

1	Die Festigkeit von Zentrifugenrotoren	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Die Beanspruchungsarten von Zentrifugenbauteilen	1
1.3	Die Ermittlung der Festigkeitswerte.....	2
1.3.1	Statische Festigkeitswerte.....	2
1.3.2	Die Wechselfestigkeit.....	5
1.3.2.1	Die Phänomene des Dauerbruchs.....	5
1.3.2.2	Zeitfestigkeit, Wöhlerkurve.....	5
1.4	Die Kerbwirkung	9
1.4.1	Formzahlen	10
1.4.2	Plastizierung durch Kerbwirkung; Abbau von Spannungsspitzen	11
1.4.3	Berechnung der Kerbwirkung im elastischen und plastischen Bereich.....	12
1.4.4	Eigenspannungen im Kerbgrund	14
1.5	Experimentelle Spannungsermittlung.....	14
1.5.1	Formzahlen an Einzellöchern	15
1.5.2	Spannungen in Lochfeldern.....	16
1.5.3	Berechnete Formzahlen für Lochfelder	17
1.5.4	Verringerung der Dauerfestigkeit durch Kerbwirkung.....	19
1.5.5	Verfahrenstechnische Aspekte zu Lochfeldern	22
1.5.6	Absenkung des E-Moduls von Lochfeldern	24
1.6	Grundzüge der Trommelberechnung.....	26
1.6.1	Berechnung des „fiktiven“ Innendrucks.....	26
1.6.2	Vom Innendruck zu den Umfangsspannungen des Rotors.....	28
1.6.3	Die axialen Belastungen von Zentrifugentrommeln.....	30
1.6.3.1	Die hydrostatische Belastung von Stirn- und Rückwand	30
1.6.3.2	Zusätzliche Axialbelastungen durch den Stofftransport.....	31
1.6.4	Das Dehnungsverhalten der einzelnen Trommelbauteile	31
1.6.5	Das Dehnungs- und Verformungsverhalten der Trommelbauteile als Gesamtkörper..	32
1.6.6	Ergebnis der Berechnungen und konstruktive Konsequenzen	35
1.7	Verschiedene Belastungsarten der Zentrifugenrotoren.....	37
1.7.1	Einleitung.....	37
1.7.2	Statische Belastung.....	37
1.7.3	Dynamische Belastungen.....	38
1.8	Konstruktive Lösungen und Schadensfälle.....	41
1.9	Überlastungen der Zentrifugenrotoren.....	44
1.10	Fallbeispiele	45
1.10.1	Festigkeitsuntersuchung an einer Schwingzentrifuge	45
1.10.1.1	Die Erklärung der Konstruktion	45
1.10.1.2	Das spannungsoptische Modell	47
1.10.1.3	Isochromatenbilder und Auswertung	48
1.10.1.4	Dynamische Untersuchung mit Dehnmessstreifen (DMS)	49
1.10.2	Der Festigkeitsnachweis einer Separatortrommel unter Anwendung der FEM	50
1.10.2.1	Einleitung	50
1.10.2.2	FEM-Modell der Trommelstruktur.....	50
1.11	Literatur zu Kapitel 1.....	53

2	Drehzahlsynchrone Schwingungen an Zentrifugen	1
2.1	Schwingungsanregung durch Unwuchten	1
2.1.1	Einleitung, Problemstellung, Begriffserklärung	1
2.1.2	Auswuchten starrer Rotoren	2
2.1.2.1.	Definition des starren Rotors	2
2.1.2.2.	Berechnung der zulässigen Restunwuchten	4
2.1.3	Elastische Rotoren	4
2.1.3.1.	Grundlegende Zusammenhänge	4
2.1.3.2.	Biegeeigenfrequenz der Förderschnecke	4
2.1.3.3.	Biegeeigenfrequenz der Trommel	6
2.1.4	Unwucht und Schwingungen der Gesamtmaschine	7
2.1.4.1.	Aufstellungseigenfrequenzen der starren Maschine	7
2.1.4.2.	Unwuchterregte Schwingungen	8
2.1.4.3.	Beanspruchung von Rotor und Gestell	9
2.1.4.4.	Schwingungsisolierung und Bodenkraft	10
2.1.4.5.	Fertigungsgenauigkeit, Passungen und Toleranzen	10
2.1.5	Ursachen für Unwuchten	11
2.1.5.1.	Thermische Einflüsse	11
2.1.5.2.	Unwucht durch Flüssigkeitsverdrängung der Schnecke	12
2.1.5.3.	Unwucht durch Flüssigkeitsströmung im Dekanter	13
2.1.5.4.	Unwucht durch den Feststofftransport im Dekanter	13
2.1.5.5.	Unwuchten beim Auslaufen des Dekanters	13
2.1.5.6.	Unwucht durch Schichtdurchbruch bei Schubzentrifugen (Fluten)	14
2.1.5.7.	Unwucht bei diskontinuierlichen Filterzentrifugen (Feststoffunwucht, Flüssigkeitsunwucht und umlaufende Wellen)	14
2.1.5.8.	Unwuchten bei Separatoren	14
2.1.5.8.1.	Unwuchten beim Anfahren eines Separators	14
2.1.5.8.2.	Unwuchten durch Anbackungen an den Tellern	15
2.1.5.8.3.	Unwuchten nach Teilentleerungen	15
2.1.5.8.4.	Unwucht nach einer Vollentleerung	15
2.1.5.8.5.	Unwuchten bei Düsenseparatoren	15
2.1.6	Checkliste zum Auffinden der Unwuchtursachen im Betrieb	16
2.1.6.1.	Bei diskontinuierlichen Filterzentrifugen	16
2.1.6.2.	Bei allen kontinuierlichen Filterzentrifugen	16
2.1.6.3.	Bei Dekantierzentrifugen	17
2.1.7	Auftreten von Schwebungen beim Dekanter	18
2.1.8	Konstruktive Möglichkeiten zur Erhöhung der biegekritischen Drehzahl bei Dekantierzentrifugen	19
2.1.8.1.	Steife Unterstützung der Hauptlager	19
2.1.8.2.	Reduzierung der Getriebemasse	19
2.1.8.3.	Getriebe zwischen den Hauptlagern	19
2.1.8.4.	Weich aufgehängte Hauptlager	20
2.1.8.5.	Getrennte Lagerung des Umlaufgetriebes	21
2.1.8.6.	Die schwimmende Schnecke	21
2.1.8.7.	Kombinationen der Maßnahmen	21
2.1.8.8.	Verfahrenstechnische Konsequenzen der Trommelverlängerung	21
2.1.8.9.	Vergleich der Maßnahmen zur Erhöhung der Trommelverlängerung	22
2.1.9	Konstruktive Möglichkeiten zur Verschiebung der krit. Drehzahl bei Separatoren	23
2.1.10	Zusammenfassung, Ausblick und weiterführende Literatur zu Kap. 2.1	24
2.2	Schallmessungen und Grundlagen der lärmarmen Konstruktion	25
2.2.1.	Einleitung und Problemstellung	25
2.2.2.	Personenbezogener Beurteilungspegel	25
2.2.3.	Schallmessungsverfahren	25

