

DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

Technik der Wärmekraftwerke

Beiträge zur Kraftwerksforschung

Ergebnisse aus dem Sonderforschungsbereich
"Wärmekraftwerk"
der Universität Stuttgart

Herausgegeben von Rudolf Quack
und Jakob Wächter (t)

Sonderforschungsbereiche



Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	
	(<i>R. Quack, J. Wächter</i>).	1
1.1	Konzeption des Forschungsprogramms	2
1.2	Wärmefreisetzung und Wärmeübertragung	5
1.2.1	Wärmefreisetzung aus fossilen Brennstoffen	5
1.2.2	Abgasentstaubung	6
1.2.3	Wärmefreisetzung aus Kernreaktionen	8
1.2.4	Wärmetransport	8
1.2.5	Photoakustisches Konzentrationsmeßverfahren	9
1.3	Energiewandlung und Strömung	10
1.3.1	Thermohydraulik im Core	10
1.3.2	Endstufenversuchsstand	10
1.3.3	Magnetitschutzschicht	12
1.3.4	Abwärme	13
1.4	Kraftwerksleittechnik	14
1.4.1	Prozeßrechnereinsatz im Kraftwerk für leittechnische Aufgaben	15
1.4.1.1	Langzeitüberwachung	16
1.4.1.2	Experimentelle Identifikation von Mehrgrößensystemen	16
1.4.1.3	Optimale Regelung	17
1.4.1.4	Informationsaustausch zwischen Bedienungspersonal und Anlage	17
1.4.2	Störfallanalyse und optimale Störfallbeseitigung, Simulation von Kraftwerksblöcken, Strukturoptimale Regelung	18
1.5	Schlußbemerkung	20
1.6	Literatur	21
2	Wärmefreisetzung und Wärmeübertragung in Dampferzeugerfeuerungen (TP A 1/2)	
	(<i>R. Dolezal, W. Zinser, K. Görner, G. Kalmbach, M. Seeger</i>).	25
2.1	Einleitung	25
2.2	Grundlagen der Modellbildung für technische Flammen	26
2.2.1	Transportgleichungen	28
2.2.2	Turbulenz	29
2.2.3	Strahlungsaustausch	31
2.2.4	Reaktionsabläufe in technischen Brennstoffen	31
2.2.5	Berechnungsbeispiele	32

VI Inhaltsverzeichnis

2.3	Meßmethoden für technische Flammen	33
2.3.1	Allgemeines	33
2.3.2	Berührungslose Meßtechniken	34
2.3.2.1	Strahlungsmessung	34
2.3.2.2	LASER-Doppler-Anemometrie	37
2.4	Mathematische Modelle	37
2.4.1	Feuerraummodelle	37
2.4.2	Das Strömungsmodell und dessen numerische Lösung	38
2.4.2.1	Transportgleichungen und Turbulenzmodell	38
2.4.2.2	Druckgleichung	39
2.4.2.3	Lösung der Transportgleichungen	39
2.4.2.4	Lösung der Druckgleichung	40
2.4.3	Modelle zur Berechnung des Wärmestrahlungsaustausches	41
2.4.3.1	Zonenverfahren	41
2.4.3.2	Monte-Carlo-Methode	44
2.4.3.3	Modellierung der optischen Eigenschaften der Feuer- raumsuspension	45
2.4.4	Berechnungsbeispiele	46
2.4.4.1	Isotherme Strömungsberechnungen	46
2.4.4.2	Wärmeaustauschberechnungen	47
2.5	Literatur	50
3	Zur Auswirkung der Turbulenz in elektrischen Abscheidern (TP A 3) <i>(H. Gross)</i>	53
3.1	Allgemeines	53
3.2	Ein mathematisches Abscheidermodell mit Turbulenzeinfluß	56
3.3	Berechnungen mit dem Diffusionsmodell	59
3.4	Experimentelle Arbeiten	60
3.4.1	Versuchsanlage	60
3.4.2	Auswertung	61
3.4.2.1	Strömungsprofil im Elektroabscheider	61
3.4.2.2	Schubspannung	62
3.4.2.3	Ermittlung von D_{eff}	64
3.4.2.4	Partikelgeschwindigkeit im elektrischen Feld	66
3.5	Schlußfolgerungen	70
3.6	Literatur	71

