

P. Dietz (Hrsg.)

Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen

**bei besonderen mechanischen, thermischen
oder chemischen Belastungen**



Springer

Inhaltsverzeichnis

Autorenverzeichnis	! T.	XVII
------------------------------	--------------	------

Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen - eine Einführung in die Arbeitsgebiete des Sonderforschungsbereichs	1
<i>P. Dietz</i>	

1 Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen	9
---	----------

1.1 Konstruktionssystematik für die integrierte Prozess- und Maschinenentwicklung in der Verfahrenstechnik	10
<i>P. Dietz</i>	

— • 1.1.1 Entwicklungsprozesse in Maschinenbau und Verfahrenstechnik	> 10
1.1.2 Vorgehensweise zum Entwickeln verfahrenstechnischer Maschinen	11
1.1.2.1 Planungsphase	14
1.1.2.2 Konzeptionsphase	16
1.1.2.3 Entwurfsphase	18
1.1.2.4 Ausarbeitungsphase ∴	20
1.1.3 Anwendung der Methodik bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen	20
1.1.3.1 Beispiel 1: Entwicklung eines Hochgeschwindigkeits-Windsichters	20
1.1.3.2 Beispiel 2: Entwicklung eines Reaktions- verdichters für das Recycling von Kunststoffen	24
1.1.3.3 Beispiel 3: Entwicklung einer Reaktionsmühle	26
1.1.4 Zusammenfassung	TT. 27

1.2 Behandlung von Anforderungen in der Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, Maschinen und Anlagen	29
<i>P. Dietz, P.J. Kruse</i>	

1.2.1 Die Bedeutung von Anforderungen in technischen Aufgabenstellungen	• 29
1.2.2 Bewertung der gegenwärtigen Anforderungsbehandlung	33
1.2.3 Aufbau einer Anforderungsstruktur	35
1.2.4 Die Erfassung von Anforderungen	39

1.2.4.1	Anforderungen durch den Auftraggeber	39
1.2.4.2	Anforderungen des eigenen Unternehmens	41
1.2.4.3	Anforderungen der Umgebung	42
1.2.4.4	Allgemeine Ansprüche an die Erfassung von Anforderungen	42
1.2.5	Die Aufbereitung von Anforderungen	44
1.2.6	Die Bereitstellung von Anforderungen	45
1.2.7	Zusammenfassung	47
1.3	Sicherheitstechnik in der Verfahrenstechnik	48
	<i>P. Dietz, N. Beisheim, S. Bönig . . .</i>	
1.3.1	Einleitung	48
1.3.2	Notwendigkeit der Fehler- und Störfallprävention in der Verfahrenstechnik	48
1.3.3	Sicherheitsanalytische Methoden in der Verfahrens- technik	50
1.3.3.1	Checklistenanalysen	51
1.3.3.2	HAZOP-Studie (PAAG-Verfahren)	52
1.3.3.3	Matrixdarstellung der Wechselwirkungen	53
1.3.3.4	Ausfalleffektanalyse (FMEA)	54
1.3.3.5	Ereignisablaufanalyse	55
1.3.3.6	Fehlerbaumanalyse	56
1.3.3.7	Entscheidungstabellentechnik	56
1.3.3.8	KOMB-Analyse	57
1.3.4	Einsatz der vorgestellten Sicherheitsanalysen in der Maschinen- und Anlagenentwicklung	60
1.3.4.1	Bewertung der Sicherheitsanalysen	60
1.3.4.2	Entwicklungsbegleitende Sicherheitskonzepte	62
1.3.4.3	Erkenntnisse aus der Untersuchung der sicherheitsanalytischen Methoden	64
1.3.5	Die wissensbasierte Sicherheitsanalyse (WISf)	64
1.3.5.1	Funktions-Anforderungs-Struktur	65
1.3.5.2	Zuordnung der Verfahren, Anlagen und Komponenten	68
1.3.5.3	Kontrolle und präventive Ermittlung von Störungen	69
1.3.5.4	Gewichten von Störungen, Ursachen und Auswirkungen	70
1.3.5.5	Durchführung präventiver Sicherheitsanalysen	71
1.3.5.6	Maßnahmen gegen Ursachen und Auswirkungen von Störungen	72
1.3.6	Verbesserung der Analysegenauigkeit der Sicherheitsanalyse durch Einsatz von Methoden künstlicher Intelligenz	73
1.3.7	Zusammenfassung	75