2.2.3.1.	Hüllflächenverfahren.....	25
2.2.3.2.	Korrekturpegel für den Raumeinfluss	27
2.2.3.3.	Korrekturpegel für das Fremdgeräusch	29
2.2.3.4.	Korrekturpegel für Luftdruck und Temperatur	29
2.2.3.5.	Messflächenmaß.....	30
2.2.3.6.	Frequenzabhängigkeit und physiologische Bewertung	30
2.2.3.7.	Zusammenfassung des Hüllflächenverfahrens	31
2.2.4.	Schallintensitätsmessverfahren.....	31
2.2.4.1.	Wirkungsweise der Zweimikrofonsonde.....	31
2.2.4.2	Praktische Durchführung der Intensitätsmessung	32
2.2.4.3	Zusammenfassung und Ausblick.....	33
2.2.5	Gründzüge der lärmarmen Konstruktion.....	33
2.2.5.1	Primärmaßnahmen.....	33
2.2.5.2	Schalldämmungsmaßnahmen	35
2.2.6	Weiterführendes Schrifttum zu Kap. 2.2	36
2.3	Zum Schwingungsverhalten und zur Rotordynamik.....	37
2.3.1	Einleitung.....	37
2.3.2	Marktforderungen als Entwicklungsmotor	37
2.3.2.1	Entwicklung der experimentellen Modalanalyse	38
2.3.2.2	Strukturmechanische Grundlagen	38
2.3.3	Durchführung der Modalanalyse	39
2.3.3.1	Beschreibung der Messtechnik.....	39
2.3.3.2	Fehlermöglichkeiten bei der Datenerfassung	39
2.3.4	Untersuchungen an Dekantierzentrifugen	40
2.3.4.1	Rotoreigenfrequenz als Drehzahlgrenze.....	40
2.3.4.2	Schwingungsverhalten der Förderschnecke	41
2.3.4.3	Generelle Lage der Eigenfrequenzen	41
2.3.5	Zusammenfassung und Ausblick.....	42
2.3.6	Literatur zu Kapitel 2.3.....	43
2.4	Berechnung der ersten Biegeeigenfrequenz von Aufgaberohren	44
2.4.1	Einleitung und Problemstellung	44
2.4.2	Das zylindrische Aufgaberohr	46
2.4.2.1	Exakte Lösung der Bewegungsgleichung	46
2.4.2.2	Näherung für das dünnwandige, zylindrische Rohr	46
2.4.2.3	Näherungslösung mit dem Rayleigh-Quotienten	47
2.4.2.4	Vergleich der Näherungen.....	48
2.4.3	Das konische Aufgaberohr	49
2.4.3.1	Dünnwandiges, konisches Aufgaberohr.....	49
2.4.3.2	Beispiel für das dünnwandige, konische Rohr	51
2.4.3.3	Dickwandiges, konisches Aufgaberohr	51
2.4.4	Messung der Eigenfrequenz	52
2.4.5	Frequenzabsenkung durch Suspension und Einzelmassen	53
2.4.6	Abschließende Bemerkungen	54
2.4.7	Literatur zu 2.4.....	55
2.5	Das Auswuchten von Zentrifugenrotoren	55
2.5.1	Der Drehzahlbereich des Auswuchtens	55
2.5.2	Vorbereitung der Auswuchtmaschine.....	55
2.5.3	Sicherheit	56
2.5.4	Auswuchten einer Dekanterschnecke	56
2.5.5	Auswuchten einer Dekantertrommel	57
2.5.6	Auswuchten von Dekantern im Betriebszustand.....	58

2.5.7	Ausführung einer Unwuchtmessung in der Produktionsstätte.....	59
2.5.7.1	Sicherheit.....	59
2.5.7.2	Vorbereitung.....	59
2.5.7.3	Unwuchtkalibrierung und –messung.....	59
2.5.8	Literatur zu 2.5.....	60

3 Selbsterregte Schwingungen an Zentrifugen 1

3.1 Mechanismen selbsterregter Schwingungen1

3.1.1	Typ 1: Schwingungserregung durch Reibung	1
3.1.1.1	Beispiel a) Das Weinglas	1
3.1.1.2	Beispiel b) Die Geige (oder allgemein Streichinstrumente).....	1
3.1.1.3	Beispiel c) Körper auf bewegter Unterlage, z.B. Förderband	1
3.1.1.4	Beispiel d) „Rupfen“ einer Fahrzeugkupplung	1
3.1.2	Typ 2: Schwingungserregung durch einen Schneid- oder Zerspannungsvorgang	2
3.1.2.1	Beispiel e): Der ratternde Drehstuhl.....	2
3.1.3	Typ 3: Schwingungserregung durch Bruch- und Schervorgänge.....	2
3.1.4	Typ 4: Schwingungen durch Strömungsvorgänge.....	2

3.2 Die Voraussetzungen für das Entstehen selbsterregter Schwingungen2

3.2.1	Das schwingungsfähige System.	2
3.2.2	Die Anfachungsmechanismen	3
3.2.2.1	Erregung durch Reibung	3
3.2.2.2	Erregung durch Schneidvorgänge	4
3.2.2.3	Erregung durch Schüttgutfließen.....	4

