen Chemie und der Verfahrenstechnik zur Begleitung des Fachhochschulunterrichts sowie als Repetitorium zur Prüfungsvorbereitung.
- ❑ Absolventen von Fachhochschulen und Technikerschulen als schneller Ratgeber und Nachschlagwerk.

Fachliche Besonderheiten

Das Buch will einen kurzgefassten Überblick über die Verfahrenstechnik geben. Eine solche Kurzfassung bedingt auch eine gewisse Auswahl und Schwerpunktbildung.

Besonderes Gewicht wird auf die Trennverfahren gelegt, weil diese Grundoperation wichtige Bausteine fast aller Produktionsverfahren sind und in der Umwelttechnik eine wesentliche Rolle spielen. Hierdurch bedingt wurde die mechanische Verfahrenstechnik breiter abgehandelt als die thermische.

Didaktische Besonderheiten

Das Buch ist als Kompendium gedacht. Es wird bewusst darauf verzichtet, die Berechnungsformeln und Gleichungen ausführlich herzuleiten. Aufgabe des Buches soll es auch weniger sein, Lösungsmöglichkeiten für verfahrenstechnische Probleme aufzuzeigen. Vertieft wird jedoch die knappe Stoffdarbietung durch zahlreiche vollständig durchgerechnete Beispiele, die auch einen ersten Einblick in die Projektierung von Apparaten und Anlageteilen geben.

Voraussetzungen für das Arbeiten mit diesem Buch sind Grundkenntnisse der Mathematik und Physik, wie sie z.B. zur Erlangung der Fachschulreife oder eines Realschulabschlusses notwendig sind.

Gründlich überarbeitet und teilweise neugefasst wurde das Kapitel Prozessleittechnik.

Dem Vogel Buchverlag danke ich für die gewohnt hervorragende Zusammenarbeit.

Anmerkungen zum Buch über E-Mail:
wagner@wts-online.de.

Insel Reichenau
St. Leon-Rot

Werner Hemming
Walter Wagner

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5	3.3.3	Filterapparate	60
1 Einleitung	9	3.3.4	Filterzentrifugen	63
1.1 Wesen und Aufgaben der Verfahrenstechnik	9	3.3.5	Bogensieb	64
1.2 Apparat, Anlage, Verfahren	10	3.3.6	Auswaschen des Filterkuchens ..	64
1.3 Grundverfahren	11	3.4	Trennung von Emulsionen	65
1.4 Lagern	12	3.4.1	Emulsionstrennung in der Tellerzentrifuge	65
1.5 Fördern	13	3.4.2	Sonstige Emulsionstrennverfahren	67
1.5.1 Rohrleitungen und Armaturen	13	3.5	Membranfiltration	68
1.5.2 Feststoffförderung	14	3.6	Auspressen von Flüssigkeiten (Scheidepressen)	70
1.5.3 Flüssigkeitsförderung	17	4 Mechanische Zerlegung von Feststoffgemischen	71	
1.5.4 Gasförderung	20	4.1 Klassieren	71	
1.6 Messen, Steuern und Regeln	21	4.1.1 Trenngradkurve, Trenngrenze, Trennschärfe	72	
1.7 Energieerzeugung und Energieversorgung	24	4.1.2 Siebklassieren (Sieben)	74	
2 Mechanische Verfahren zur Oberflächenvergrößerung	25	4.1.3 Sichten	76	
2.1 Zerkleinern von Feststoffen	25	4.1.4 Stromklassieren	77	
2.1.1 Bruchvorgang	26	4.2 Sortieren	79	
2.1.2 Zerkleinerungsarbeit	28	4.2.1 Dichtesortieren	79	
2.1.3 Zerkleinerungsmaschinen	29	4.2.2 Magnetsortieren und Elektrosortieren	81	
2.2 Flüssigkeitszerteilung	36	4.2.3 Flotieren	81	
2.2.1 Berieselung	36	4.3 Körnungsanalyse	83	
2.2.2 Zerstäubung	38	4.3.1 Korngrößenbestimmung	83	
2.2.3 Zerspritzen	40	4.3.2 Körnungskennlinien	84	
3 Mechanische Flüssigkeitsabtrennung	41	4.3.3 RRSB-Verteilungsfunktion	84	
3.1 Disperse Systeme	42	4.3.4 Bestimmung der spezifischen Oberfläche	87	
3.2 Sedimentation	43	5 Verfahren der Gasreinigung	89	
3.2.1 Schwerkraftsedimentation	43	5.1 Entstaubung	90	
3.2.1.1 Absetzgeschwindigkeit	43	5.1.1 Abscheidegrade	90	
3.2.1.2 Apparate für die Schwerkraftsedimentation	45	5.1.2 Schwerkraftabscheidung	92	
3.2.2 Fliehkraftsedimentation	47	5.1.3 Fliehkraftabscheidung	93	
3.2.2.1 Schleuderschwindigkeit und Absetzgeschwindigkeit	48	5.1.3.1 Abscheidung im Zyklon	93	
3.2.2.2 Vollmantelzentrifugen	48	5.1.3.2 Abscheidung im Drehströmungsentstauber	96	
3.2.2.3 Tellerzentrifugen	52	5.1.4 Waschabscheidung	96	
3.2.2.4 Hydrozyklon	53	5.1.4.1 Abscheidung an Flüssigkeits tropfen	96	
3.2.3 Flockung und Flockungsmittel	57	5.1.4.2 Nassentstauber	97	
3.3 Filtration	57	5.1.5 Filtrationsabscheidung	98	
3.3.1 Filtration und Filtermittel	57	5.1.6 Elektroabscheidung	99	
3.3.2 Physikalische Grundlagen der Filtration	58	5.1.6.1 Physikalische Grundlagen	99	

5.1.6.2	Elektroabscheider	100	9	Thermische Verfahren zur Feststoffabtrennung	141
5.1.7	Biofiltration	102		Trocknen	141
5.2	Gasreinigung durch Adsorption	102	9.1	Physikalische Grundlagen	141
5.3	Gasreinigung durch Adsorption	105	9.1.1	Trocknungsverfahren	142
5.4	Katalytische Gasreinigung	106	9.1.2	Trocknerbauarten	143
5.5	Tropfenabscheidung aus Gasen	107	9.1.3	Eindampfen und Kristallisieren	144
			9.2	Verdampfung	144
6	Mechanische Verfahren zur Stoffvereinigung	108	9.2.1	Verdampferbauarten	145
6.1	Mischen	108	9.2.2	Kristallisation	146
6.1.1	Rühren	108	9.2.3	Aussalzen und Fällern	147
6.1.1.1	Physikalische Grundlagen	108	9.2.4	Sublimieren	148
6.1.1.2	Rührwerksanlagen	111	9.3	Extrahieren aus Feststoffen	148
6.1.2	Kneten	113	9.4	Stoffübergang beim Auslaugen und Lösen	150
6.1.2.1	Physikalische Grundlagen	113	9.5		
6.1.2.2	Knetapparate	114	10	Thermische Trennung von Flüssigkeitsgemischen	151
6.1.3	Trockenmischen	115		Destillation	151
6.1.3.1	Grundlagen	115	10.1	Siedegleichgewicht und Gleichgewichtskurve	151
6.1.3.2	Geräte zum Trockenmischen	117	10.1.1	Destillationsverfahren	152
6.1.4	Statisches Mischen von Fluiden	119	10.1.2	Rektifikation	154
6.2	Mechanische Verfahren zur Kornvergrößerung	120	10.2	Wärme- und Stoffaustausch	154
6.2.1	Agglomerieren	121	10.2.1	Anzahl der theoretischen Stufen	155
6.2.1.1	Aufbaugranulieren	121	10.2.2	Bauarten von Rektifizierkolonnen	157
6.2.1.2	Sintern	122	10.2.3	Auslegung von Rektifizierkolonnen	158
6.2.2	Formpressen	122	10.2.4	Flüssig-Flüssig-Extraktion	161
6.3	Dosieren von Feststoffen	124	10.3	Physikalische Grundlagen	161
7	Fluidisieren und Wirbelschichttechnik	125	10.3.1	Massenbilanz, Stufenzahl	162
7.1	Schüttgutverhalten in fluiden Medien	125	10.3.2	Extraktionsapparate	165
7.2	Berechnung der Wirbelschichtzustandsgrößen	126	10.3.3	Sorption, Adsorption	166
7.3	Wirbelschichttechnik	127	10.4		
8	Wärmeübertragung	131	11	Diffusionstrennverfahren	168
8.1	Arten der Wärmeübertragung	131	12	Chemische Reaktionsverfahren	170
8.1.1	Wärmeleitung	131	12.1	Reaktionssysteme und Reaktionsapparate	170
8.1.2	Wärmeübertragung durch Konvektion	131	12.2	Chemische Grundverfahren	174
8.1.3	Wärmeübertragung bei Änderung des Aggregatzustands	133	12.3	Biotechnologische Verfahren	174
8.1.4	Wärmeübertragung durch Strahlung	133	12.3.1	Biotechnologie, Prinzip und Anwendung	174
8.2	Wärmedurchgang	134	12.3.2	Fermentation	176
8.3	Wärmeübertragungsmittel	135	12.3.3	Sterilisation und Reinheit	178
8.4	Wärmeaustauscher	135	12.3.4	Aufarbeitung der Bioprodukte	178
8.4.1	Auslegung von Wärmeaustauschern	135	13	Fließbilder verfahrens-technischer Anlagen	180
8.4.2	Wärmeaustauscherbauarten	136	13.1	Grundfließbild	180
8.4.3	Berücksichtigung der Verschmutzung	139	13.2	Verfahrensfließbild	180
			13.3	Rohrleitungs- und Instrumenten-Fließbild	181

14	Prozessleittechnik	188
14.1	Allgemeines	188
14.2	Gerätetechnik	190
14.2.1	Feldebene	190
14.2.2	Prozessleitebene	190
14.3	Prozessnahe Komponenten	192
14.3.1	Aufbau, Signalverarbeitung	192
14.3.2	Software, Konfigurierung, Parametrisierung	194
14.4	Bussysteme und Buskomponenten	196
14.4.1	Allgemeines	196
14.4.2	Feldbus	196
14.5	Prozessrechner	198
14.6	Beobachten und Bedienen eines PLS	198
14.6.1	Hardware- und Softwareaufbau	198
14.6.2	Prozessdarstellung	199
14.6.3	Prozessbedienung	200
	Stichwortverzeichnis	203

1 Einleitung

1.1 Wesen und Aufgaben der Verfahrenstechnik

Die **Verfahrenstechnik** ist eine selbstständige Ingenieurwissenschaft, die sich mit allen Vorgängen befasst, bei denen Stoffe hinsichtlich Zusammensetzung, Eigenschaften oder Stoffart verändert werden.

Hinsichtlich ihrer Anwendungsgebiete ist die Verfahrenstechnik ein **interdisziplinäres Fachgebiet**. Wichtige Bereiche verfahrenstechnischer Anwendung sind: Chemische Technik, Eisenhüttenwesen und NE-Metallurgie, Nahrungs- und Genussmittelindustrie, Steine- und Erden-Industrie, Umwelttechnik, Biotechnik, medizinische Technik. Eng verbunden mit der Verfahrenstechnik ist der **Apparatebau**.

Die Verfahrenstechnik ist ebenso wie Fertigungstechnik und Energietechnik ein Teil der **Produktionstechnik**. Ziel der Fertigungstechnik ist die Formänderung, Ziel der Energietechnik ist die Energieumwandlung und Ziel der Verfahrenstechnik ist die **Stoffänderung**.

Verfahrenstechnik ist Stoffumwandlungstechnik.

Die Stoffumwandlung kann erfolgen durch:

1. **Änderung der Zusammensetzung**, z.B. von Suspensionen durch Filtrieren oder von Lösungen durch Destillieren.
2. **Änderung der Eigenschaften**, z.B. der Feuchtigkeit eines Produktes durch Trocknen oder der Korngröße durch Zerkleinern.
3. **Änderung der Stoffart**, z.B. von Verbindungen durch chemische Reaktionen oder von Elementen durch Kernumwandlung.