Belastungen, Dynamik, Akustik	79
2.1 Besonderheiten in Belastung und Beanspruchung verfahrenstechnischer Maschinen	79
<i>P. Dietz</i>	
2.2 Beanspruchung von Komponenten verfahrenstechnischer Maschinen und Möglichkeiten der Beeinflussung	83
<i>H.-P. Beck, H. Zenner, C. Sourkounis, F. Peter</i>	
2.2.1 Einleitung	83
2.2.2 Untersuchte verfahrenstechnische Maschinen	84
2.2.2.1 <i>Allgemeines</i>	84
2.2.2.2 <i>Gutbett-Walzenmühlen</i>	85
2.2.2.3 <i>Shredder</i>	86
2.2.3 Betriebsmessungen und Analyse der Beanspruchungen ..	87
2.2.3.1 <i>Allgemeines</i>	87
2.2.3.2 <i>Beanspruchungen im Antriebsstrang der Gutbett-Walzenmühle</i>	88
2.2.3.3 <i>Beanspruchungen im Antriebsstrang des Shredders</i>	91
2.2.4 Antriebs- und regelungstechnische Maßnahmen zur Lastkollektivminimierung und Energieeinsparung ..	99
2.2.4.1 <i>Elektrisch-mechanisches Antriebssystem / Stand der Technik</i>	99
2.2.4.2 <i>Drehzahlelastische Antriebe zur Lastkollektivminimierung</i>	112
2.2.4.3 <i>Ergebnisse</i>	117
2.2.5 Lastannahmen für Komponenten	120
2.2.6 Danksagung	121
2.3 Konstruktive Gestaltung von Hochgeschwindigkeitsrotoren, Ein- sätzen und Verbindungen in verfahrenstechnischen Maschinen ..	124
<i>P. Dietz</i>	
2.3.1 Einleitung	124
2.3.2 Gestaltung eines Hochgeschwindigkeits-Windsichters ..	124
2.3.2.1 <i>Aufgabenstellung und Stand der Technik, Konzeptfindung</i>	124
2.3.2.2 <i>Aufbau eines Abweiseradsichterrotors</i>	125
2.3.2.3 <i>Grundlagen zur Berechnung und Gestaltung der Sichtelemente nach Abb. 6</i>	131
2.3.2.4 <i>Dynamische Analyse</i>	149
2.3.2.5 <i>Anmerkungen zum Verschleiß in Faserverbundwerkstoffen</i>	150
2.3.3 Gestaltung von Rotoren für Prallmühlen	151
2.3.3.1 <i>Aufgabenstellung und Stand der Technik</i>	151

Inhaltsverzeichnis

2.3.3.2	<i>Festigkeitsbetrachtungen zum Istzustand von Feinprallmühlen</i>	153
2.3.3.3	<i>Mahlrotoren für hohe Umfangsgeschwindigkeiten</i>	156
2.3.4	<i>Zusammenfassung</i>	167
2.4	<i>Aspekte zur dynamischen Auslegung und Optimierung von Laborzentrifugen</i>	175
	<i>D. Behr, J. Dobras, X. Feng, J. Strackeljan</i>	
2.4.1	<i>Einleitung</i>	175
2.4.2	<i>Grundlegender Aufbau von Laborzentrifugen</i>	175
2.4.3	<i>Das dynamische Verhalten des Rotorsystems</i>	177
2.4.4	<i>Evolutionärer Algorithmus zur Mehrzieloptimierung einer Zentrifugenkonstruktion</i>	184
2.4.5	<i>Zusammenfassung</i>	187
2.5	<i>Lärminderungsmaßnahmen an schnelllaufenden Prallzerkleinerungsmaschinen</i>	190
	<i>H.-J. Barth, P. Wiersch</i>	
2.5.1	<i>Aufgabe und Schallsituation von Prallmühlen</i>	190
2.5.2	<i>Schallentstehung bei Prallzerkleinerungsmaschinen</i>	191
2.5.3	<i>Schallausbreitung</i>	192
2.5.4	<i>Schallemission von Prallzerkleinerungsmaschinen</i>	193
2.5.5	<i>Lärminderungsmaßnahmen</i>	197
2.5.6	<i>Ansatzpunkte für eine lärmarme Mühlenkonstruktion</i>	199
2.5.6.1	<i>Die Lagerung</i>	199
2.5.6.2	<i>Die Mahlgutführung</i>	200
2.5.6.3	<i>Die Einbauten</i>	201
2.5.6.4	<i>Das Gehäuse</i>	202
2.5.7	<i>Abschätzung der Schallemission des Mühlengehäuses</i>	204
2.5.8	<i>Lösungsvorschläge</i>	207
2.5.9	<i>Zusammenfassung</i>	209