3.3 Drehschwingungen an Dekantierzentrifugen5

3.3.1	Beobachtete Phänomene und Maschinenschäden	5
3.3.2	Beobachtungen an vielen Produkten	7
3.3.3	Eigenheiten des Plastizierungsprozesses und Verlauf einer Plastizierung	8
3.3.3.1	Verlauf einer Plastizierung.....	8
3.3.4	Identifizieren des schwingungsfähigen Systems	9
3.3.4.1	a) Blattschwingungen	9
3.3.4.2	b) Elastischer Trommelboden	9
3.3.4.3	c) Drehschwingungen der Schnecke	9
3.3.5	Messungen von Drehmoment und Schwingfrequenz	10
3.3.6	Das Drehschwingungssystem des Dekanters.....	11
3.3.7	Der Mechanismus der Schwingungsanregung.....	13
3.3.8	Ergebnisse mit veränderten Konstruktions- und Maschinenparametern im Produktionsbetrieb einer Dimethylterephthalat-Anlage	14
3.3.9	Abhängigkeit der Dreheigenfrequenz von der Maschinengröße	16
3.3.10	Die Grenzdigramme für schwingungsfreien Betrieb	17
3.3.11	Die Masterkurve für schwingungsfreien Betrieb.....	19
3.3.12	Bemerkungen und Warnungen zum Betrieb im Drehschwingungsgebiet.....	20

3.4 Mathematische Modelle für die Anfachung reibungserregter Schwingungen21

3.4.1	Ein einfaches Modell ohne Dämpfung; der Reibschwinger auf ablaufendem Band....	21
3.4.1.1	Amplitude und Schwingungsdauer der stationären selbsterregten Schwingung	24
3.4.2	Die Übersetzung des Modells auf die Drehbewegung im Dekanter.....	26
3.4.3	Ingenieurmäßige Folgerungen der einfachen Theorie ohne Dämpfung	27
3.4.4	Die exakte Bewegungsgl. der torsionsschwingenden Schnecke und ihre Lösung	27

3.5	Konstruktive Möglichkeiten zur Reduktion der Drehschwingungen	30
3.5.1	Geänderte geometrische Auslegung der Schnecke.....	30
3.5.2	Viskose Dämpfung der Schnecke.....	30
3.5.3	Viskos gedämpfter gelagerter Massering	31
3.5.4	Dämpfung der Schnecke mit Coulombscher Reibung.....	31
3.5.5	Weichabstimmung des Schneckenwelle-Schneckensystems	31
3.5.6	Weiche Abstützung des Getriebezapfens	33
3.5.7	Minimierung aller Spiele; im Getriebe und zwischen Getriebe und Schneckenantriebswelle.....	34
3.5.8	Kühlen und Schmieren der Kontaktfläche Schnecke-Kuchen.....	34
3.5.9	Der hydrostatische Schneckenantrieb von VISCOTHERM.....	34
3.5.9.1	Die thermisch verursachte Anregung (Chatter-Schwingung)	34
3.5.9.2	Die durch Slip-Stick verursachten Schwingungen	36
3.6	Dauerbrüche an einem Schubboden einer Schubzentrifuge	39
3.7	Schwingungs- und Rattererscheinung der Schälvorrichtung	41
3.7.1	Beobachtete Phänomene und Schäden	41
3.7.2	Analyse des Schwingungssystems.....	41
3.7.3	Abhilfemaßnahmen.....	43
3.8	Selbsterregte Schwingungen durch Flüssigkeitsunwuchten.....	44
3.8.1	Beobachtete Phänomene der Flüssigkeitsunwuchten in Filterzentrifugen	45
3.8.2	Physikalisches Verständnis, rechnerische Behandlung und Ergebnisse der Forschung	47
3.8.2.1	Turbinenbau	47
3.8.2.2	Spin stabilisierte Satelliten	47
3.8.2.3	Die Anwendungen in Industrie-Zentrifugen	47
3.8.3	Konsequenzen für die Praxis	51
3.9	Literatur zu Kapitel 3.....	52
4	Werkstoffe des Zentrifugenbaus	1
4.1	Einleitung.....	1
4.2	Rost- und säurebeständige Stähle	1
4.2.1	Charakteristische Eigenschaften	1
4.2.2	Grundlegende Einflüsse der chemischen Zusammensetzung	2
4.2.3	Die Gefüge der rost- und säurebeständigen Stähle.....	3
4.2.4	Gefügeübersicht (exemplarisch):.....	4
4.2.5	Das Schaeffler-Diagramm	11
4.2.6	Einsatzgebiete der rost- und säurebeständigen Stähle im Zentrifugenbau	12
4.2.7	Vergleichstabellen verschiedener Zentrifugenstähle	14
4.3	Nickel und Nickelbasislegierungen	17
4.4	Sonderwerkstoffe	19
4.4.1	Metallische Sonderwerkstoffe	19
4.4.2	Nichtmetallische Sonderwerkstoffe, gewickelte Rotoren.....	20
4.4.3	Literatur zu 4.4.2.....	23
4.5	Siebwerkstoffe	26
4.5.1	Stähle	26
4.5.1.1	Ferritische Chromstähle.....	26