Zusammensetzung und Eigenschaften von Stoffen werden durch physikalische Verfahren geändert. Die Stoffart kann nur durch chemische oder nukleare Reaktionen umgewandelt werden. Man gliedert die Verfahrenstechnik daher auch in physikalische, chemische und nukleare Verfahrenstechnik (Kernverfahrenstechnik).

Es ist üblich, die **physikalische Verfahrenstechnik** in eine mechanische und eine thermische Verfahrenstechnik zu unterteilen. Bei der **mecha-**

nischen Verfahrenstechnik sind die Gesetze der Mechanik und bei der **thermischen Verfahrenstechnik** die Gesetze der Thermodynamik maßgebend für die Stoffumwandlung.

Die **Aufgaben der Verfahrenstechnik** liegen in der technischen Vorbereitung (Projektierung) und Durchführung von Stoffumwandlungsverfahren.

Im Einzelnen sind der Verfahrenstechnik vier Aufgabengebiete zugewiesen, und zwar:

1. theoretische Klärung der Stoffumwandlungsvorgänge,
2. Entwicklung von Produktionsverfahren durch optimale Kombination von Verfahrensbausteinen (Grundverfahren),
3. Planung und Auslegung von Produktionsanlagen,
4. Betrieb und Überwachung von Produktionsanlagen.

Die Anlagenplanung und Auslegung wird unter Zugrundelegung der wissenschaftlichen Laborergebnisse vorgenommen. Hierbei gilt es, die im Labor untersuchten Stoffumwandlungen auf großtechnischen Maßstab zu übertragen. Eine wertvolle Hilfe bei der Anlagenplanung ist der **Modellversuch** und das Studium der Vorgänge an einer Technikumsanlage oder Pilotanlage.

Zunehmend werden zur Anlagenplanung und Auslegung von Apparaten auch leistungsfähige **Anwenderprogramme** auf dem PC eingesetzt, mit deren Hilfe – unterstützt von Windows – Anlagenteile konstruiert und berechnet sowie Verfahren simuliert und visualisiert werden können.

Das **Technikum** ist der Versuchsstand, in dem Einzelapparate und Maschinen oder ein System von Apparaten, Maschinen und Hilfseinrichtungen unter Betriebsbedingungen untersucht werden.

Die **Pilotanlage**, oft auch Technikumsanlage genannt, ist das maßstäblich verkleinerte Funktionsmodell der Produktionsanlage, in dem das Zusammenwirken der Anlagenteile erprobt wird.

1.2 Apparat, Anlage, Verfahren

Ort der Stoffumwandlung ist der **Apparat**. Die Gesamtheit aller Apparate, Maschinen und Geräte zur Durchführung eines Verfahrens ergibt die **Anlage**. Die stoffseitige Verknüpfung der Apparate zu einer Anlage erfolgt durch Förder- einrichtungen, z. B. durch Rohrleitungen, Pumpen und Verdichter.

Apparate sind technische Gebilde, in denen Stoffe umgewandelt, behandelt, transportiert oder gelagert werden. Im Inneren des Apparats werden die für die Stoffumwandlung erforderlichen Betriebsbedingungen geschaffen.

Die Vorgänge in Anlagen lassen sich allgemein in drei **Verfahrensabschnitte** unterteilen:

1. **Aufbereiten** der Rohstoffe zur chemischen Reaktion.
2. **Stoffumwandlung** durch chemische Reaktionen.
3. **Aufarbeiten** der Reaktionsprodukte zu Fertigprodukten.

Aufbereitung und Aufarbeitung bestehen jeweils aus einer Folge von Stoffumwandlungsvorgängen, bei denen sich Stoffzusammensetzung und Stoffeigenschaften ändern.

Zur Erläuterung zeigt Bild 1.1 das vereinfachte Schema der Schwefelsäureherstellung nach dem Kontaktverfahren. Das Spezifische dieses Verfahrens ist hier nur die katalytische Umwandlung von SO_2 in SO_3 . Alle übrigen Vorgänge können auch in beliebigen anderen Verfahren im Bereich der Aufbereitung und Aufarbeitung ablaufen.

Ein **Verfahren** ist ein Ablauf von physikalischen, chemischen oder biologischen Vorgängen zur Gewinnung oder Beseitigung von Produkten. Verfahren bestehen aus einer Kombination austauschbarer **Grundverfahren**. Ein Grundverfahren ist der einfachste Vorgang bei der verfahrenstechnischen Durchführung.

Bild 1.1 Grundfließbild des Kontaktverfahrens.

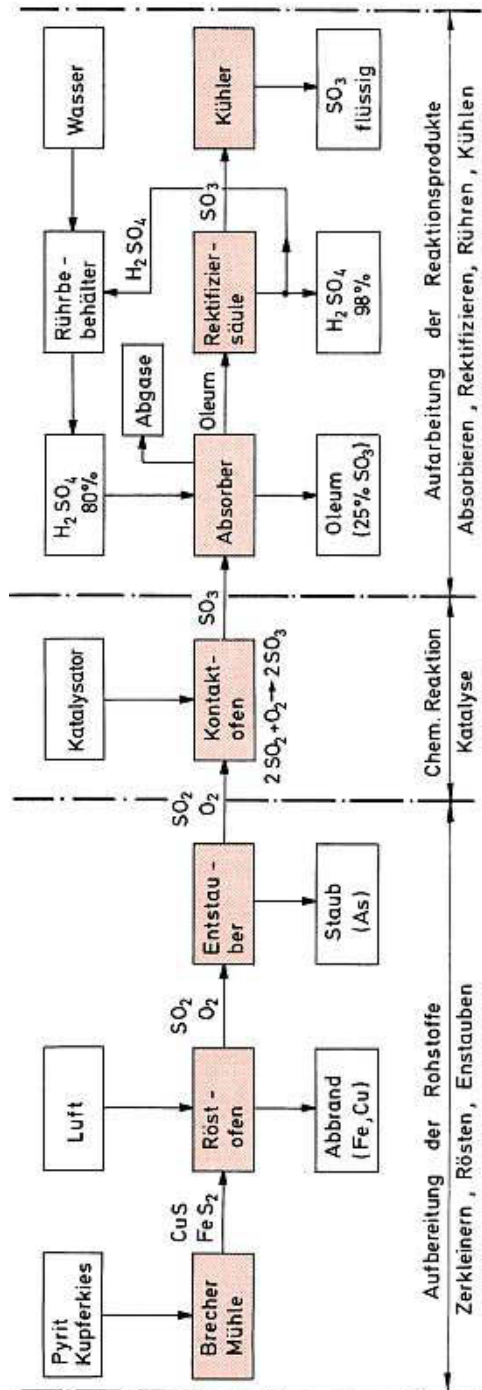


Tabelle 1.1 Systematik physikalischer Grundverfahren (Beispiele)

Grundverfahren zum	mechanisch	elektrisch und elektromagnetisch	thermisch
Trennen	Absetzen Filtern Zentrifugieren Scheidepressen Zerkleinern	Elektroabscheiden Magnetabscheiden Elektroosmose Elektrophorese Elektrodialyse	Verdampfen Destillieren Kristallisieren Extrahieren Absorbieren
Mischen, Vereinigen	Versprühen Rühren Kneten Vermengen Agglomerieren	—	Adsorbieren Lösen Begasen Sintern

1.3 Grundverfahren

Bei einem Grundverfahren verlaufen die Stoffumwandelungsvorgänge stets nach den gleichen wissenschaftlichen Prinzipien in den gleichen technischen Einrichtungen unabhängig davon ab, welches Produkt in dem Gesamtprozess erzeugt wird.

Tabelle 1.1 zeigt die **Systematik der physikalischen Grundverfahren**. Eine ähnlich ausgeprägte Systematik chemischer Grundverfahren gibt es nicht, und zwar aus zwei Gründen: Die Verfahren zur **chemischen Reaktionstechnik** lassen sich nicht so eindeutig gegeneinander abgrenzen wie die physikalischen Grundverfahren. Die **Reaktionsverfahren** sind nicht an bestimmte Apparatetypen gebunden. In einem Rührapparat z.B. können verschiedenartige chemische Grundverfahren ablaufen. Oft laufen die chemischen Reaktionsverfahren gemeinsam mit physikalischen Grundverfahren ab, z.B. Polymerisieren gemeinsam mit Suspendieren oder Emulgieren.

Die Konstruktion der **Reaktionsapparate** für die chemische Stoffumwandlung hängt hauptsächlich davon ab, in welchem **Aggregatzustand** und unter welchen Bedingungen die Stoffe miteinander reagieren. Die chemische Umsetzung und die chemischen Eigenschaften der Stoffe bestimmen den Werkstoff des Reaktionsapparats.

In Tabelle 1.2 sind wichtige chemische Grundverfahren zusammengestellt, bei denen die Art der Reaktion als Unterscheidungsmerkmal verwendet wird. Als **Hochdruck** bezeichnet man in der Verfahrenstechnik den Druckbereich zwischen 100 und 5000 bar.

Bei der Durchführung von Stoffumwandlungen in Apparaten unterscheidet man zwischen kontinuierlicher Arbeitsweise (Fließbetrieb) und diskontinuierlicher, periodischer Arbeitsweise (Chargenbetrieb).

Bei **kontinuierlicher Arbeitsweise** (Fließbetrieb)

Tabelle 1.2 Beispiele chemischer Grundverfahren

Thermische Verfahren	Elektrolyse-Verfahren	Katalytische Verfahren	Hochdruck-Verfahren	Photochemische Verfahren
Brennen Rösten Kalzinieren Kautifizieren	Lösungselektrolyse Schmelzfluss-elektrolyse	Alkylieren Hydrieren Oxidieren Isomerisieren Polymerisieren Cyclisieren Vinylieren	Synthetisieren z.B. von Ammoniak, Methanol, Harnstoff; Carbonylieren (Oxosynthese) Öl-Hydrierung	Chlorierung, Sulfochlorierung Vitaminisierung

wird das Ausgangsprodukt ununterbrochen in den Apparat eingeführt und das Endprodukt ununterbrochen entnommen. Die Arbeitsbedingungen. z.B. Druck, Temperatur und Konzentration, werden im Apparat konstant eingehalten.

Bei **periodischer Arbeitsweise** (Chargenbetrieb) laufen die Schritte Füllen, Stoffumwandlung und Entleeren nacheinander in einem Arbeitszyklus ab. Dabei ändern sich ebenso periodisch die Arbeitsbedingungen.

Die kontinuierliche Arbeitsweise im Fließbetrieb ist typisch für die moderne Verfahrenstechnik; sie ermöglicht den Durchsatz

Die periodische Arbeitsweise wird heute noch dann **wirtschaftlich** angewendet, wenn

1. die chemische Umsetzung sehr langsam abläuft (große Verweilzeit);
2. die Produkte nur in geringer Menge benötigt werden (z.B. Antibiotika);
3. die Anlage für unterschiedliche Herstellungsverfahren verwendbar sein soll (Mehrzweckanlage).

großer Stoffmengen mit Hilfe automatisierter Produktionsverfahren.

1.4 Lagern

Mit der Stoffumwandlung, dem Aufgabenbereich der Verfahrenstechnik eng verknüpft ist die Lagerung. Förderung und Dosierung von Stoffen. Am Anfang eines jeden Produktionsverfahrens steht die **Lagerung** der Rohstoffe und am Ende die Lagerung der Endprodukte. Häufig müssen auch noch Zwischenprodukte gelagert werden. Lagern und Fördern sind eigenständige Sachgebiete; sie werden daher nur kurz in dieser Einleitung behandelt.

Zum Lagern von Rohstoffen, Zwischen- und Endprodukten dienen **Lagerbehälter**. Zur Qualitätserhaltung der Stoffe müssen bestimmte Lagerungsbedingungen im Lagerbehälter oder Lagerraum aufrechterhalten werden. Unsachgemäß gelagerte Schüttgüter neigen zur Selbsterhitzung und Selbstentzündung.

Erze, Mineralien und Kohle werden oft im Freien in Schüttkegeln gelagert (Böschungswinkel 40° bis 60°). Normalerweise lagert man Feststoffe in Großbehältern, wie **Silos** und Bunkern, mit angeschlossenen Austragsvorrichtungen, z.B. Zellenräder, Schnecken, Drehteller. Darüber hinaus werden fahrbare Bunker und Behälter sowohl für die Lagerung als auch für den Transport eingesetzt. Empfindliche feste Güter lagern in Fässern, pulverförmige Güter in Säcken.