Verfahrenstechnische Maschinen unter vorwiegend mechanischen Beanspruchungen 211

K. Leschonski

3.1	<i>Einleitung</i>	211
3.2	<i>Die Feinsttrennung in Fliehkraft-Gegenstromsichtern bzw. Abweiseradsichtern</i>	213
3.2.1	<i>Einleitung</i>	213
3.2.2	<i>Die Trenngrenze der Fliehkraft-Gegenstromsichter</i>	214
3.2.3	<i>Der Abweiseradsichter</i>	217
3.2.4	<i>Die Dosier- und Dispergiereinheit</i>	219
3.2.5	<i>Ergebnisse</i>	219
3.2.6	<i>Zusammenfassung</i>	225

3.3	Die Feinstzerkleinerung in einer zweistufigen Rotorprallmühle .	227
3.3.1	Einleitung	227
• 3.3.2	Der Aufbau der zweistufigen Rotorprallmühle	228
3.3.3	Enge Verteilung der Prallgeschwindigkeiten	229
3.3.4	Hohe Relativ-/Prallgeschwindigkeiten und kurze Flugwege	230
3.3.5	Hohe Aufprallwahrscheinlichkeit auf den stationären und bewegten umströmten Prallelementen	234
3.3.6	Ergebnisse	235
3.3.7	Zusammenfassung	239
3.4	Untersuchungen zur Zerkleinerung von Kunststoffen in einer Schneidmühle und einem Pendelschlagwerk	240
3.4.1	Einleitung	240
3.4.2	Grundlagen des Schneidvorganges	241
3.4.3	Schneidmühlen	243
3.4.4	Pendelschlagwerk	248
3.4.5	Ergebnisse	249
3.4.6	Zusammenfassung	253

**Verfahrenstechnische Maschinen unter vorwiegend thermischen,
chemischen und abrasiven Beanspruchungen 255**

4.1	Entwicklung keramischer Ventilatoren für die Umwälzung heißer Gase bis 1350 °C	255
	<i>H.-J. Barth, R. Scholz</i>	
4.1.1	Heißgasförderung in der Verfahrenstechnik	255
4.1.2	Konstruktive Probleme bei der Entwicklung eines Heißgasventilators	256
	4.1.2.1 <i>Keramische Werkstoffe: fertigungsgerechte Gestaltung</i>	256
	4.1.2.2 <i>Modulare Lösungsansätze</i>	256
	4.1.2.3 <i>Monolithische Konstruktion für Ventilatorrad und Antrieb</i>	257
	4.1.2.4 <i>Belastung und Lebensdauer</i>	261
4.1.3	Förderverhalten (strömungstechnische Untersuchungen)	263
	4.1.3.1 <i>Versuchsanlagen</i>	266
	4.1.3.2 <i>Ergebnisse der strömungstechnischen Untersuchungen</i>	268
4.1.4	Dauerversuche (Versuche mit Paddelrädern)	275
4.1.5	Zusammenfassung	277