4.5.1.2	Austenitische Chromnickelstähle.....	26
4.5.1.3	Austenitische Molybdänstähle.....	27
4.5.1.4	Ferritisch-austenitische (Duplex-) Stähle.....	27
4.5.2	Weitere Informationen.....	27
4.6	Herstellverfahren der metallischen Werkstoffe.....	28
4.6.1	Gusswerkstoffe	28
4.6.2	Schleuderguss	28
4.6.3	Schmiedestücke	30
4.6.4	HIP-Verfahren	30
4.6.5	Schweißkonstruktionen.....	30
4.7	Schweißen von Edelstählen.....	30
4.7.1	Schweißen und Wärmebehandlung	30
4.7.2	Produktberührte Schweißverbindungen.....	33
4.7.3	Einflüsse auf das Gefüge in Naht und Nahtumgebung bei Edelstahl.....	33
4.7.4	Rauheitsanforderungen an die Oberflächenqualität.....	34
4.7.5	Hygieneanforderungen an Schweißnähte	35
4.8	Korrosionsbeständigkeit metallischer Werkstoffe	36
4.8.1	Lieferzustand vergütet bzw. lösungsgeglüht	37
4.9	Anforderungen an metallische Oberflächen	38
4.9.1	Bearbeitungsverfahren.....	38
4.9.2	Hygienerrelevante Bearbeitungsverfahren.....	38
4.9.3	Struktur von produktberührten metallischen Oberflächen	39
4.9.4	Strukturen und Effekte an gegenseitigen Berührflächen von Materialien.....	42
4.10	Oberflächenverkleidungen und Schutzanstriche.....	43
4.10.1	Metallische Plattierungen	43
4.10.2	Gummierung von Zentrifugen	43
4.10.2.1	Gestaltung der Bauteile.....	44
4.10.2.2	Behandlung der Werkstücke vor dem Gummieren.....	44
4.10.2.3	Das Aufbringen des Schutzbelags.....	45
4.10.2.4	Der Vulkanisationsvorgang.....	45
4.10.2.5	Nachträgliche Oberflächenbearbeitung nach dem Gummieren.....	45
4.10.2.6	Nacharbeiten, Reparaturen.....	46
4.10.2.7	Nachwuchten.....	46
4.10.2.8	Prüfung der Gummierung auf Dichtheit.....	47
4.10.2.9	Transport und Lagerung.....	47
4.10.2.10	Einsatzgrenzen und Lebensdauer.....	47
4.10.2.11	Literatur und weitere Informationen zu Kapitel 4.10.....	47
4.10.3	Auskleidung mit Thermoplasten.....	48
4.10.4	Auskleidung mit Duromeren	50
4.10.5	Emallierung von Zentrifugentrommeln	52
4.11	Kunststoffe und Dichtungswerkstoffe.....	53
4.11.1	Einleitung.....	53
4.11.2	Allgemeine Überlegungen zur Verwendung von Kunststoffen.....	53
4.11.3	Administratives und gesetzliche Bestimmungen.....	54
4.11.4	Plastomere oder Thermoplaste	55
4.11.4.1	PTFE Polytetrafluorethylen.....	55
4.11.4.2	PVDF Polyvinylidenfluorid.....	56

4.11.4.3	PC Polycarbonat.....	56
4.11.4.4	PEEK Polyetheretherketon.....	56
4.11.4.5	PET Polyterephthalat.....	56
4.11.5	Elastomere	57
4.11.5.1	NBR Acrylnitril-Butadien-Kautschuk.....	57
4.11.5.2	HNBR Hydrogenisierter Acrylnitril-Butadiene-Kautschuk.....	57
4.11.5.3	EPM/EPDM Ethylen-Propylen-Kautschuk.....	57
4.11.5.4	VMQ Silikon-Kautschuk.....	57
4.11.5.5	FKM Fluorkautschuk (Fluorelastomere).....	58
4.11.5.6	FFKM Perfluorelastomere.....	58
4.11.6	Struktur von produktberührten Kunststoffoberflächen.....	58
4.12	Hilfsstoffe für den Betrieb von Zentrifugen.....	59
4.12.1	Schmierstoffe.....	59
4.12.2	Flüssigkeiten zur Übertragung physikalischer Größen.....	60
4.13	Werkstoffprüfung.....	61
4.13.1	Das Farbeindringverfahren	62
4.13.2	Magnetpulverprüfung	63
4.13.3	Die Wirbelstromprüfung.....	65
4.14	Allgemeine Literatur zu Kapitel 4.....	66

5 Verschleiß und Verschleißschutz an Zentrifugen 1

5.1	Einleitung, Arten des Verschleißes	1
5.2	Verfahrenstechnische Folgen des Verschleißes	2
5.3	Versuch der Quantifizierung des Verschleißes.....	3
5.4	Verschleißschutzmaßnahmen.....	7
5.4.1	Autogener Verschleiß	7
5.4.2	Pulvermetallurgischer Auftrag.....	8
5.4.3	Panzerung durch Hartmetallplatten	9
5.5	Schutz der einzelnen Bauteile vor Verschleiß.....	9
5.5.1	Einlaufrohr, besonders von Dekantern	9
5.5.2	Verschleiß der Schneckenblätter	10
5.5.3	Verschleiß an Schneckenblättern im Bereich des Einlaufs	12
5.5.4	Verschleiß an Öffnungen und Bohrungen	13
5.5.5	Verschleiß an der Dekantertrommel.....	14
5.5.6	Verschleißschutzmaßnahmen an Schubzentrifugenrotoren.....	16
5.5.7	Verschleißschutz des Gehäuses	17
5.6	Abrasions- und Korrosionsfälle aus der Praxis.....	20
5.6.1	Korrosion an Dekantierzentrifugen und wirtschaftliche Lösungen.....	20
5.6.2	Erosion an Dekanterschnecken.....	23
5.7	Literatur zu Kapitel 5.....	25

6 Dichtungen in Zentrifugen 1

6.1	Einleitung	1
------------	-------------------------	----------

6.2	Statische Dichtungen	3
6.2.1	Metallische Abdichtung.....	4
6.2.2	Elastomer-Dichtungen	4
6.2.2.1	Rundring-Dichtungen.....	5
6.2.2.2	Profildichtungen	6
6.2.2.3	Flachdichtungen	7
6.3	Dynamische Dichtungen für Längsbewegungen.....	8
6.4	Dynamische Dichtungen für Rotationsbewegungen.....	9
6.4.1	Allgemein	9
6.4.2	Offene Bauweise.....	10
6.4.3	Schwadendichte Maschinen.....	10
6.4.4	Gasdichte Maschinen.....	14
6.4.4.1	Gasdichte Maschinen bis 2 kPa Überdruck.....	14
6.4.4.2	Gasdichte Maschinen im Bereich 20 – 100 kPa Überdruck.....	15
6.4.5	Druckdichte Maschinen mit mehr als 50 kPa Überdruck.....	16
6.4.6	Gleitringdichtung in „Hygienic design“-Ausführung.....	21
6.5	Sonderbauformen	22
6.5.1	Rotationssiphon – Dichtung	22
6.5.2	Hermetische Drehdurchführungen.....	23
6.5.2.1	Magnetantrieb.....	23
6.5.2.2	Rotationsbewegung mit Faltenbalg.....	24
6.6	Funktionentrennung von Dichtungen bei höheren Anforderungen.....	25
6.7	Literatur zu Kapitel 6.....	26
7	Hygienic Engineering und Hygienic Design	1
7.1	Die Entwicklung der diskontinuierlichen Produktionsmethoden.....	1
7.1.1	Die „Chemie-Küche“.....	1
7.1.2	Das „Basler Konzept“, die multifunktionale Produktionsanlage	2
7.1.3	Die Multifunktionsgeräte (Universalnutschen)	4
7.1.4	Übertragung der Multifunktionsidee auf Zentrifugen; Zentrifugentrockner	5
7.1.5	Weiterführende Gedanken zur Multifunktionsidee	6
7.1.5.1	Kartuschenbauweise für Zentrifugen	6
7.1.5.2	Das Konzept der HAPI-Zentrifuge.....	7
7.2	Anforderungen der Food- und Pharmaindustrie	9
7.3	Hygienegerechte konstruktive Gestaltung der Anlage und ihrer Komponenten	10
7.3.1	Detailprobleme an Komponenten.....	10
7.4	Diskontinuierliche Filterzentrifugen	14
7.4.1	Reinigungsgerechte Bauweisen	14
7.4.2	Pharmagerechte Konzeption.....	16
7.4.3	„Durch die Wandbauweise“ von Filterzentrifugen – Reinrauminstallation	16
7.5	Kontinuierliche Zentrifugen.....	17
7.5.1	Dekantierzentrifugen	17
7.5.2	Siebschneckenzentrifuge	22
7.5.3	Schubzentrifugen	23