Flüssige Güter werden in Großtanks gelagert, deren Ausführung genormt ist (DIN 28 101, 28 105, 28 110). Schwefelsäure lagert meist in Kugelbehältern, NH_3 -Wasser in birnenförmigen Behältern. Bei der **Lagerung brennbarer Flüssigkeiten** muss die Verordnung über brennbare Flüssig-

keiten (VbF) beachtet werden. Flüssige Brennstoffe und Kraftstoffe werden oft in unterirdischen, elektrisch geerdeten, zylindrischen Lagerbehältern aufbewahrt.

Kugelbehälter haben zwei wesentliche Vorzüge:

1. geringste Oberfläche unter allen volumengleichen Behältern,
2. ideale Druckgestalt ermöglicht beste Werkstoffausnutzung.

Zu beachten bei der Flüssigkeitslagerung ist der **hydrostatische Druck** der Flüssigkeit $p = h \cdot \rho \cdot g$, der die Behälterwandung beansprucht.

Große **Gasmengen** werden in ortsfesten Behältern gespeichert. Man verwendet Kugelgasbehälter, Glockengasbehälter und Scheibengasbehälter. Glocken- und Scheibengasbehälter haben bewegliche Behälterteile, die eine Änderung des Gasvolumens mit der Temperatur ermöglichen. Der Gasdruck bleibt dann – im Gegensatz zum Kugelbehälter – konstant. Die Abdichtung des Gasvolumens gegen die Atmosphäre erfolgt beim **Glockengasbehälter** (heute veraltet) durch eine **Sperrflüssigkeit**, meist durch Wasser. Daher enthält das gespeicherte Gas immer etwas Wasserdampf.

Beim neuzeitlichen **Scheibengasbehälter** dient ein Blechkragen als Abdichtung, der in einen an der Wand herabrieselnden Teerfilm eintaucht. Das Gas enthält daher immer etwas Teerdampf. Scheibengasbehälter haben einen größeren Nutzinhalt als Glockengasbehälter, sie können mehrere 100 000 m³ Gas aufnehmen. Absolute

Tabelle 1.3 Druckgasflaschen

Gasart	Kennfarbe	Ventilanschluss DIN 477 TI	Volumen in l	Druck in bar	Füllmenge
Sauerstoff	Blau	R ¾	40 50	150 200	6 000 l 10 000 l
Acetylen	Gelb	Spannbügel	40	19	8 kg 10 kg
Propan	Rot	W 21,8 × 1/14 LH	10 50	8,53	4,25 kg 21,25 kg
alle brennb. Gase außer Acetylen	Rot	W 21,8 × 1/14 LH	20 50	200	4 000 l 10 000 l
Stickstoff	Grün	W 24,32 × 1/14	20 50	200	4 000 l 10 000 l
Kohlendioxid	Grau	W 21,8 × 1/14	13,4 40	57,29	10 kg 30 kg
Edelgase	Grau	W 21,8 × 1/14	20 50	200	4 000 l 10 000 l

Abdichtung ist bei Behältern mit beweglichen Teilen unmöglich. Der tägliche **Gasverlust** beträgt ungefähr 0,3%.

Kleinere Gasmengen lagert man in ortsbeweglichen Behältern, z.B. in Tankwagen und Stahlflaschen. Je nach Gasart beträgt der Druck in **Gasflaschen** 3...200 bar. Der Inhalt der Gasflaschen

ist durch einen breiten Farbstrich gekennzeichnet. Die Ausführung des Ventilanschlusses ist von der Gasart abhängig (Tabelle 1.3). Bei Errichtung und Betrieb von ortsbeweglichen Gasbehältern muss die **Druckgasverordnung** beachtet werden.

1.5 Fördern

Beim innerbetrieblichen **Stofftransport** unterscheidet man zwischen Förderwegen und Fördermitteln.

Förderwege führen die Stoffströme, **Fördermittel** bewegen das Fördergut.

1.5.1 Rohrleitungen und Armaturen

Die wichtigsten Förderwege in der Verfahrenstechnik sind die Rohrleitungen. **Rohrleitungen** verbinden die Apparate zu einer Anlage. Rohrleitungsnetze versorgen die Produktionsanlagen mit Energieträgern (Heizgas, Dampf, Druckluft), Rohstoffen und Zwischenprodukten; sie führen die Fertigprodukte dem Verbraucher oder Tanklagern zu. Rohrleitungen werden auf Rohrbrücken oder in offenen Rohrkanälen verlegt.

Die lichte Höhe einer **Rohrbrücke** darf dem Eisenbahnprofil entsprechend nicht unter 6,5 m liegen. Zur besseren Übersicht sollte man die Rohrverlegung auf Rohrbrücken oder in Rohrkanälen einheitlich so durchführen, dass z.B. Dampf-, Kondensat-, Druckluft- und Stickstoffleitungen immer am gleichen Platz liegen. Dampf- und

Kondensatleitung erhalten eine **Wärmeisolierung**, z.B. aus Mineral- oder Glaswolle. Wärmespannungen in Rohrleitungen infolge Abkühlung oder Erwärmung des Fördermediums müssen durch **Dehnungsausgleicher** (Kompensatoren) verhindert werden.

Die **Druckstufen** und **Nennweiten** der Rohrleitungen sind genormt (DIN 2401 Teil 1), ebenso die Anschlussmaße der **Flansche** (DIN 2501). Rohrleitungen werden nach DIN 2403 zur Erleichterung der Betriebsführung und aus Sicherheitsgründen dem Durchflussstoff entsprechend durch farbige, rechteckige Schilder **gekennzeichnet** (Tabelle 1.4). Eine Spitze gibt die Durchflussrichtung an. Bei wechselnder Richtung hat das Schild zwei Spitzen. Die Schilder tragen entweder die Bezeichnung des Durchflussstoffs oder eine **Kennzahl** (z.B. 1.4 für Kondensat, 3.2 für Heißluft, 5.4 für Chlorgas) oder die chemische Formel (Bild 1.2).



Bild 1.2 Schilder zur Kennzeichnung von Rohrleitungen für Kreislaufdampf

Tabelle 1.4 Kennfarben für Rohrleitungen (DIN 2403)

Durchflussstoff	Gruppe	Farbe	Farbmuster in RAL 840 HR
Wasser	1	Grün	RAL 6018
Wasserdampf	2	Rot	RAL 3000
Luft (auch Vakuum)	3	Grau	RAL 7001
Gase, brennbare	4	Gelb ¹⁾	RAL 1021
–, nicht brennbare	5	Gelb ²⁾	RAL 1021
Säuren	6	Orange	RAL 2003
Laugen	7	Violett	RAL 4001
Flüssigkeiten, brennbare	8	Braun ¹⁾	RAL 8001
–, nicht brennbare	9	Braun ²⁾	RAL 8001
Sauerstoff	0	Blau	RAL 5015

¹⁾ auch mit Zusatzfarbe Rot

²⁾ mit Zusatzfarbe Schwarz

Bei **radioaktivem Durchflussstoff** ist das Strahlungskennzeichen nach DIN 25400 zusätzlich anzubringen.

In die Rohrleitungen werden **Armaturen** eingebaut. Armaturen sind Einrichtungen zum Steuern, Regeln und Messen des Durchflussstoffes. Von der Funktion her unterscheidet man im Wesentlichen Absperr- und Regelorgane, Sicherheitseinrichtungen und anzeigende Einrichtungen.

Absperr- und Regelorgane dienen zur Ein- und Ausschaltung des Durchflussstromes sowie der Durchflussregelung. Hierzu verwendet man Hähne, Schieber, Ventile und Klappen.

Bei **Schiebern** und **Hähnen** wird das Verschlußstück quer zum Sitz abgeschoben. Bei Ventilen und Klappen wird es vom Sitz abgehoben.

Sicherheitseinrichtungen verhindern Überlastungen durch Überdruck, unzulässiges Rückfließen des Durchflussstoffes und Leitungsbrüche infolge Wärmedehnungen oder mechanische Belastungen.

Sicherheitsventile und **Druckminderventile** dienen zur Überlastungssicherung, **Rückschlagventile** und **Rückschlagklappen** zur Rückflusssicherung. Ausgleichsvorrichtungen, z.B. Linsen- und Stopfbuchsenausgleicher, verhindern Leitungsbrüche.

Für Dämpfe und Gase verwendet man gewichts- oder federbelastete **Vollhubsicherheitsventile**. Bei Vollhubsicherheitsventilen hebt die Kraft des abblasenden, expandierenden Mediums den Ventilkegel weiter an.

Es ist streng verboten, die Einstellung von Sicherheitsventilen unbefugt zu verändern. Die Kraft auf den Ventilkegel darf 6000 N (6 kN) nicht überschreiten. Bei höheren Drücken und größeren Abblasmengen sind mehrere Sicherheitsventile anzuordnen.

Wichtige **anzeigende Einrichtungen** sind Manometer und Flüssigkeitsstandanzeiger. Zu den Sonderarmaturen gehören **Kondenswasserableiter** – auch Kondenstöpfe genannt –; sie dienen zur selbsttätigen Ableitung des an Dampfleitungen und Apparateheizflächen entstehenden Kondensats. Die Ableitung kann periodisch oder kontinuierlich erfolgen.

Fehlende oder mangelhafte Kondensatableitung verursacht erhebliche Energieverluste.

Rohrleitungsanlagen werden durch grafische Symbole dargestellt. Tabelle 1.5 zeigt wichtige **Symbole** für Rohrleitungsanlagen nach DIN 2429. Die Lage der Symbole im Rohrleitungsplan muss dem Leitungsverlauf entsprechen.

Aufgabe der Fördermittel ist es, das Fördergut betriebssicher, qualitätsschonend und schnell mit geringstem Kostenaufwand über eine möglichst kurze Wegstrecke zu bewegen.

Die Wahl des geeigneten Fördermittels richtet sich nach dem Aggregatzustand, der Teilchengröße, den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Förderguts sowie den u.U. gleichzeitig mit dem Fördern durchzuführenden Stoffumwandlungsprozessen (z.B. Trocknen, Mischen, Umsetzen). Je nach Aggregatzustand unterscheidet man Fördermittel für Feststoffe, für Flüssigkeiten und für Gase.

1.5.2 Feststoffförderung

Fördermittel für feste Stoffe werden unterteilt in diskontinuierliche Förderer und Stetigförderer.

Tabelle 1.5 Grafische Symbole für Rohrleitungen und Armaturen nach DIN 2429

Symbol	Benennung	Symbol	Benennung	Symbol	Benennung
	Grundleitung mit Angabe der Fließrichtung		Lyra-Kompensator		Stellantrieb mit Elektromagnet
	Grundleitung mit Begleitheizung oder -kühlung		Schiebemuffe		Stellantrieb, dessen Hilfsenergie der Durchflussstoff der Rohrleitung ist
			Schauglas		
	Verschluss allgemein		Absperrarmatur, allgemein		Stellantrieb, handbetätigt
	Blindflansch		Absperrventil		
			Absperrhahn		
	Flanschverbindung		Absperrklappe		Stellantrieb mit Federkraft
	Klammerverbindung		Rückschlagklappe		Stellantrieb mit Membrane
	Schraubverbindung		Stellantrieb mit rotierendem System – allgemein		Stellantrieb mit Gewicht
	Einsteckmuffe				
	Kupplung				
	Schweiß- oder Lötverbindung		– mit Elektromotor		Stellantrieb mit Schwimmer
	Kompensator, allgemein				
	Wellrohr-Kompensator		Stellantrieb mit Kolben		Kondensatableiter, allgemein

Diskontinuierliche Förderer, z.B. Kräne, Aufzüge und Bahnen haben in der Verfahrenstechnik nur geringe Bedeutung. Wesentlich wichtiger sind die **Stetigförderer**, die das Fördergut kontinuierlich über die Förderwege transportieren.

Wichtige Stetigförderer in der Verfahrenstechnik sind Bandförderer, Kettenförderer, Schneckenförderer, Schwingförderer, Becherwerke und pneumatische Förderer.