4.2	Reaktionsmühle	279
	<i>P. Dietz, U. Hoffmann, K. Schönert, U. Bock, U. Kunz,</i>	
4.2.1	Bedeutung und Besonderheiten von Feststoffreaktionen .	279
4.2.2	Aktivierung von Feststoffen	279
4.2.3	Entwicklungsstand und Perspektiven	281
4.2.4	Simultane Reaktion und Mahlung	282
4.2.5	Technisch interessante Modellreaktionen	282
4.2.6	Methodische Vorgehensweise	283
	4.2.6.1 <i>Synthese von Chlorsilanen.</i>	283
	4.2.6.2 <i>Erzeugung von-Grignardverbindungen.</i>	285
4.2.7	Anforderungen an Werkstoffe, Konstruktion und Betrieb	286
4.2.8	Reaktionstechnische Voruntersuchungen	286
	4.2.8.1 <i>Grignardsynthese.</i>	293
4.2.9	Entwicklung von Schwingmühlen	294
	4.2.9.1 <i>Stand der Technik, Aufgabenstellung.</i>	294
	4.2.9.2 <i>Entwicklung eines diskontinuierlichen</i> <i>Schwingmühlenprüfstandes.</i>	296
4.2.10	Untersuchungen zu den verfahrenstechnischen Eigenschaften der Schwingmühle	300
	4.2.10.1 <i>Kalorimetrische Untersuchungen zum</i> <i>Leistungseintrag bei der Mahlung.</i>	300
	4.2.10.2 <i>Bewegungsformen der Füllung.</i>	303
	4.2.10.3 <i>Modellierung der Bewegungsformen.</i>	308
	4.2.10.4 <i>Untersuchungen zur Zerkleinerung.</i>	315
4.2.11	Reaktives Mahlen	320
	4.2.11.1 <i>Hydrochlorierung von Ferrosilizium.</i>	321
	4.2.11.2 <i>Umsetzung von Magnesium</i> <i>zu Grignardverbindungen.</i>	325
4.2.12	Schlussfolgerung und Ausblick	327
4.3	Kreislaufreaktor	330
	<i>U. Hoffmann, U. Kunz, H.-J. Barth</i>	
4.3.1	Bedeutung von Kreislaufreaktoren	330
4.3.2	Entwicklungsstand	330
4.3.3	Modellreaktionen	333
4.3.4	Versuchsstand	334
4.3.5	Anforderungsliste	336
4.3.6	Konstruktionssystematische Untersuchungen	336
	4.3.6.1 <i>Funktionsstruktur.</i>	336
	4.3.6.2 <i>Lösungsfindung für die Teilsysteme „ Stoff mit</i> <i>Energie verknüpfen “, „ Gasumwälzung “,</i> <i>„Gasrückführung“ und Lösungskombinationen</i>	338
	4.3.6.3 <i>Methodische Lösungsfindung für die</i> <i>Baureihenentwicklung</i>	345
	4.3.6.4 <i>Nomogramm zur Ähnlichkeit.</i>	346
	4.3.6.5 <i>Umsetzung des Nomogramms in eine</i> <i>schematische Baureihe.</i>	347