8.4	Ermittlung der Leerlaufleistung	17
8.4.1	Durch freies Auslaufen der Zentrifuge	17
8.4.2	Aufspalten der Leerlaufleistung in Reib- und Ventilationsverluste	18
8.4.3	Ermittlung der Parameter M_R und m_2	21
8.4.4	Überschlagsformeln der Praxis für die Leerlaufleistung	22
8.4.5	Besonderheiten bei der Ermittlung der Antriebsleistung.....	24
8.4.5.1	Koaxiale Zentratabführung.....	24
8.4.5.2	Impulsrückgewinn durch „rückwärts gerichteten“ Massenabwurf	25
8.5	Transportleistung bei kontinuierlichen Zentrifugen	27
8.5.1	Transportleistung bei Schneckenzentrifugen.....	27
8.5.2	Transportleistung bei Schubzentrifugen	29
8.6	Regressionsanalytische Berechnung der Antriebsleistung von Dekantern.	31
8.7	Elektrische Antriebsmotoren für Zentrifugen.....	33
8.7.1	Allgemeines	33
8.7.2	Schutz- und Kühlungsarten.....	34
8.7.3	Thermische Klassifizierung	37
8.7.4	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien von Induktionsmotoren am Netz	38
8.7.5	Thermische Beanspruchung beim Anfahren	40
8.7.5.1	Allgemeine Grundlagen	40
8.7.5.2	Schleifringläufer mit Vorwiderstand im Läuferkreis	41
8.7.5.3	Direkteinschaltung von Käfigläufern	41
8.7.5.3.1	Käfigläufer mit Aluminium- oder Kupfer-Läufer	41
8.7.5.3.2	Käfigläufer mit Widerstandsmaterial im Läuferkreis (Schweranläufer)	42
8.7.5.4	Stern/Dreieck-Einschaltung von Käfigläufern	44
8.7.5.5	Anfahren von Käfigläufern mit Vorwiderstand oder Softstarter	46
8.7.5.6	Anfahren von Käfigläufern mit Polumschaltung	47
8.7.6	Thermische Beanspruchung beim elektrischen Bremsen	47
8.7.6.1	Gegenstrombremsen.....	47
8.7.6.2	Gleichstrombremsen.....	48
8.7.7	Anfahren und Betrieb mit umrichter gespeisten Käfigläufern.....	49
8.7.8	Literatur zu Kapitel 8.7.....	54
8.8	Anfahren des Rotors auf Nenndrehzahl.....	54
8.8.1	Einleitung.....	54
8.8.2	Die Bewegungsgleichungen; der Anfahrzeit-Leistungszusammenhang	54
8.8.3	Wahl und Auslegung der Motoren zum Anfahren	56
8.8.3.1	Der frequenzgeregelte Elektromotor, siehe Kap. 8.7.7	56
	Der Asynchronmotor (Induktionsmotor) in Direkteinschaltung (s.a.	57
8.8.3.2	Kap. 8.7.4 und 8.7.5.3)	57
8.8.3.3	Wichtige Hinweise	57
8.8.3.3.1	Riemenzüge.....	57
8.8.3.3.2	Berücksichtigung der Leerlaufleistung während des Hochfahrens.....	57
8.8.3.3.3	Mehrfaches Anfahren.....	57
8.8.4	Die verfeinerte Berechnung des Anfahrvorgangs.....	58
8.9	Die hydrodynamische Anfahrkupplung – Turbokupplung.....	60
8.9.1	Allgemeines	61
8.9.2	Zusammenspiel von Turbokupplung und Elektromotor	61
8.9.3	Ölfüllung.....	62
8.9.3.1	Bestimmung der erforderlichen Ölmenge	62
8.9.3.2	Füllungskontrolle.....	62