Unter den Bandförderern haben die universell verwendbaren **Gurtbandförderer**, auch Förderbänder genannt, die größte Bedeutung. Bild 1.3 zeigt Schema und Querschnitt eines Gurtbandförderers mit Muldentragrolle. Der endlose, durch einen Elektromotor angetriebene Gurt besteht meist aus Synthekautschuk mit Textileinlagen. Bei höheren Temperaturen nimmt man Stahlbänder. Folgende Daten werden genannt:

Gurtbreite bis zu 3000 mm, Achsabstand zwischen Antriebs- und Spanntrommel bis zu 1000 m. Gurtgeschwindigkeit bis über 5 m/s und Durchsätze bis zu 10 000 t/h.

Schüttwinkel α und Gurtanstiegswinkel β bei Schrägförderung hängen vom Fördergut ab. Der Anstiegswinkel β sollte 18° nicht übersteigen. Die Aufgabe des Förderguts auf den Gurt und der Abwurf vom Gurt wird bei größerem Durchsatz mechanisch durch **Schurren** vorgenommen.

Neben den Gurtbandförderern gibt es noch **Gliederbandförderer**. Die Tragglieder bestehen aus gelenkig verbundenen Platten, Trögen oder Kästen aus Metall, die auf Rollen über Laufschienen bewegt werden. Gliederbandförderer verwendet man zur Förderung von grobstückigen, harten und heißen Gütern. Folgende Daten werden angegeben: Gurtbreite bis 1,5 m, Anstiegswinkel bei

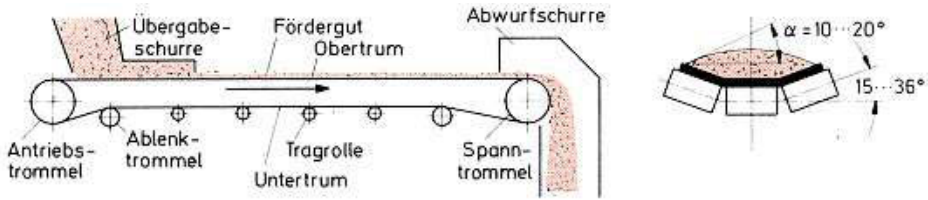


Bild 1.3 Gurtbandförderer (Förderband)

Kastenbandförderern bis 40° , Fördergeschwindigkeit bis 0,5 m/s. Gliederbandförderer sind stoßempfindlich, brandunempfindlich und verschleißfest.

Kettenförderer ähneln den Gliederbandförderern. Ein Trog dient als ruhendes Tragorgan. Zug- bzw. Schuborgan ist eine endlose Laschenkette mit außenseitig angebrachten Querstegen, Kratzer genannt. Die Kratzer nehmen die auf dem Trogboden liegende Gutschicht mit. Derartige **Kratzerförderer** eignen sich für waagerechte oder geneigte Schüttgutförderung. Läuft die Kette in einem allseitig geschlossenen Trog, dann spricht man von **Trogkettenförderern**. Sitzen die Schaufeln auf der Innenseite der Kette, so handelt es sich um **Schleppkettenförderer**. Daten für Kettenförderer: Fördergut-Durchsatz bis 150 t/h. Fördergeschwindigkeit bis 0,5 m/s, Neigungswinkel bis 40° .

Schneckenförderer sind Schüttgutförderer für vorwiegend waagerechte und schwach geneigte Förderung. Tragorgan ist ein ruhender Trog. Als Schuborgan dient eine Schnecke. Die Schnecke besteht aus einem schraubenförmig um ein Rohr gewundenes Blech. Schneckenförderer eignen sich für kurze Förderwege und geringe Fördergut-Durchsätze. Leicht zerreibbare Güter können beschädigt werden. Feuchtes Gut verstopft den Fördertrug.

Schwingförderer fördern das Gut durch Massenkraft nach dem **Mikrowurfprinzip** oder nach dem **Gleitförderprinzip**. Beim Mikrowurfprinzip führt die Schwingrinne (als Fördertrog oder Förderrohr) eine schräg nach oben gerichtete schwingende Bewegung mit hoher Frequenz (rd. 50 Hz) und kleiner Amplitude (≈ 1 mm) aus. Das Gut wird in **Mikrowürfen** fortbewegt und kommt während jeder Schwingungsperiode nur kurzzeitig mit der Schwingrinne in Berührung. Wird die Rinne um ein stehendes Rohr wendelförmig gewunden, so ergibt sich ein **Wendelförderer**. Beim Gleitförderprinzip erfolgt die Schwingbewegung in der Ebene der Unterlage. Die Verzögerung

am Schwinghubende ist so groß gewählt, dass das Gut durch die eigene Trägheitskraft in Förderrichtung auf der Unterlage gleitet.

Schwingförderer neigen zur Entmischung des Förderguts. Fördergutströme bis zu $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ bei Trögen und bis zu $150 \text{ m}^3/\text{h}$ bei Rohren.

Zur Schwingungserzeugung werden zwei unterschiedliche Systeme eingesetzt: Unwuchtschwinger und elektromagnetischer Vibrator. Der **Unwuchtschwinger** ist ein Elektromotor, der eine exzentrisch gelagerte Schwingmasse antreibt und so seine Unterlage (Arbeitsgerät) in mechanische Schwingungen versetzt. Beim **Vibrator** (Bild 1.4) schwingt ein Elektromagnet, der durch Koppelfedern mit dem Ankerteil verbunden ist. Magnet- und Ankermasse schwingen gegeneinander. Die Schwingweite ist abhängig vom Verhältnis System-Eigenfrequenz und Antriebsfrequenz. Der Vibrator wird durch Zusatzmassen an das Arbeitsgerät angepasst. Vorteile des Vibrators gegenüber dem Unwuchtschwinger: kein Verschleiß, Änderung der Schwingbreite während des Betriebs durch Erregerspannungsänderung.

In der chemischen Industrie müssen häufig pulver- und staubförmige Feststoffe transportiert werden. Dazu dienen hauptsächlich pneumatische Förderer und Druckluftmembranpumpen.

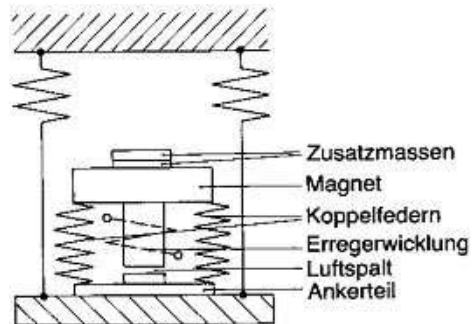


Bild 1.4 Prinzip des elektromagnetischen Vibrators

Pneumatische Förderer transportieren körnige oder staubförmige Güter in einem Luftstrom. Man unterscheidet Saugluft- und Druckluftanlagen. Kennzeichnend für die pneumatische Förderung sind Druckverlust und Stopfgrenze. Der **Druckverlust** bestimmt den Energieaufwand. Die **Stopfgrenze** ist maßgebend für den Förderstrom.

Bei Erreichen der Stopfgrenze führt bereits eine kleine Steigerung der zugeführten Gutmenge oder eine kleine Verringerung der Luftgeschwindigkeit zum Verstopfen der Rohrleitung.

Es können mit pneumatischen Förderern Feststoffe bis zu 50 mm Korndurchmesser transportiert werden. Die Geschwindigkeit des Luftstroms muss größer sein als die Fallgeschwindigkeit (Schwebegeschwindigkeit) des Förderguts; sie liegt zwischen 10 und 50 m/s. Der Unterdruck in Saugluftanlagen beträgt etwa 0,5 bar, der Überdruck in Druckluftanlagen 0,75 bar. Bei der Saugluftförderung beträgt die Länge des Förderwegs maximal 400 m. Druckluftanlagen können bis zu 700 m überwinden.

Vorteile der pneumatischen Förderung: Vollkommen selbsttätige Förderung; geringer Raumbedarf; geringer Bedienungsaufwand; niedrige Anlagekosten; größte Schonung des Förderguts; Möglichkeit des gleichzeitigen Durchführens von Grundverfahren (Trocknen) und chemischen Reaktionen, wobei die festen Teilchen auch Katalysatoren sein können.

Eine Alternative ist die schonendere Pulverförderung mit **Druckluftmembranpumpen**, in denen die Luftgeschwindigkeit nur 3 bis 5 m/s beträgt. Das Fördergut wird innerhalb der Pumpe fluidisiert. Zwei durch eine Kolbenstange verbundene Elastomer-Membrane werden mit Druckluft wechselweise beaufschlagt und gleichsinnig bewegt. Bei jedem Hub saugt die eine Membrane das Gut an, und die andere Membrane verdrängt es in die Förderleitung. Druckluftmembranpumpen sind auch zur Flüssigkeitsförderung universell verwendbar.

1.5.3 Flüssigkeitsförderung

Fördermittel für Flüssigkeiten sind **Pumpen**. Nach der Wirkungsweise unterscheidet man Verdrängerpumpen und Zentrifugalpumpen.

Bei den **Verdrängerpumpen** wird die Flüssigkeit durch Verdrängerelemente (z.B. Kolben, Zahnräder, Schraubenspindeln, Schnecken, Flügel oder Trochoiden) aus dem Pumpenkörper in die Druckleitung verdrängt. Durch die Verdrängung

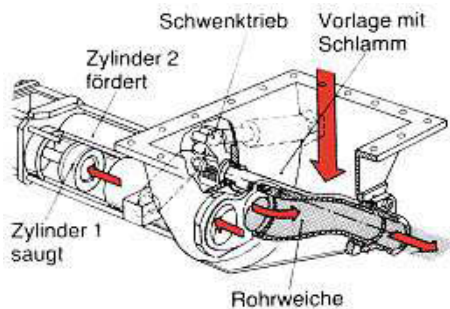


Bild 1.5 Dickstoff-Rohrweichen-Kolbenpumpe (nach Putzmeister)

wird gleichzeitig neue Flüssigkeit in den Pumpenkörper eingesaugt. Die Verdrängerkörper können entweder oszillieren oder rotieren.

Wichtige **oszillierende Verdrängerpumpen** sind Hubkolbenpumpen und Membranpumpen. **Rotierende Verdrängerpumpen** sind z.B. Zahnradpumpen, Schraubepumpen, Flügelzellenpumpen, Exzentrerschneckenpumpen und Schlauchpumpen.

Membranpumpen sind stopfbuchslose, unempfindliche Verdrängerpumpen mit großer Lebensdauer. Als Verdränger dient eine Membrane aus Kunststoff oder Gummi, welche die Antriebsseite hermetisch von dem Flüssigkeitsraum abtrennt. Membranpumpen eignen sich als sog. **Chemiepumpen** zum Fördern von Säuren, Laugen, Suspensionen und Schlämmen.

Spezielle Verdrängerpumpen dienen als **Dickstoffpumpen** zur Förderung steifer, pastöser Schlämme, z.B. in Klärwerken und Sondermüll-Verarbeitungsanlagen. Bild 1.5 zeigt als Beispiel eine **Rohrweichen-Kolbenpumpe**. Die Pumpe hat zwei hydrostatisch angetriebene Förderzylinder. Im Bild saugt Zylinder 1 aus der mit Schlamm gefüllten Vorlage an, während gleichzeitig Zylinder 2 in ein C-förmiges Rohr fördert. Haben die Kolben ihre Totlagen erreicht, wird das Rohr vor die Öffnung von Zylinder 1 geschwenkt (**Rohrweiche**). Jetzt saugt Zylinder 2 an, und Zylinder 1 fördert. Förderbar sind Schlämme mit bis zu 50% Feststoffanteil (stichfest) mit Fremdkörpern bis zur Größe der lichten Rohrweite. Förderdruck bis 120 bar, Förderstrom bis 250 m³/h.