4.3.7	Bau der Reaktoren	349
4.3.7.1	<i>Liter-Reaktor</i>	349
4.3.7.2	<i>10-Liter-Reaktor</i>	350
4.3.8	Untersuchungen zur Gasumwulzung bei Raumtemperatur.	352
4.3.9	Reaktionstechnische Bewertungen . . . 7.	354
4.3.9.1	<i>Dichtigkeitsprüfungen</i>	354
4.3.9.2	<i>Strömungsverhältnisse</i>	355
4.3.9.3	<i>Chemische Umsetzungen im 1 L-Kreislaufreaktor</i>	359
4.4	Polymermodifizierung in einer Schwingmühle.	366
	<i>A. Frendel, G. Janke, G. Schmidt-Naake</i>	
4.4.1	Einleitung	366
4.4.2	Reaktor.	366
4.4.3	Mechanochemischer Polymerabbau.	371
4.4.3.1	<i>Kontrollierter mechanischer Molmassenabbau</i>	372
4.4.3.2	<i>Abbauversuche mit Polyethylen</i>	382
4.4.4	Mechanochemische Polymersynthese.	383
4.4.4.1	<i>Pfropf- und Blockcopolymerbildung</i>	384
4.4.4.2	<i>Rheologische Messungen</i>	387
4.4.5	Zusammenfassung.	389
4.5	Trockene"Entschwefelung von Abgasen im Niedertemperaturbereich.	391
	<i>R. Jeschar, P. Dietz, G. Mittler, S. Bönig</i>	
4.5.1	Einleitung und Problemstellung	391
4.5.2	Modellreaktion.	393
4.5.3	Anlagenentwicklung.	394
4.5.3.1	<i>Systematik der Anlagenentwicklung</i>	394
4.5.3.2	<i>Festlegung der Anforderungen an Anlagenkomponenten</i>	395
4.5.3.3	<i>Konstruktionssystematik</i>	397
4.5.4	Konstruktion.	400
4.5.4.1	<i>Beschreibung der Versuchsanlage</i>	400
4.5.4.2	<i>Entwicklung des Injektors</i>	400
4.5.4.3	<i>Entwicklung des Gas-Feststoffabscheiders</i>	406
4.5.4.4	<i>Kreisprozessentwicklung</i>	412
4.5.4.5	<i>Anwendung einer entwicklungsbegleitenden Sicherheitsanalyse</i>	413
4.5.5	Betrieb.	415
4.5.5.1	<i>Experimentelle Untersuchung des Entschwefelungsprozesses</i>	416
4.5.5.2	<i>Betrieb Injektor</i>	423
4.5.5.3	<i>Betrieb Filterkammer</i>	424
4.5.6	Schlussfolgerungen.	424

4.6	Ultraschallreaktoren	426
	<i>U. Hoffmann, C. Horst</i>	
4.6.1	Verfahrenstechnische Aufgabenstellung	426
	4.6.1.1 <i>Ultraschallausbreitung und Wirkung.</i>	427
	4.6.1.2 <i>Technische Grignardreaktionen.</i>	434
	4.6.1.3 <i>Mechanochemisch aktivierte Reaktionen.</i>	437
4.6.2	Reaktor- und Verfahrensentwicklung	441
	4.6.2.1 <i>Entwicklung der Anforderungsliste.</i>	442
4.6.3	Werkstoffe für Ultraschallreaktoren	446
	4.6.3.1 <i>A kustische Kavitation und</i> <i>Kavitationswiderstand.</i>	446
	4.6.3.2 <i>Sonotrodenwerkstoffe.</i>	447
	4.6.3.3 <i>Reaktorwandwerkstoffe.</i>	449
4.6.4	Experimentelle Untersuchungen im Konusreaktor.	451
	4.6.4.1 <i>Grignardreaktionen mit Magnesium.</i>	454
	4.6.4.2 <i>Grignardreaktionen mit Magnesium-Calcium</i> ..	456
4.6.5	Scale-up und Ausblick	458
4.7	Reaktionsverdichter.	463
	<i>U. Hoffmann, P. Dietz, U. Kunz</i>	
4.7.1	Verfahrenstechnische Aufgabenstellung, Kunststoffrecycling.	463
4.7.2	Abbau von Polymeren in überkritischem Wasser.	466
4.7.3	Versuche im Batchreaktor.	468
4.7.4	Versuche im Semibatchreaktor.	472
4.7.5	Verfahrenstechnische Anforderungen	474
4.7.6	Entwicklung des kontinuierlich arbeitenden Reaktionsverdichters zum Abbau von Kunststoffen durch den Einsatz überkritischen Wassers.	476
	4.7.6.1 <i>Aufgabenstellung und Anforderungsliste.</i>	476
	4.7.6.2 <i>Konstruktive Umsetzung der</i> <i>Prozessanforderungen.</i>	478
4.8	Werkstofftechnik für Reaktionsverdichter.	489
	<i>U. Draugelates, A. SchräM</i>	
4.8.1	Werkstofftechnische Aufgabenstellung	489
4.8.2	Charakterisierung des Beanspruchungskollektivs der Modellreaktion.	490
4.8.3	Anforderungen an einen Prüfstand	491
4.8.4	Prüfstandkonzept	493
	4.8.4.1 <i>Kolbenprüfstand.</i>	493
	4.8.4.2 <i>Stempelprüfstand.</i>	494
	4.8.4.3 <i>Rührautoklave.</i>	495
	4.8.4.4 <i>Bewertung der Lösungskonzepte.</i>	497
4.8.5	Versuchsbedingungen.	498
4.8.6	Schlussfolgerung	502