8.9.3.3	Sicherung gegen thermische Überlastung	64
8.10	Hydrostatischer Antrieb	65
8.11	Anordnungsvarianten des Hauptantriebs.....	69
8.11.1	Die Grundvariante; der Seitenantrieb	69
8.11.2	Motor oberhalb der Zentrifuge	69
8.11.3	Untenantrieb	70
8.11.4	Antrieb seitlich über Vorgelege.....	70
8.11.5	Doppelantrieb	71
8.11.6	Antrieb und Getriebe gegenüber.....	71
8.11.7	Axialer Direktantrieb	71
8.11.8	Koaxialer Antrieb mit zwei Vorgelegen.....	73
8.12	Riemenantriebe.....	73
8.12.1	Bauarten.....	73
8.12.2	Richtige Betriebsbedingungen für Riementriebe.....	73
8.12.3	Keilriemenspannung	74
8.12.4	Keilriemenwechsel	74
8.13	Fallbeispiele.....	75
8.13.1	Fallbeispiel Füllen einer Schälzentrifuge	75
8.13.2	Fallbeispiel Bestimmung der Leerlauf-Drehmomentenkurve in Abhängigkeit der Rotordrehzahl	76
8.14	Literatur zu Kapitel 8.....	78
9	Baugrößenabstufung und Wachstumsgesetze für Zentrifugen	1
9.1	Allgemeine Überlegungen zur Größenabstufung	1
9.2	Abstufung nach der Normreihe	1
9.2.1.	Abstufung nach typischen Anlagegrößen.....	1
9.2.2	Abstufung nach Marktstrategie.....	2
9.2.3	Vom Produktverhalten abhängige Kapazitätsgrößen	2
9.2.4	Strategische und psychologische Faktoren.....	2
9.3	Mechanische Größen und ihre Abhängigkeit von der Abstufung.....	3
9.3.1	Füllvolumen und Filterfläche bei Schälzentrifugen	3
9.3.2	Ermittlung der mechanischen Beanspruchung und ihre Abhängigkeit vom Wachstumsgesetz.....	3
9.3.3	Dimensionierung des Trommelmantels.....	4
9.3.4	Unwuchtkräfte (siehe Kap. 2.1).....	5
9.3.5	Trägheitsmoment und gespeicherte Energie im Rotor	6
9.3.6	Abbremszeit.....	6
9.4	Das Gesetz der Kostendegression.....	7
9.4.1	Kostendegression bei Drehfiltern	7
9.4.2	Dekanter, Separatoren.....	7
9.4.3	Aspekte der Verfügbarkeit, Reservekapazität, Produktionsausfall	8
9.5	Verfahrenstechnische Wirksamkeit unterschiedlich großer Zentrifugen	9
9.6	Beispiel der Auslegung einer PVC – Straße.....	10
9.6.1	Becherzentrifugentest zur Ermittlung der erreichbaren Restfeuchten.....	10

9.6.2	Modellzahl der Filtration und Permeabilität der verschiedenen PVC-Typen	11
9.6.3	Gegenüberstellung von Produkttypen und verschiedenen Dekantergrößen	12
9.6.3.1	Einsatz einer großen Maschine.....	12
9.6.3.2	Einsatz zweier oder mehrerer mittelgroßer Maschinen.....	14
9.7	Weitere Scale-up Gesetze bei der alternativen Maschinenauswahl	15
9.7.1	Umfangsgeschwindigkeit und Durchsatz	15
9.7.2	Verdampfungskosten im nachgeschalteten Trockner	15
9.7.3	Zentralklärung.....	15
9.7.4	Investitions- und Installationskosten	16
9.7.5	Betriebskosten.....	17
9.8	Beurteilung des gewählten Beispiels aus der Betriebspraxis.....	17
9.9	Alternative Siebdekanter	18
9.10	Analogien mit anderen Trenngeräten	18
9.11	Literatur zu Kapitel 9.....	18
10	Prozessintegration und Sicherheitstechnik	1
10.1	Betriebs sichere Führung der Massenströme durch die Zentrifuge.....	1
10.1.1	Verteilung und Zuführung der Suspension.....	1
10.1.2	Feststoffauswurf und Weitertransport	3
10.1.3	Verriegelungen der Zentrifuge mit vor- und nachgeschalteten Aggregaten.....	5
10.1.4	Einspeisung des Feststoffs aus einer Zentrifuge in einen Trockner	5
10.1.5	Abstellen von Dekantern ohne Flüssigkeitsauswurf.....	11
10.2	Maschinenüberwachung	11
10.2.1	Einleitung.....	11
10.2.2	Lager- und Lagerüberwachung.....	12
10.2.3	Überwachung der Dichtungen	16
10.2.4	Antriebs- und Kupplungsüberwachung	18
10.3	Verarbeitung entzündlicher Stoffe; Explosionsgefahren	19
10.3.1	Bildung explosionsfähiger Gemische	20
10.3.2	Untere und obere Explosionsgrenze - Explosionsbereich	20
10.3.3	Flammpunkt und Dampfdruck brennbarer Flüssigkeiten	21
10.3.4	Entzündung explosionsfähiger Gemische.....	22
10.3.5	Explosionsablauf.....	22
10.3.5.1	Explosionen in kubischen bzw. kugelartigen Behältern.....	23
10.3.6	Gase und Dämpfe	24
10.3.7	Stäube	25
10.4	Explosionsschutzmaßnahmen – Vorbeugender Explosionsschutz	25
10.4.1	Vermeiden explosionsfähiger Gemische	26
10.4.2	Vermeiden explosionsfähiger Konzentration	26
10.4.3	Verminderung des Sauerstoffgehalts (Inertisierung).....	26
10.5	Inertisierungsmethoden	26
10.5.1	Zündgrenzen und Inertisierung.....	27
10.5.2	Kinetik der Inertisierung.....	27
10.5.3	Überwachung der Schutzgasüberlagerung	29
10.5.4	Spülsystem mit kontinuierlicher Sauerstoffmessung.....	30