Bei den **Zentrifugalpumpen** – Kreiselpumpen – wird die Flüssigkeit von einem Laufrad in rasche Rotation versetzt und von den Laufschau-feln von innen radial nach außen geleitet. Die Fliehkraft erteilt dabei der Flüssigkeit Geschwin-

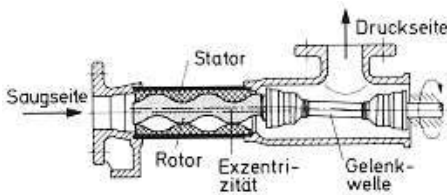


Bild 1.6 Exzentrerschneckenpumpe

digkeitsenergie, die dann im Gehäuse in Druckenergie (Förderhöhe) umgesetzt wird. Maßgebend für die Energieumwandlung in der Zentrifugalpumpe ist die **Bernoullische Gleichung**.

Wichtige Zentrifugalpumpen sind radial fördernde **Kreiselpumpen** und axial fördernde **Propellerpumpen**. Bei stopfbuchlosen Kreiselpumpen – Chemiepumpen – wird der Flüssigkeitsraum hermetisch von der Umgebung abgeschlossen. Das erreicht man durch **Paramagnetantrieb** oder durch **Spaltröhrenmotor**.

Selbstaugende Kreiselpumpen tragen auf der Pumpenwelle als Hilfsvakuumpumpe eine Wasserringpumpe. **Seitenkanal-Kreiselpumpen** evakuieren **ohne** Hilfseinrichtung die Saugleitung und saugen die Flüssigkeit selbsttätig an; sie können Flüssigkeits-Gas-Gemische fördern (bis 30 Vol.-% Gasanteil).

Propellerpumpen werden zum Fördern großer Flüssigkeitsmengen auf geringen Förderhöhen eingesetzt; sie eignen sich als **Umwälzpumpen** in Verdampferanlagen oder zum Fördern von Dickstoffen, Schlämmen und von Kristallbrei.

Häufig findet man als Chemiepumpen **Exzentrerschneckenpumpen**, die unter dem Namen **Mohnopumpen** allgemein bekannt sind (Bild 1.6).

Förderstrom \dot{V} , Förderhöhe H , Drehzahl n , Leistung P und Laufrad-Außendurchmesser D sind bei zwei geometrisch ähnlichen Zentrifugalpumpen-Ausführungen durch folgende **Ähnlichkeitsgesetze** miteinander verknüpft:

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_1^3}{D_2^3} \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} = \frac{D_1^2}{D_2^2}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3} = \frac{D_1^5}{D_2^5}$$

Diese Beziehungen gelten auch für die **Zentrifugalverdichter**.

Zwischen Verdrängerpumpen und Zentrifugal-

pumpen besteht ein wesentlicher hydrodynamischer Unterschied:

Bei Zentrifugalpumpen erfolgt eine Umwandlung von **Geschwindigkeitsenergie** (dynamischer Energie) in **Druckenergie** (statische Energie) und umgekehrt. Bei den Verdrängerpumpen findet keine derartige Energieumwandlung statt.

Die Verdrängung vollzieht sich im Bereich **statischer Druckenergie**. Bedingt durch die Energieumwandlungsverluste sind daher die Wirkungsgrade von Zentrifugalpumpen niedriger als die von Verdrängerpumpen.

Beiden Pumpenarten ist gemeinsam, dass die Flüssigkeit durch einen im Pumpenkörper erzeugten **Unterdruck** angesaugt wird. Der äußere Luftdruck drückt die Flüssigkeit in den Pumpenkörper. Daraus folgt:

Die **Saughöhe der Pumpe** ist begrenzt durch die Differenz zwischen Luftdruck und erzeugtem Unterdruck. Theoretisch beträgt die Saughöhe für Wasser 10 m, praktisch nur etwa 7 m.

Die **Antriebsleistung** ergibt sich für Verdränger- und Zentrifugalpumpen aus der (auch für Zentrifugalverdichter gültigen) Gleichung:

$$P = \frac{100 \cdot \dot{V} \cdot p}{\eta_{\text{ges}}} \quad \text{oder} \quad P = \frac{\dot{V} \cdot H \cdot \rho \cdot g}{1000 \cdot \eta_{\text{ges}}}$$

Hierin ist: \dot{V} Volumenstrom in m^3/s ; p Förderdruck in bar; η_{ges} Gesamtwirkungsgrad; P Leistung in kW; H Förderhöhe in m; ρ Dichte in kg/m^3 ; g Fallbeschleunigung in m/s^2 .

Tabelle 1.6 bringt einen Vergleich der Eigenschaften von Verdränger- und Zentrifugalpumpen. Außer diesen beiden dominierenden Pumpengruppen findet man in der Verfahrenstechnik hauptsächlich noch Treibmittelpumpen und Druckgas-pumpen.

Treibmittelpumpen (Strahlpumpen) haben keine bewegten Teile; sie saugen und fördern Flüssigkeiten mit Hilfe von Treibmittelstrahlen, die mit hoher Geschwindigkeit aus einer Treibdüse austreten. In der Treibdüse entsteht durch die Umsetzung von statischer Energie in Geschwindigkeitsenergie ein Unterdruck, der die Förderflüssigkeit ansaugt. Eine der Treibdüse nachgeschaltete Mischdüse wandelt im Diffusor die Geschwindigkeitsenergie des aus Treibmittel und Fördermittel

Tabelle 1.6 Fördermittel für Flüssigkeiten

Art	Bauform	Förderdruck in bar	Förderstrom in m³/h	Förderweise	Eigenschaften
Verdrängerpumpen, hin- und hergehend	Kolbenpumpe einstufig	...30	...20	absatzweise	Förderstrom unabhängig von Förderhöhe, große Förderhöhen bei Mehrzylinderbauweise, Ventile erforderlich, günstiger Wirkungsgrad, langsamlaufender Antrieb erforderlich
	Kolbenpumpe mehrstufig	...1000	...400		
	Membranpumpe	...20	...300		
Verdrängerpumpen, rotierend	Zahnradpumpe	10...100	...300	stetig	Keine Ventile, geringer Platzbedarf. Zur Förderung zäher Stoffe geeignet, Förderstrom proportional der Drehzahl, rasch laufender Antrieb möglich
	Schraubpumpe	...20	...200		
	Kreiskolbenpumpe	...20	...200		
Zentrifugalpumpen	Kreiselpumpe einstufig	...30	...2000	stetig	Große Drehzahl, Kupplung mit schnelllaufenden Antrieben, keine Ventile, geringer Platzbedarf, unempfindlicher gegen Verunreinigungen, Förderstrom und Förderhöhe voneinander abhängig, große Förderströme
	Kreiselpumpe mehrstufig	...400	...3500		
	Seitenkanalpumpe, ein- und zweistufig	20...40	...25		
	Propellerpumpe	...2	...100 000		

bestehenden Gemischs (teilweise) in Druck um. Als Treibmittel wird Dampf eingesetzt, wenn sich das Kondensat mit dem Fördergut vermischen darf.

Der Förderstrom der Dampfstrahlpumpen liegt bei rd. 20 m³/h, die Förderhöhe bei 5 bar. Der Gesamtwirkungsgrad ist gering (2...15%).

Druckgaspumpen sind Heber, bei denen als Treibmittel Gas verwendet wird. Bei der **Mammutpumpe** (Bild 1.7) wird Druckluft am unteren Ende der Steigleitung zugeführt. Es entsteht ein Flüssigkeits-Luft-Gemisch, dessen Dichte ρ_M niedriger ist als die Dichte ρ der angesaugten Flüssigkeit. Infolgedessen wird das Gemisch hochgedrückt nach der Gleichgewichtsbeziehung: $H_E \cdot \rho = (H + H_P) \cdot \rho_M$. Die Förderhöhe ist also durch Eintauchtiefe H_E und Dichteverhältnis ρ/ρ_M begrenzt: $H = H_E \cdot (\rho/\rho_M - 1)$.

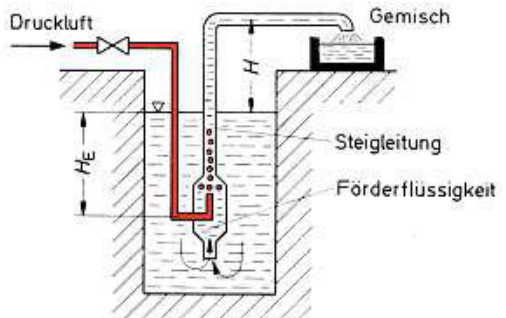


Bild 1.7 Arbeitsprinzip einer Mammutpumpe

Tabelle 1.7 Fördermittel für gasförmige Stoffe

Art	Bauform	hauptsächliche Anwendung	Druckverhältnis je Stufe	Förderstrom in m ³ /h	Eigenschaften
Verdrängermaschinen	oszillierend	Hubkolbenverdichter	...7	500... 25 000	Erzeugung hoher Drücke (bis 7000 bar), Ventile erforderlich, absatzweise Förderung, niedrige Förderströme
		Membranverdichter	...15	...100	
	rotierend	Schraubenverdichter	Kompressor, Gebläse	...5	200... 40 000
Vielzellenverdichter		Kompressor, Gebläse	...4	250...7 500	
Kreiskolbenverdichter		Gebläse	...2,5	200... 18 000	
Turbo- maschinen	Radialverdichter	Kompressor, Gebläse, Ventilator	4...12	1500... 400 000	Große Gasreinheit, geringe Massenkräfte, hohe Drehzahlen, große Förderströme
	Axialverdichter	Gebläse, Ventilator	1,1...6	50 000... 1 000 000	

Mammutpumpen eignen sich zum Umpumpen von aggressiven und stark verunreinigten Stoffen. Erreichbar sind $H = 60$ m und $\eta_{ges} = 30 \dots 50\%$.

Druckfässer, sog. Montejus, fördern aggressive Flüssigkeiten mit Hilfe eines über dem Flüssigkeitsspiegel liegenden Luft-, Gas- oder Dampfpolsters als Treibmittel. Das Treibmittel drückt das Fördergut durch ein bis zum Faßboden reichendes Steigrohr. Druckfässer sind häufig mit Rührwerken und anderen Apparaturen gekoppelt.

1.5.4 Gasförderung

Die Förderwege der Gasförderung sind Rohrleitungen, Kanäle und Schächte; die Fördermittel sind Verdichter, die nach Höhe des Förderdrucks in Kompressoren, Gebläse und Ventilatoren unterteilt werden.

Kompressoren erzeugen Gasdrücke zwischen 3 und 5000 bar. **Gebläse** fördern mit Drücken zwi-

schen 1,3 und 3 bar. **Ventilatoren** arbeiten in einem knapp über dem Atmosphärendruck liegenden Druckbereich (1...1,3 bar).

Nach der Wirkungsweise unterteilt man die Verdichter in Kolbenmaschinen und Turbomaschinen. Ventilatoren werden nur als Turbomaschinen gebaut.

Bei den **Kolbenmaschinen** (Verdrängermaschinen) kennt man Hubkolben- und Drehkolbenverdichter (Vielzellen-Rotationsverdichter und Schraubenverdichter). Die Turboverdichter werden als Radial- und Axialmaschinen hergestellt.

Die Wirkungsweise der Kolbenmaschinen beruht auf der Verdrängung eines Luftvolumens durch oszillierende oder umlaufende Verdrängerelemente, z.B. durch Kolben oder Flügel. **Turbomaschinen** verdichten das Gas mit Hilfe der Fliehkraft, die durch die Rotation eines Laufrades erzeugt wird. Darüber hinaus werden in Sonderfällen Treibmittelverdichter eingesetzt, die mit Dampf oder Druckwasser als Treibmittel Gase ansaugen, verdichten und fördern.

Kompressoren verwendet man in der Verfahrenstechnik, um gasförmige Roh-, Zwischen- und Fertigprodukte auf die für die Stoffumwandlung oder Lagerung erforderliche Druckhöhe zu verdichten. **Gebläse und Ventilatoren** werden zur Förderung und Umwälzung von Gasen eingesetzt, wenn nur niedrige Druckunterschiede zu überwinden sind.

Tabelle 1.7 zeigt eine Gegenüberstellung der Kompressoren, Gebläse und Ventilatoren.