5	Werkstoff- und Fertigungstechnik	505
5.1	Auftragschweißen von Verschleißschutzschichten mit definierter Gefügemorphologie. <i>U. Draugelates, R. Reiter</i>	507
5.1.1	Problemstellung und Einleitung	507
5.1.2	Schichtverbundbauweise	507
5.1.3	Beschichtungsverfahren	508
5.1.4	Werkstoffe zum Hartauftragschweißen	508
5.1.5	Gefügeaufbau und Werkstoffeigenschaften	509
5.1.6	Das System Kobalt-Chrom-Kohlenstoff	512
5.1.7	Untersuchungen eutektischer Kobaltbasishartlegierungen	512
5.1.8	Auftragschweißen von Schutzschichten mit ausgerichteter Hartstoffeinlagerung	517
5.1.9	PHP-Hartauftragschweißen einer eutektisch erstarrenden Kobalthartlegierung	520
5.2	Metall-Keramik-Verbindungen durch Diffusionsschweißen für den Einsatz in verfahrenstechnischen Maschinen. <i>U. Draugelates, A. Schräm</i>	525
5.2.1	Einleitung	525
5.2.2	Fügen von Metall-Keramik-Verbunden	525
5.2.3	Diffusionsschweißen	527
5.2.3.1	<i>Schweißen mit einer Diffusionsschweißanlage</i>	527
5.2.3.2	<i>Gasdruckdiffusionsschweißen</i>	529
5.2.4	Werkstoffauswahl für die Diffusionsschweißversuche	530
5.2.4.1	<i>Keramische Werkstoffe</i>	531
5.2.4.2	<i>Metallische Grundwerkstoffe</i>	535
5.2.4.3	<i>Zwischenschichten und Zwischenschichtsysteme</i>	535
5.2.5	Diffusionsschweißungen	536
5.2.5.1	<i>Direktschweißungen zwischen Keramik und Metallen</i>	536
5.2.5.2	<i>Diffusionsschweißungen mit Zwischenschichten und -Systemen</i>	539
5.2.6	Mechanische Eigenschaften der Diffusionsschweißungen	540
5.2.7	Schlussfolgerung	541
5.3	Untersuchungen der Temperaturwechselbeständigkeit insbesondere von keramischen Werkstoffen als Grundlage für den Hochtemperaturmaschinenbau („Temperaturwechselbeanspruchung“). <i>R. Jeschar</i>	543
5.3.1	Einleitung und Problemstellung	543
5.3.2	Theoretische Grundlagen zur Berechnung der therminduzierten Spannungen	545

5.3.3	Einflussfaktoren auf die kritische Abkühlgeschwindigkeit	556
5.4	Hochtemperaturoxidationsschutz von C/C-Werkstoffen aufMullitbasis. <i>G. Borchardt, A. Schnittker</i>	564
5.4.1	Vorbemerkungen	564
5.4.2	PLD-Schutzschichten	566
5.4.3	Sol-Gel-Schutzschichten	569
5.4.4	Schlussfolgerungen	574
5.4.5	Danksagung	578
5.5	Hartbearbeitung von Industriekeramik <i>U. Draugelates, R. Reiter</i>	579
5.5.1	Einleitung	579
5.5.2	Ultraschallschwingläppen	580
5.5.3	Werkstoffe und Abtrennleistung	582
5.5.4	Oberflächentopographie und Rauheit	588
5.5.5	Bauteilfestigkeit	593
5.5.6	Zusammenfassung	596
	Veröffentlichungen, Vorträge und Dissertationen des Sonderforschungsbereichs 180.	603
	Sachverzeichnis	619