10.6	Vermeiden wirksamer Zündquellen	33
10.6.1	Zündquellen – Übersicht.....	34
10.6.1.1	Elektrische Funken	35
10.6.1.2	Mechanisch erzeugte Funken	35
10.6.2	Heiße Oberflächen der Maschine	35
10.7	Elektrostatische Aufladungen	36
10.7.1	Entstehung elektrostatischer Aufladung	36
10.7.2	Systematisches Vorgehen zur Beurteilung elektrostatischer Zündgefahren.....	37
10.7.3	Entladungen – Auftreten und Zündfähigkeit	39
10.7.4	Zusammenfassung der Zündfähigkeiten elektrostatischer Entladungen und der Maßnahmen zur Verhinderung der Entladungen.....	40
10.7.5	Elektrostatische Zündgefahren bei Zentrifugen und deren Vermeidung.....	41
10.8	Konstruktiver Explosionsschutz	42
10.8.1	Explosionsfeste Bauweise	42
10.8.2	Explosionsdruckentlastung	42
10.8.3	Explosionsunterdrückung	42
10.8.4	Explosionstechnische Entkopplung	43
10.9	Allgemeine Zündgefahrenbewertung für Zentrifugen	43
10.10	Maschinensicherheit/Funktionale Sicherheit/Risikoanalyse.....	44
10.11	Literatur zu Kapitel 10.....	47
11	Steuerung und Regelung von Zentrifugen	1
11.1	Zulaufregelung von kontinuierlichen Zentrifugen allgemein	1
11.1.1	Zulaufregelung über konstante Suspensions- oder Zentratmengen.....	1
11.1.2	Zulaufregelung über die Stromaufnahme oder die Drehzahlabenkung des Antriebsmotors	2
11.2	Steuerung von diskontinuierlichen Filterzentrifugen	2
11.2.1	Die Auswahlkriterien für eine Steuerung	3
11.2.2	Die verschiedenen Automatisierungskonzepte.....	4
11.2.2.1	Beispiel 1: Einfache Anwendungen	4
11.2.2.2	Beispiel 2: Standard-Anwendungen mit Mono Produkt.....	5
11.2.2.3	Beispiel 3: Komplexe Anwendungen mit mehreren Produkten	6
11.2.3	Vernetzungsmöglichkeit von Anlageteilen.....	7
11.2.4	Beispiel einer elektro-hydraulischen Steuerung von Schälzentrifugen	8
11.3	Überwachung und Steuerung von Schubzentrifugen	14
11.3.1	Unwucht während des Betriebs	14
11.3.2	Unwucht beim Anfahren.....	15
11.3.3	Regelung auf konstanten Feststoffdurchsatz	15
11.3.4	Regelung auf konstanten Feststoffdurchsatz "mit Überlastverarbeitung"	17
11.3.5	Selbstregelung der Schubzentrifuge durch eine „Drallbox“	18
11.3.6	Selbstregelung des Waschflüssigkeitsstroms	18
11.3.7	Weitergehende Vorschläge zur Automatisierung von Schubzentrifugen.....	18
11.3.7.1	Einleitung	18
11.3.7.2	Ziel der Regelung gegen Fluten	18
11.3.7.3	Eigene Versuche und Entwicklung von berührungsfreien Feuchtemessern.....	18
11.3.7.4	Ergebnisse der Regelung	21

11.4	Regelungen für Dekantierzentrifugen	21
11.4.1	Einleitung.....	21
11.4.1.1	Klares Zentrat.....	21
11.4.1.2	Konstante Restfeuchte.....	22
11.4.2	Zulaufregelung über konstantes Drehmoment oder konstanten Feststoffdurchsatz bei konstanter Differenzdrehzahl.....	22
11.4.3	Wirbelstrombremse.....	23
11.4.4	Doppel-Frequenz-Umrichter Antrieb (elektrischer geschlossener Backdrive)	24
11.4.5	Hydraulische Variante eines energetisch geschlossenen Backdrives (System Alfa Laval).....	25
11.4.6	Elektrische Variante eines Backdrives mit „rotierendem Vorgelegemotor" System Pieralisi "Rotovariator"	26
11.4.7	Der Direktantrieb (DD) von Alfa Laval	27
11.4.8	Der Zwei-Getriebe-Antrieb von Westfalia	28
11.4.9	Der Vier-Wellen-Antrieb (System Cyclo).....	30
11.4.10	Mechanischer Direktschneckenantrieb - System Flottweg Simp-Drive®.....	31
11.4.11	Hydrostatischer Antrieb von Viscotherm	32
11.5	Beispiele weiterer Regelungen.....	34
11.5.1	Dekanter mit niveaugeregeltem Feststoffaustrag	34
11.5.2	Entwurf einer neuen Regelungsstrategie für Dekanter mit Fuzzy-Logic	35
11.5.3	Regelung des Trockners nach der Zentrifuge.....	38
11.5.4	Regelung über die Axialkraft der Schnecke	38
11.6	Fernüberwachung von Zentrifugen.....	39
11.7	Literatur zu Kapitel 11.....	41
12	Produktschädigung in Zentrifugationsprozessen	1
12.1	Einleitung	1
12.2	Bewertung der Trenngeräte hinsichtlich Kornschonung	1
12.3	Die verschiedenen Produktgruppen und die Art ihrer Schädigung.....	3
12.3.1	Produkte der Aufbereitungsindustrie	3
12.3.2	Kristalline Produkte	4
12.3.2.1	Die Größenordnung der Kornzerstörung.....	4
12.3.2.2	Einfluss auf die Restfeuchte	5
12.3.2.3	Auswirkung auf nachgeschaltete Apparateauswahl	6
12.3.2.4	Einfluss auf die Kristallisation	6
12.3.2.5	Staubeffekte.....	7
12.3.2.6	Zusammenbacken des Schüttguts.....	8
12.3.3	Polymere Produkte (Thermoplaste).....	10
12.3.4	Selbstflockende Schlämme.....	12
12.3.5	Mit Flockungshilfsmitteln geflockte Schlämme.....	13
12.3.6	Organische Partikel, Mikroorganismen	13
12.4	Modellverfahren zur Kornschädigung.....	15
12.4.1	Stand der Kenntnisse und Auslegung	15
12.4.2	Analyse und Nachbildung der Beanspruchungsarten in den verschiedenen Zentrifugentypen.....	16
12.4.2.1	Nachbildung der Schubzentrifuge	16
12.4.2.2	Nachbildung der Produktzerstörung im Dekanterzulauf.....	19