Zahlreiche Stoffumwandlungsverfahren laufen bei **Unterdruck** (Vakuum) ab, z.B. Verdampfung und Rektifikation. Der notwendige Unterdruck wird mit Pumpen erzeugt. In der Unterdrucktechnik unterscheidet man nach DIN 28 400 vier **Vakuumbereiche** mit folgenden Unterdrücken:

Großvakuum: $10^3 \dots 1 \text{ mbar} = 760 \dots 0,75 \text{ Torr}$

Feinvakuum: $1 \dots 10^{-3} \text{ mbar} = 0,75 \dots 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$

Hochvakuum: $10^{-3} \dots 10^{-6} \text{ mbar} = 7,5 \cdot 10^{-4} \dots 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ Torr}$

Ultrahochvakuum: unter $10^{-6} \text{ mbar} =$
unter $7,5 \cdot 10^{-7} \text{ Torr}$

Die zur Unterdruckerzeugung eingesetzten Pumpen – auch **Vakuumpumpen** genannt – werden

nach DIN 28 400 unterteilt in Verdrängerpumpen, Turbopumpen, Treibmittelpumpen, Sorptionspumpen und Kryopumpen.

Mit Verdrängerpumpen – Drehkolben-, Drehschieber- und Roots-pumpen – sowie Turbopumpen wird Grob- und Feinvakuum erzeugt.

Treibmittelpumpen sind z.B. die in der Verdampfertechnik oft eingesetzten Dampfstrahlpumpen. Wasserdampf dehnt sich hier in einer Überschalldüse aus und erzeugt einen Unterdruck. Durch Hintereinanderschaltung mehrerer **Dampfstrahlpumpen**, z.B. beim Kristallisieren, erreicht man den Feinvakuumbereich.

Quecksilberdampf- oder Öldampf-**Diffusionspumpen** gehören ebenfalls zu den Treibmittelpumpen. Durch Diffusion treten die Gasmoleküle in die Düse ein. Dort wird die Stoßenergie des Treibmittel-Dampfstrahls auf das Gas übertragen, wodurch die Gasförderung zustande kommt. Diffusionspumpen eignen sich zur Erzeugung von Hoch- und Ultrahochvakuum.

In den **Sorptionspumpen** dienen Sorptionsmittel, z.B. Aktivkohle oder Aluminiumsilikate (Zeolithe), zur laufenden Beseitigung der Gase aus einem Raum durch chemische oder physikalische Bindung.

Kryopumpen sind Gaskondensatoren, die mit flüssigem Wasserstoff oder Helium gekühlt werden. Der zu evakuierende Raum wird mit Kühlflächen ausgekleidet. Alle Gase mit höherem Taupunkt als die Kühlmitteltemperatur werden flüchtig oder fest niedergeschlagen. Sehr große Saugleistungen sind erreichbar ($\dots 10^7 \text{ m}^3/\text{h}$).

1.6 Messen, Steuern und Regeln

Die in den Produktionsanlagen ablaufenden Vorgänge werden ständig überwacht. Falls erforderlich, muss von Hand oder durch Automatik in den Produktionsablauf eingegriffen werden. Zur Überwachung und Führung der Stoffumwandlungsverfahren mit dem Ziel optimaler Betriebsführung werden eingesetzt:

1. **Messen** und gegebenenfalls **Fernmessen** und **Fernübertragen** der Messwerte.
2. **Steuern** des Verfahrensablaufes durch wiederholte Schalt- oder Stellimpulse.
3. **Regeln** unter ständigem Zusammenspiel von Messen, Verstellen und Nachstellen zur Einhaltung eines vorgegebenen Sollzustands.

Die **Automatisierung** verfahrenstechnischer An-

lagen wird einerseits bestimmt durch die Möglichkeiten und Grenzen der **Mess- und Regelungstechnik** und andererseits durch die Kenntnis der quantitativen Zusammenhänge zwischen **Betriebsbedingungen** und **Qualität des Endprodukts**.

Messen ist ein Vorgang, bei dem der Wert einer physikalischen Größe – Messgröße genannt – erfasst und als Vielfaches seiner Einheit ermittelt wird.

Wichtige Messgrößen in der Verfahrenstechnik sind: Höhenstand (Füllstand), Druck, Viskosität,

Menge (Masse), Durchfluss (Massen- oder Volumenstrom), Dichte, Teilchengröße, Konzentration, pH-Wert, Feuchtigkeit, Leitfähigkeit, Temperatur, Wärmestrom.

Die Messgröße wird als **Messwert** von einem **Messgerät** angezeigt, registriert oder übertragen und für Steuerungs- und Regelungsaufgaben weiterverarbeitet. Maßgebend für die Eignung eines Messgeräts ist u.a. seine Empfindlichkeit.

Die **Empfindlichkeit** E eines Messgeräts ist das Verhältnis zwischen der beobachteten Änderung der Anzeige Δa zu der sie verursachenden Änderung der Messgröße ΔM .
 $E = \Delta a / \Delta M$.

Man unterscheidet analoge und digitale Messverfahren. Ein Messverfahren ist **analog**, wenn die Messgröße stetig dargestellt wird, z.B. bei der Temperaturmessung durch ein Flüssigkeitsthermometer. Ein Messverfahren arbeitet **digital**, wenn die Messgröße durch feste, kleinste Schritte zahlenmäßig angezeigt wird. Der Messwert erscheint hier als Summe von Quantisierungseinheiten oder Impulsen (z.B. bei der Drehzahlmessung durch Zählung von Lichtimpulsen während einer festen Zeitspanne).

Vorteile digitaler Messverfahren:

1. Hohe Genauigkeit und Auflösung.
2. Messwerte lassen sich ausdrucken und ohne Umwandlung digital weiterverarbeiten (Prozessrechner).
3. Bequeme Ablesung der Messwerte.

Messwerte sind einerseits **Eingangssignale** für Steuerungs- und Regelungseinrichtungen. Andererseits bilden sie Unterlagen für die **Betriebsabrechnung**, Prozessanalyse und **Prozessoptimierung**. Messwerte müssen daher erfasst und verarbeitet werden.

Die **Messwerterfassung** erfolgt durch schreibende und zählende Geräte oder durch automatische Abfrage der Messsignale mit Hilfe elektronischer Einrichtungen. Zur Vorbereitung für die Messwertverarbeitung werden die Messwerte über einen Erfassungszeitraum integriert, z.B. zu Energiemengen, Produktmengen, Rohstoffmengen. Hieraus werden Energiebilanzen, Mengenbilanzen, Ausbeuten und Wirkungsgrade – meist mit Hilfe elektronischer Datenverarbeitung (EDV) – aufgestellt.

Die **Ausbeute** ist das Verhältnis der erzeugten Endproduktmenge zur verarbeiteten Ausgangsstoffmenge. Der **Wirkungsgrad** ist das Verhältnis der genutzten oder gewonnenen Energie zur zugeführten Energie.

Ausbeute und Wirkungsgrad sind stets niedriger als 100%. Beide Größen sind wichtige Hilfsmittel für die Beurteilung der Prozessführung. Alle für die Prozessführung erforderlichen Mess- und Steuereinrichtungen werden zentral in **Messwarten** (Leitständen) zusammengefasst. Häufig ist das Fließbild der Anlage an den Wandflächen der Messwarte über den Instrumenten dargestellt.

Zur **Fernübertragung** der Messwerte vom Messort (Messfühler) zum Anzeige-, Registrier- oder Zählgerät müssen die Messgrößen in elektrische (seltener in pneumatische) Größen umgeformt werden. Eine **elektrische Fernmesseinrichtung** besteht im allgemeinen Fall aus 5 Bausteinen:

1. Messwertgeber,
2. Umsetzer, Transmitter bzw. Modulator,
3. Übertragungskanal,
4. Umsetzer bzw. Demodulator,
5. Anzeige oder Registriereinrichtung.

Neuzeitliche **Messwert-Übertragungsverfahren** sind das **Impulsfrequenz-Verfahren** und das **Puls-Code-Verfahren** für Vielfach-Fernmessung. Der Vorteil des Puls-Code-Verfahrens liegt darin, dass man viele Messwerte über große Entfernungen mit großer Genauigkeit über alle für die Telegrafie geeigneten Kanäle übertragen kann.

Steuern und Regeln sind Eingriffe in den Energie- oder Massenfluss eines ablaufenden Arbeitsvorgangs. Zwischen Steuern und Regeln bestehen grundsätzliche Unterschiede.

Steuern heißt, den Ablauf eines Prozesses schrittweise durch eine Folge von Änderungsvorgängen (Steuervorgänge) beeinflussen. Bei jedem **Steuervorgang** wird die Änderung der gesteuerten Größe durch einen Impuls eingeleitet und durch einen Impuls beendet. Die einzelnen Änderungsvorgänge wiederholen sich unter gleichen Bedingungen unverändert und in gleicher Weise. Ein einmal eingeleiteter Steuervorgang lässt sich weder vorzeitig widerrufen noch korrigieren.

Beispiel: Ein Ölbrenner wird während eines thermischen Prozesses immer dann eingeschaltet, wenn die Temperatur der Heizflüssigkeit auf einen bestimmten, vorgegebenen Wert abgesunken ist. Er wird immer dann abgeschaltet, wenn die Flüssigkeitstemperatur einen vorgegebenen Wert erreicht hat. Während der Temperaturänderung läuft der Brenner mit unveränderter Einstellung durch. Die momentane Flüssigkeitstemperatur beeinflusst nicht die Brennereinstellung, z.B. den Öldurchsatz.

Steuerbar ist jeder schaltbare Wirkungsablauf. Kennzeichen eines Steuerablaufs ist die offene **Wirkungskette**. Die Messung hat bei einer Steuerung nur informative Aufgaben.

Regeln heißt, den Ablauf eines Prozesses dauernd und kontinuierlich durch stetig überwachendes Messen, Vergleichen und Verstellen mit dem Ziel beeinflussen, einen vorgegebenen **Sollzustand** einzuhalten.

Die **Regelung** ist im Gegensatz zur Steuerung ein Dauervorgang, bei dem die zu regelnde Größe – die **Regelgröße** – fortlaufend vom Messfühler erfasst und vom Regler mit einer anderen Größe – der **Führungsgröße** – verglichen wird. Das Ergebnis dieses Soll-Ist-Vergleichs – die **Regeldifferenz** – erzeugt eine **Stellgröße**, welche die Regeldifferenz mit Hilfe eines Stellglieds zu berichtigen versucht.

Beispiel: Die Temperatur in einem dampfbeheizten Rührkessel wird durch eine Regelung auf vorgegebenem Sollwert gehalten. Dazu wird die Rührkesseltemperatur von einem Messfühler laufend erfasst und mit dem vorgegebenen Wert verglichen. Je nach dem Ergebnis dieses Vergleichs verstellt der Regler das Heizdampfventil im Sinne einer Wärmestromerhöhung oder einer Wärmestromdrosselung. Die sich neu einstellen- de Rührkesseltemperatur (Regelgröße) wirkt zurück auf die Ventileinstellung (Stellgröße).

Regelbar ist jeder messbare Wirkungsablauf. Kennzeichen einer Regelung ist der **geschlossene Regelkreis**. Der Regelbefehl wandert ständig in einer Richtung vom Messort über Regler und Stellort in die Regelstrecke zurück.

Steuerungen und Regelungen können geräte- technisch weitgehend übereinstimmen. Kennzeichnend für die Regeleinrichtung ist der Regler. Zunehmend werden **elektronische Regler** eingesetzt, die aus integrierten Halbleiterschaltungen (ICs) bestehen.

Der **Regler** fasst mehrere Bauglieder einer **Regleinrichtung** zusammen, mindestens jedoch den Vergleichler und ein weiteres wesentliches Glied, z.B. den Verstärker.

Man unterscheidet zwischen unstetigen und stetigen Reglern. Bei **unstetigen Reglern** kann die Stellgröße nur zwei oder mehrere verschiedene Werte annehmen (Zweipunktregler). **Stetige Regler** betätigen das Stellglied kontinuierlich in Abhängigkeit von der Regelabweichung. Stetige Regler werden hinsichtlich ihres **Zeitverhaltens** unterteilt in:

P-Regler = proportional wirkende Regler

I-Regler = integral wirkende Regler

PI-Regler = proportional-integral wirkende Regler

PD-Regler = proportional wirkende Regler mit Vorhalt

PID-Regler = proportional-integral wirkende Regler mit Vorhalt

Die wichtigsten **Regelungsaufgaben der Verfahrenstechnik** sind: Temperaturregelung mit P- oder (für hohe Ansprüche) PI-Reglern; **Druckregelung** mit I-Reglern und PI-Reglern; **Durchflussregelung** mit I-Reglern und (bei großer Totzeit) PID-Reglern; **Niveauregelung** mit P- und (für höhere Ansprüche) PI-Reglern; **Folgeregelung** mit I-, PI- und PID-Reglern.