12.4.2.3	Nachbildung im Separatorzulauf.....	19
12.4.2.4	Simulation des Schälens.....	19
12.5	Die Mechanismen der Zerstörung von Einzelpartikeln und Partikelagglomeraten; Messgeräte, Messmethoden.....	20
12.5.1	Zerstörung von Einzelpartikeln in Scherfeldern.....	21
12.5.2	Der Verzögerungsschock.....	22
12.5.3	Zerstörung durch Druck bzw. Druck und Scherung, Gutbettbeanspruchung.....	25
12.6	Der Einzelkorn-Drucktest.....	26
12.6.1	Die Vergleichbarkeit der dynamischen Belastung beim Aufprall mit der statischen Druckbelastung	26
12.6.2	Die Einzelkorn-Druckapparatur.....	28
12.6.3	Klassifizierung des Bruch- und Elastizitätsverhaltens	29
12.6.4	Der E-Modul als Kenngröße der Vorschädigung	31
12.6.5	Die Verwendung der Weibull-Verteilung	33
12.6.6	Darstellung und Diskussion der Bruchwahrscheinlichkeit.....	35
12.6.7	Gesamtdarstellung der Einzelkorntests.....	39
12.6.8	Bruchfestigkeit der Einzelpartikel	40
12.6.9	Die massenbezogene Bruchenergie	42
12.7	Übertragung der Grundlagen der Einzelkornzerkleinerung auf kontinuierliche Zentrifugen.....	45
12.8	Kornschonende Maßnahmen.....	49
12.8.1	Konstruktive Umsetzung kornschonender Maßnahmen.....	49
12.8.2	Verfahrenstechnische Verbesserungen	50
12.9	Mechanismen der Flockenzerstörung.....	51
12.9.1	Flockenaufbau und Struktur	51
12.9.2	Beanspruchung der Flocke in turbulenten Strömungen.....	52
12.9.3	Flockenbildung im Scherfeld.....	53
12.9.4	Die Scheibenzentrifuge zur Messung der Sedimentations- und Kompaktierungsgeschwindigkeit von geflockten Suspensionen	54
12.9.5	Flockenzerstörung durch Massenkräfte.....	56
12.9.6	Anwendung der Idee der Flockenertüchtigung für die Praxis	57
12.10	Mechanismen der Zellzerstörung	58
12.11	Literatur zu Kapitel 12.....	59
13	Kombinationsschaltungen von Trenngeräten	1
13.1	Einleitung	1
13.2	Unvollkommene Reinigung der Flüssigkeit	3
13.2.1	Grobkornabscheidung, Entgriesen.....	3
13.2.2	Dekanter - Separator	3
13.2.3	Trommelfilter - Kläreindicker - diskontinuierliche Druckfilter mit Anschwemmschicht	4
13.2.4	Die Nachklärung des Filtrates von Drehfiltern oder filtrierenden Zentrifugen	5
13.2.5	Dekanter - Klärbecken.....	5
13.2.6	Dekanter - Dekanter.....	6
13.2.7	Schubzentrifuge - Kläreindicker.....	7

13.3	Unvollkommene Entfeuchtung des Feststoffes im ersten Trenngerät.....	7
13.3.1	Drehfilter-Schubzentrifuge	7
13.3.2	Trommelfilter - Pressfilter	7
13.3.3	Voreindickung	8
13.4	Parallelschaltung verschiedener Trenngeräte	9
13.5	Wechselseitige Verbundschaltung von mechanischen Trenngeräten.....	10
13.5.1	Dekanter mit Siebschneckenzentrifuge als Waschstufe	10
13.5.2	Innere Kreisläufe von Trenngeräten	11
13.6	Serienschaltung verschiedener Trenngeräte bei Mehrphasentrennung	11
13.6.1	Fischmehlprozess.....	11
13.6.2	Raffinerieslop	12
13.7	Serienschaltungen von gleichen Trenngeräten	13
13.7.1	Waschfilterstraßen	13
13.7.2	Gegenstromdekantation (Counter-Current-Decantation, CCD)	13
13.7.3	Generationsschaltung von Hydrozyklonen.....	14
13.8	Kombination von Trenngeräten unter Verwendung eines Hilfskreislaufes	15
13.9	Vorklassieren der Aufgabetrübe vor einem Bandfilter	16
13.10	Fraktionierte Trennung zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit	17
13.10.1	Verfahrensschema einer Kohleaufbereitungsanlage.....	17
13.10.2	Kupferkonzentratentwässerung auf Schälzentrifugen	18
13.10.3	Vorklassieren der Suspension mit Hydrozyklonen; Verarbeitung auf verschiedenen Maschinentypen	22
13.11	Beispiele typischer trenntechnischer Schaltungen im Produktionsprozess	23
13.11.1	Abtrennung des kommunalen Klärschlammes	23
13.11.2	Der Olivenölprozess	24
13.11.3	Der Prozess der Weizenstärkegewinnung	25
13.11.4	Verwertung von Gülle und Gärresten aus Biogas-Anlagen.....	25
13.12	Literatur zu Kapitel 13.....	26
14	Hinweise und Empfehlungen für die Aufstellung, den Betrieb und für Betriebsmessungen von Zentrifugen	1
14.1	Einleitung	1
14.2	Allgemeines über die Aufstellung und die Installation	1
14.2.1	Aufstellungsort	1
14.2.2	Platzbedarf, Werkzeuge	1
14.2.3	Anschlüsse für Zulauf, Abläufe, Wasch- und Spülflüssigkeit, Probestutzen	3
14.2.4	Elektrische Schaltfunktionen und Verriegelungen, Anordnung wichtiger Messgeräte und Schalter	5
14.2.5	Gleitringdichtungen, Schutzgasbeaufschlagung	6
14.3	Erstmalige Inbetriebnahme der Zentrifugen.....	6
14.3.1	Grundlegende Sicherheitshinweise und Qualifizierung des Personals.....	6
14.3.2	Kontrollen vor dem Anfahren.....	7
14.3.3	Anfahren der Zentrifuge ohne Produkt.....	8
14.3.4	Beschickung mit Produkt.....	8

14.3.5	Störungen.....	9
14.3.6	Verriegelungen von Zentrifugen gegeneinander	9
14.4	Betriebsmessungen an Zentrifugen.....	9
14.4.1	Einleitung.....	9
14.4.2	Betriebsmessungen an diskontinuierlichen Zentrifugen.....	10
14.4.2.1	Füllen.....	11
14.4.2.2	Waschen	11
14.4.2.3	Nachschleudern	11
14.4.2.4	Das Ausschälen	12
14.4.3	Betriebsmessungen an kontinuierlichen Zentrifugen	12
14.4.3.1	Messung des Suspensionsdurchsatzes.....	12
14.4.3.2	Messen der Feststoffkonzentration.....	13
14.4.3.3	Messen des Feststoffdurchsatzes.....	14
14.4.3.4	Probenahme Feststoff.....	15
14.4.3.5	Messung des Filtrat/Zentratdurchsatzes	16
14.4.3.6	Flüssigkeitsproben.....	16
14.4.3.7	Stromaufnahme	18
14.4.3.8	Drehzahlmessung	18
14.4.3.9	Drehmomentmessung bei Dekantern und Siebschneckenzentrifugen.....	19
14.4.3.10	Schubdruckmessung an Schubzentrifugen	20
14.5	Literatur zu Kapitel 14.....	20

15 Literatur zur Wirtschaftlichkeit von Fest-Flüssig-Trennvorgängen

Stichwortverzeichnis