In großen Produktionsanlagen werden heute alle wichtigen Zustandsgrößen gemessen, geregelt und registriert. Großanlagen der Chemie können bis zu 1000 Regelkreise enthalten. Angestrebt wird die Automatisierung des Produktionsablaufs, die Prozessautomatisierung, bei der digitale Rechner, Computer, eine wichtige Rolle spielen. Häufig werden Prozessoptimierung, Sollwertausgabe für die Regler, Datenerfassung und Datenspeicherung sowie die Bilanzierung des Prozessablaufs von einem zentralen Rechner übernommen, dem **Prozessrechner**.

Nach den Fortschritten in der **Mikroelektronik** vollzieht sich ein Übergang vom zentralen Prozessrechner zu dezentralen, digitalen **Prozessleit-systemen** (PLS) mit speicherprogrammierten Funktionsbausteinen und Mikroprozessoren als Zentraleinheiten, die aufgrund ihrer freien Programmierbarkeit rasch Prozessänderungen angepasst werden können (siehe Kapitel 14).

1.7 Energieerzeugung und Energieversorgung

Die chemische Industrie ist neben der Eisen- und Stahlindustrie der größte Energieverbraucher der Wirtschaft. Die dort ablaufenden Stoffumwandlungen erfordern Wärmeenergie, elektrische Energie und mechanische Energie.

Wärmeenergie wird in erheblichem Umfang als sog. **Prozesswärme** für thermische Verfahren und chemische Reaktionen benötigt. **Elektrische Energie** wird direkt für elektrische Trennverfahren und elektrochemische Verfahren, z.B. zur Elektroentstaubung und für Elektrolysen, eingesetzt und indirekt zur Erzeugung von Heizenergie und mechanischer Energie. Die **mechanische Energie** benötigt man für mechanische Trennverfahren, zur Stoffförderung sowie zur Überdruck- und Vakuumherzeugung.

Energieerzeugung und Energieversorgung werden in der Hauptsache durch die **Energieträger** bestimmt.

Energieträger sind alle Stoffe, die direkt oder indirekt zur Energieversorgung verfahrenstechnischer Anlagen beitragen.

Energieträger sind z.B. Kohle, Koks, Heizöl, Generatorgas, Erdgas, Druckluft, elektrischer Strom, Kondensat und Kernbrennstoff.

Ausschlaggebend für die **Auswahl des Energieträgers** sind im Wesentlichen drei Kriterien:

1. **Sicherheit** und **Einfachheit** in der Handhabung und Verarbeitung.
2. **Verfügbarkeit** hinsichtlich Menge und politischer Einflüsse.
3. **Preiswürdigkeit** in Bezug auf Gesteuerung und Verwendung.

Wichtigster Energieträger in der chemischen Industrie ist **Hochdruckdampf**, der zunächst zum Antrieb sowohl von Turbogeneratoren als auch von Turbokompressoren und Turbopumpen eingesetzt wird. Er wird in **Industrie-Dampfkraftwerken** und künftig auch in **Industrie-Kernkraftwerken** erzeugt. Der zur Erzeugung der Prozesswärme benötigte Dampf wird vorwiegend **Gegendruck-Dampfturbinen** nach erfolgter Kraft-erzeugung entnommen.

Diese Kupplung von Kraft- und Wärmeerzeugung

erhöht die **Wirtschaftlichkeit** der Energieerzeugung. Man erreicht dadurch **thermische Wirkungsgrade** von 80% und mehr. Übliche **Dampfzustände** moderner Industriekraftwerke sind 150...200 bar Druck und 500...550 °C Heißdampftemperatur. Der Gegendruck (Abdampfdruck) liegt meist bei 3...6 bar. Mitteldruckdampf von 20...50 bar kann durch Turbinenanzapfung (Anzapfdampf) gewonnen werden.

Die im Dampfkraftwerk erzeugte überschüssige elektrische Energie (Elt-Energie) wird in das öffentliche Netz eingespeist. Hierzu werden zwischen Chemieindustrie und Energieversorgungsunternehmen (EVU) langfristige Verträge abgeschlossen.

Den erzeugten **Drehstrom** von rd. 3000...5000 V transformiert man auf die gewünschten Spannungen: 24...240 V (Wechselstrom) für Licht, 240...500 V (Drehstrom) für Kraft; rd. 10 V (Gleichstrom) für Elektrolyseure; 10 000...50 000 V (Gleichstrom) für Elektroabscheidung. Zur **Gleichrichtung** des Drehstroms verwendet man **Stromrichterschaltungen** aus **Thyristoren** oder Leistungs-Transistoren für hohe Stromstärken und niedrige Spannungen (Elektrolysen), **Selen-Gleichrichter** für niedrige Stromstärken und hohe Spannungen (Elektroabscheidung).

Zum Bereich der Energieversorgung gehören auch die Lieferung verdichteter Gase, z.B. von Synthesegas; die Erzeugung von Vakuum, die Produktion von Kälte-trägern, z.B. von Kühlsole und Eis, die Herstellung von Druckluft, die Lieferung von Trink-, Brauch- und Speisewasser und schließlich noch die Reinigung und Entgiftung von Abwässern.

Die **Behandlung industrieller Abwässer** hat im Rahmen des Umweltschutzes eine besondere Bedeutung gewonnen. Hierzu gibt es vier Möglichkeiten, die meist miteinander kombiniert werden:

1. **Mechanische Behandlung**, z.B. durch Sedi-mentieren, Filtrieren und Flotieren.
2. **Chemische Behandlung**, z.B. durch Fällung, Neutralisation, Adsorption und Extraktion.
3. **Biologische Behandlung**, z.B. in Tropfkörper- und Belebungsanlagen.
4. **Vernichtung**, z.B. Versenken oder Verbrennen.

2 Mechanische Verfahren zur Oberflächenvergrößerung

Chemische Reaktionen in heterogener Phase, z.B. zwischen Feststoff und Flüssigkeit, Feststoff und Gas, Flüssigkeit und Gas oder Dampf, verlaufen umso rascher und intensiver, je größer die Oberfläche der miteinander reagierenden Stoffe ist.

Die **Reaktionsgeschwindigkeit** ist proportional der Oberfläche. Infolgedessen ist die **Oberflä-**

chenvergrößerung ein unerlässlicher Verfahrensschritt bei der Rohstoffaufbereitung zur Reaktion.

Je nachdem, ob die Oberflächenvergrößerung an Feststoffen oder Flüssigkeiten vorgenommen wird, spricht man von Zerkleinerung oder Flüssigkeitszerteilung.

2.1 Zerkleinern von Feststoffen

Zerkleinerung bedeutet Zerteilung eines Feststoffgefüges unter der Einwirkung mechanischer Kräfte.

Zweck der Zerkleinerung:

1. Vorbereitung der Rohstoffe auf Trennverfahren.
2. Vorbereitung der Rohstoffe auf chemische Reaktionsverfahren.
3. Herstellung einer für die Endproduktqualität erforderlichen Teilchengröße.

6% der weltweit erzeugten Elektroenergie, das sind ca. 600 Mrd. kWh, werden für die Zerkleinerung von Feststoffen verbraucht.

Zerkleinerungsverfahren

Hinsichtlich der Härte des Zerkleinerungsguts unterteilt man in Hart-, Mittelhart- und Weichzerkleinerung. In Bezug auf den Zerkleinerungsgrad unterscheidet man zwischen Brechen, Schrotten und Mahlen. Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht über die **Zerkleinerungsverfahren** und der für diese Verfahren typischen **Zerkleinerungsmaschinen**.

Die Unterscheidungskriterien «Härte» und «Zerkleinerungsgrad» werden folgendermaßen definiert:

Als **Härte** bezeichnet man den Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines anderen Körpers entgegensetzt.

Der **Zerkleinerungsgrad** ist das Verhältnis einer charakteristischen Feststoffgröße vor und nach dem Zerkleinerungsvorgang. Vorwiegend bezieht man den Zerkleinerungsgrad auf statistische

Werte aus der Korngrößenverteilung, z.B. auf die mittlere Korngröße oder auf die spezifische Oberfläche O_V (siehe Abschnitt 4.3). In erster Näherung ist der Zerkleinerungsgrad n gegeben durch:

$$n = \frac{x}{x'}$$

Hierin ist: x Aufgabekorngröße, x' Endkorngröße

Der Zerkleinerungsgrad ist ein Maß für die Feinheit der Zerkleinerung (Tabelle 2.1). Je feiner die Zerkleinerung, desto größer ist der Zerkleinerungsgrad.

Die Zunahme der Oberfläche mit wachsendem Zerkleinerungsgrad n zeigt die Zerkleinerung eines Würfels mit $x = 1$ cm Kantenlänge in kleinere Würfel mit der Kantenlänge x' :

x in cm	n	Würfelzahl	Oberfläche in cm ²
1 cm	1	1	6
0,1 cm	10	1000	60
0,01 cm	100	1 000 000	600

Tabelle 2.1 Zerkleinerungsverfahren, Zerkleinerungsmaschinen

Verfahren Korngröße Kornart Zerkleinerungsgrad n	Zerkleinerungsmaschinen für Hartzerkleinerung (Mohs-Härte 10...5) z.B. von Granit, Erz, Quarz	Mittelhart- und Weich-Zerkleinerung (Mohs-Härte < 5) z.B. von Kohle, Kalk, Torf
Grobbrechen >50 mm Brocken $n = 3 \cdots 6$	Backenbrecher Rundbrecher	Hammerbrecher Schneckenbrecher
Feinbrechen 5...50 mm Schotter, Split $n = 4 \cdots 10$	Rundbrecher Prallbrecher Walzenbrecher	Walzenbrecher Daumenbrecher Zackenbrecher
Schroten 0,5...5 mm Grieß $n = 5 \cdots 10$	Prallbrecher Walzenbrecher Rollenwälmühle	Kollergang Schlägermühle Prallmühle
Feinmahlen 50...500 μm Mehl $n = 10 \cdots 50$	Rollenwälmühle Hammermühle Prallmühle	Walzenmühle (nass) Zahnscheibenmühle (nass) Rotor-Stator-Systeme
Feinstmahlen 5...50 μm Puder $n > 50$	Rohrmühle Kugelmühle Strahlmühle Schwingmühle	Sichtermühle Schwingmühle Einscheiben-Stiftmühle Prallscheibenmühle
Kolloidmahlen < 5 μm kolloidale Feinheit $n > 50$	Fließbett-Gegenstrahlmühle Kugelmühle Schwingmühle Strahlmühle	Rührwerksmühle Zweischeiben-Stiftmühle Kolloidmühle (nass) Kugelmühle (nass)

2.1.1 Bruchvorgang

Die **Stoffbausteine der Festkörper** sind Ionen oder Moleküle, deren Anziehungskräfte den Stoffzusammenhalt bewirken. Dieser Zusammenhalt muss beim Zerkleinern durch eine von außen aufgebrauchte mechanische Beanspruchung überwunden werden.

In der Hauptsache werden folgende **Beanspruchungsarten** zum Bruch eines Festkörpers eingesetzt:

1. **Schlag** der Arbeitsfläche gegen das Korn.
2. **Druck** auf das Korn zwischen zwei Arbeitsflächen.
3. **Scherung** (Schub oder Reibung) zwischen zwei Arbeitsflächen.

4. **Prall** des Korns gegen Arbeitsflächen oder Nachbarkörner.
5. **Schnitt** mit schneidenförmigen Arbeitsflächen.
6. Beanspruchung durch **Scherströmung** oder **Druckwellen** vorwiegend zum Zerteilen von Flocken und anderen Agglomeraten.

In Tabelle 2.2 ist die Zuordnung von Stoffeigenschaften und Beanspruchungsart dargestellt.

Der Bruch des Festkörpers erfolgt, sobald durch die Beanspruchung die Bindungskräfte der Stoffbausteine soweit überwunden sind, dass ein **Spalt** entsteht. Nach *Griffith* muss dieser Spalt eine bestimmte **Mindestlänge** in der Größenordnung von etwa 1 μm aufweisen, wenn sich der Bruch

Tabelle 2.2 Stoffeigenschaft und Beanspruchungsart

Stoffeigenschaft	Schlag	Druck	Scherung	Prall	Schnitt
hart	++	++	–	–	–
spröde	++	++	–	++	–
mittelhart	++	++	+	++	–
weich	+	+	++	++	++
elastisch	–	–	–	+	++
zäh	–	–	–	++	++
faserig	+	–	+	+	++
wärmeempfindlich	–	–	–	++	+

+ + gut anwendbar, + bedingt anwendbar, – nicht anwendbar

durch den Festkörper fortpflanzen soll. Die Spaltweite muss dabei die Wirkreichweite der Anziehungskräfte von 10^{-4} bis 10^{-3} μm erreichen.

Der Bruch pflanzt sich mit Schallgeschwindigkeit im Festkörper fort. Der **Bruchflächenverlauf** bei einem einzelnen Korn ist nach Bild 2.1 folgender: Von der bei Druck- oder Prallbeanspruchung entstehenden Abplattung ausgehend, entsteht ein kegelförmiger Riss. Innerhalb des Kegels bildet sich Feingut. Außerhalb des **Feingutkegels** zerfällt der Körper in größere Splitter. Bei der Prallbeanspruchung entsteht nur **ein** Feingutkegel, dessen Größe mit zunehmender Aufprallgeschwindigkeit v wächst.

Die Stoffbausteine an der Oberfläche eines Festkörpers oder einer Flüssigkeit haben einen bestimmten Überschuss an potentieller Energie, weil sie nicht allseitig von Nachbarpartikeln umgeben sind. Man nennt diesen Energieüberschuss **freie Grenzflächenenergie**. Bei der Oberflächenvergrößerung muss Arbeit aufgewendet werden, um freie Grenzflächenenergie zu schaffen.

Die spezifische, freie Grenzflächenenergie wird auf die Flächeneinheit bezogen. Man nennt sie bei Flüssigkeiten oft auch **Oberflächenspannung**. Die Definitionsgleichung lautet:

$$\sigma_o = \frac{W_o}{A}$$

Hierin ist: σ_o spezifische, freie Oberflächenenergie in Nm/m^2 bzw. J/m^2 oder N/m , W_o freie Oberflächenenergie in Nm , A Oberfläche in m^2 .

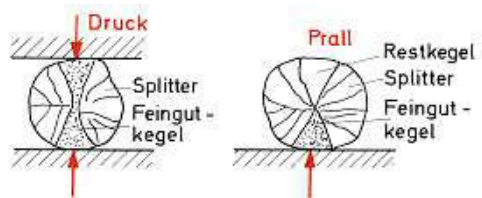


Bild 2.1 Bruchflächenverlauf bei der Zerkleinerung eines sprödharten Festkörpers

Die spezifische, freie Oberflächenenergie ist die zur Vergrößerung einer Oberfläche erforderliche Arbeit, dividiert durch die zusätzlich entstandene Oberfläche; sie ist eine von der Oberflächengröße unabhängige Stoffkonstante.

Die Größenordnung der spezifischen Oberflächenenergie liegt bei Festkörpern zwischen $0,1$ und 1 Nm/m^2 . Die spezifische Oberflächenenergie der Atomkerne beträgt 10^{17} Nm/m^2 !

Die theoretische **molekulare Zerreißspannung** zum Zerteilen eines spröden Festkörpers ist nach *Smekal* gegeben durch:

$$\sigma_{\text{zth}} = \sqrt{\frac{E \cdot \sigma_0}{r_0}}$$

Hierin ist: σ_{zth} molekulare Zerreißspannung in N/cm², E Elastizitätsmodul in N/cm², σ_0 spezifische freie Oberflächenenergie in N/cm, r_0 molekulare Wirkreichweite in cm.

Diese Gleichung ergibt für spröde Festkörper eine theoretische Zerreißspannung, die mit $\sigma_{\text{zth}} = 10^5 \dots 10^6$ N/cm² und 2 Zehnerpotenzen höher liegt als die tatsächliche **Bruchfestigkeit**. Die Ursache für die wesentlich niedrigere Festigkeit sind Kerbstellen.

Kerbstellen können Risse, Hohlräume, Fremdstoffeinschlsse und Versetzungen an den Korngrenzen sein,

Kerbstellen stehen unter **Eigenspannungen** (innere Spannungen), denen sich die äußeren Spannungen überlagern. Die Eigenspannungen erhöhen sich durch den Quelldruck eindringender Flüssigkeiten. Der Bruch geht von der wirksamsten Kerbstelle aus, wenn im Kerbgrund die resultierende Spannung die molekulare Zerreißspannung überschreitet. Hierauf beruht der geringere Arbeitsbedarf bei der **Nassmahlung**, insbesondere wenn Detergentien als Mahlhilfen eingesetzt werden.

Die Feinheit der Zerkleinerung wird durch die **Kerbstellendichte** begrenzt. Die Wirksamkeit der Kerbstellen nimmt mit zunehmendem Zerkleinerungsgrad ab. Folge: Anstieg der Zerkleinerungsarbeit mit wachsendem Zerkleinerungsgrad.

2.1.2 Zerkleinerungsarbeit

Die Nutzarbeit der Zerkleinerung W_0 ist gleich der freien Grenzflächenenergie der zusätzlich geschaffenen Oberfläche ΔA

$$W_0 = \sigma_0 \cdot \Delta A$$

Zur Schaffung der zusätzlichen Oberfläche wird die technische Zerkleinerungsarbeit aufgewendet:

$$W_z = W_0 + W_F + W_R + W_M$$

Hierin ist: W_z technische Zerkleinerungsarbeit, W_0 freie Oberflächenenergie, W_F Formänderungsarbeit, W_M Verlustarbeit der Maschine. Alle Groen mit der Einheit J bzw. kWh (1 J = 1 Nm = 1 Ws).

Der Wirkungsgrad η der Zerkleinerung ist das Verhältnis von Nutzarbeit zu technischer Zerkleinerungsarbeit:

$$\eta = \frac{W_0}{W_z} \cdot 100\% \approx 0,1\% \dots 1\%$$

Der Wirkungsgrad der Zerkleinerung ist äußerst niedrig, da insbesondere die Verluste durch Reibung und Verformung des Zerkleinerungsgutes die Nutzarbeit weit überwiegen. Diese Verluste steigen mit der Kornfeinheit stark an.

Der Arbeitsaufwand zur Zerkleinerung ist vom Zerkleinerungsgrad und von der Härte des Feststoffs abhängig.

Die technische Zerkleinerungsarbeit und die erforderliche Antriebsleistung der Zerkleinerungsmaschine lassen sich näherungsweise mit dem von *Bond* und *Wang* aufgestellten **empirischen Zerkleinerungsgesetz** ermitteln. Es lautet:

$$W_z = C \cdot m \left(\frac{\sqrt{n}}{x'} \right)^{0,5}; \quad \frac{W_z}{m} = C \cdot \left(\frac{\sqrt{n}}{x'} \right)^{0,5}$$

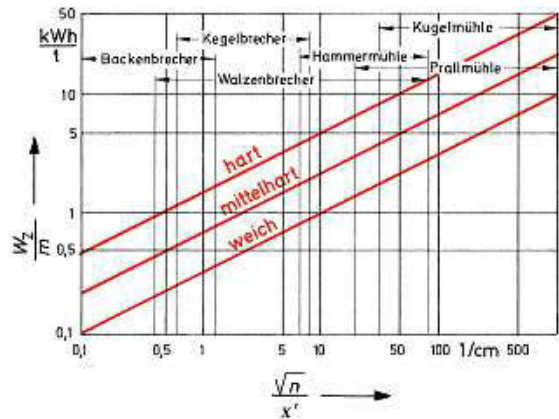
Hierin ist: W_z technische Zerkleinerungsarbeit, C eine von der Art des Feststoffs und der Zerkleinerungsmaschine abhängige Konstante, m Menge des zerkleinerten Feststoffs, n Zerkleinerungsgrad, x' Korngroe nach der Zerkleinerung, W_z/m spezifische Zerkleinerungsarbeit.

Das Zerkleinerungsgesetz von *Bond* und *Wang* ist als Diagramm in Bild 2.2 dargestellt. Hierin ist die spezifische Zerkleinerungsarbeit W_z/m in kWh/t über der Groe \sqrt{n}/x' in 1/cm aufgetragen.

Beispiel 2.1

Ein Kegelbrecher, auch Kegelgranulator genannt, zerkleinert hartes Gestein von $x = 300$ mm Aufgabe-Korngroe auf $x' = 40$ mm Endkorngroe. Der Durchsatz beträgt $\dot{m} = 200$ t/h. Wie groß ist die Antriebsleistung P in kW?

Bild 2.2 Diagramm zur Ermittlung der spezifischen technischen Zerkleinerungsarbeit



Lösung

Zur Lösung wird das Diagramm Bild 2.2 herangezogen. Der Zerkleinerungsgrad ist

$$n = \frac{x}{x'} = \frac{300 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} = 7,5;$$

$$\frac{\sqrt{n}}{x'} = \frac{\sqrt{7,5}}{4 \text{ cm}} = 0,686 \approx 0,7$$

Für hartes Gut liest man auf der Ordinate einen spezifischen Arbeitsbedarf ab von

$$\frac{W_z}{m} = 1,2 \text{ kWh/t}$$

Die Antriebsleistung ergibt sich dann einfach aus der Beziehung:

$$P = \frac{W_z}{m} \dot{m} = 1,2 \text{ kWh/t} \cdot 200 \text{ t/h} = 240 \text{ kW}$$

Dieser Wert stimmt mit den Angaben von Herstellerfirmen recht gut überein.

Der Arbeitsbedarf zur technischen Zerkleinerung dient zu 99% der Deckung von Verlusten, die durch Verformung und Reibung entstehen. Diese Verluste steigen mit zunehmendem Feinkornanteil stark an. Daraus folgt

Es ist unbedingt erforderlich, das Feinkorn nach Erreichen der gewünschten Korngröße vom Zerkleinerungsgut abzuziehen.

Zur **Feingutabscheidung** verwendet man **Klassierapparate**, und zwar Siebe und Windsichter bei der Trockenmahlung, Stromklassierer und Hydrozyklone bei der Nassmahlung. Ein beson-

ders niedriger Arbeitsbedarf ergibt sich bei stufenweiser Zerkleinerung durch Hintereinanderschaltung von Grob-, Fein- und Feinstzerkleinerungsmaschinen nebst Klassierapparaten.

Weich-zähe und elastische Güter, die außerdem noch wärmeempfindlich sind, z.B. Kunststoffe, zerkleinert man durch **Kaltmahlverfahren**. Kaltmahlverfahren werden neuerdings auch in der Lebensmitteltechnik angewendet. Kaltmahlverfahren reduzieren die Erwärmung und Verhindern das Verdampfen von Aromastoffen z.B. bei Kaffee oder Gewürzen.

Bei den Kaltmahlverfahren wird das Gut in flüssigem Stickstoff ($-196 \text{ }^\circ\text{C}$) rasch abgekühlt. Bei dieser Temperatur verspröden alle weich-zähen und elastischen Güter. Anschließend wird das spröde-hart gewordene Gut in Prall- oder Schwingmühlen zerkleinert. Die Mühlenluft ist durch verdampfenden Stickstoff tiefgeköhlt. Durch kontinuierliche Zugabe von Flüssigstickstoff kann die gesamte Anlage unter einer inerten Stickstoffatmosphäre betrieben werden. Oxidationen, Explosionen und Brände werden dadurch ausgeschlossen.

2.1.3 Zerkleinerungsmaschinen

Die Vielzahl der **Zerkleinerungsmaschinen** lässt sich nach verschiedenen Gesichtspunkten ordnen, und zwar

1. nach dem Beanspruchungsmechanismus,
2. nach der Endfeinheit des Gutes,
3. nach der Härte des Gutes,
4. nach Art der Energieeinleitung.