4 Magnetitschutzschicht in Verdampferrohren von Zwangsdurchlaufkesseln - Riffelrauigkeit (TP B 3)
(B. Pfau) 73

4.1 Einleitung 73

4.2 Experimentelle Untersuchungen zu Riffelrauigkeit und Druckverlust in Rohren 75

4.3 Berechnung des maximal zu erwartenden Widerstandbeiwertes bei Riffelrauigkeit im Rohr. 78

4.4 Vergleich der natürlichen Riffeln mit der Struktur der viskosen Grenzschichtströmung 79

4.5 Entstehungsmechanismus riffelrauer Oberflächen aus strömungstechnischer Sicht 83

4.6 Chemische Gesichtspunkte. 84

4.7 Beurteilung von Schutzschichten 85

4.8 Literatur. 87

5 Energiefreisetzung aus Kernreaktionen in Siedewasserreaktoren (TP A 4)
(W.-D. Erhard, M. Havranek, D. Emendörfer) 91

5.1 Einleitung 91

5.2 Optimierung von Steuer Stabfahrprogrammen bei Siedewasserreaktoranlagen unter dem Aspekt fortgeschrittener Betriebsstrategien .. 92

5.2.1 Betriebsstrategien. 92

5.2.1.1 Steuerstabstellungen. 93

5.2.1.2 Kernbelastung. 94

5.2.1.3 Betriebsrestriktionen. 95

5.2.2 3D-Simulator zur gekoppelten nuklearen und thermohydraulischen Berechnung von Siedewasserreaktoren. 95

5.2.2.1 Nukleares Modell. 95

5.2.2.2 Thermohydraulisches Modell. 96

5.2.3 Bestimmung des Steuerstabfahrprogramms durch lineare Optimierung. 97

5.2.4 Steuerstabfahrprogramme für verschiedene Betriebsstrategien 99

5.2.4.1 Optimierte Steuerstabbilder. 99

5.2.4.2 Auswirkung der Fahrweise mit verschiedenen Ziel-funktionen auf die wärmetechnischen Grenzwerte .. 103

5.2.5 Bewertung der erzielten Ergebnisse. 108

5.3 Berechnung der lokalen Leistungsverteilung in der Umgebung einer Steuerstabspitze. 109

5.3.1 Umkehrung des Homogenisierungsvorgangs. 109

5.3.2 Randbedingungen. 110

5.3.3 Berechnung der Brennstabbelastung beim Ziehen eines Steuerstabs. 111

5.4 Literatur. 113

6 Wärmetransporteigenschaften von Leichtwasserreaktor-Brennstäben**(TP A 5)**

<i>(G. Neuer, R. Brandt, T. Nguyen Minh)</i> . . . . .	.115
6.1 Bedeutung der Wärmetransporteigenschaften . . . . .	.115
6.2 Wärmeleitung . . . . .	.117
6.2.1 Die Wärmeleitfähigkeit von UO_2 - Literaturstudie . . . . .	.117
6.2.1.1 Allgemeines . . . . .	.117
6.2.1.2 Die Wärmeleitfähigkeit von unbestrahltem, stöchiometrischem UO_2 hoher Dichte . . . . .	.118
6.2.1.3 Einfluß der Porosität . . . . .	.120
6.2.1.4 Einfluß des Sauerstoffgehalts . . . . .	.122
6.2.1.5 Einfluß der Bestrahlung . . . . .	.122
6.2.2 Wärmeleitfähigkeit des Hüllmaterials mit Oxidbildung . . . . .	.123
6.2.2.1 Allgemeines . . . . .	.123
6.2.2.2 Meßverfahren . . . . .	.123
6.2.2.3 Probenbeschreibung . . . . .	.124
6.2.2.4 Meßdurchführung . . . . .	.124
6.2.2.5 Meßergebnisse . . . . .	.125
6.3 Wärmeübergangskoeffizient Pellet-Hülle . . . . .	.127
6.3.1 Stand des Wissens und Auswahl des Meßverfahrens . . . . .	.127
6.3.2 Meßprogramm und Probenbeschreibung . . . . .	.129
6.3.3 Meßergebnisse . . . . .	.130
6.3.4 Diskussion der Meßergebnisse . . . . .	.133
6.4 Optische Konstanten von UO_2 . . . . .	.135
6.5 Literatur . . . . .	.137

7 Die photoakustische Infrarot-Laserspektroskopie zur Schadgasanalyse**(TP A 7)**

<i>(K. Stephan, W. Hurdelbrink)</i> . . . . .	.141
7.1 Einführung . . . . .	.141
7.2 Der photoakustische Effekt . . . . .	.142
7.2.1 Allgemeines . . . . .	.142
7.2.2 Versuchseinrichtung . . . . .	.143
7.3 Vergleich Transmission/Photoakustik . . . . .	.144
7.4 Das photoakustische Signal und Störsignale . . . . .	.145
7.5 PA-Signal-Messungen und Nachweisgrenze . . . . .	.147
7.6 Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	.151
7.7 Literatur . . . . .	.152

Endstufenversuchsstand (TP B 2)

(J. Wächter, G. Eyb, R. Maier, J. Messner, W. Moser, R. Pfeiffer, K.-P. Zwiener).

Zwiener)	153
8.1 Einleitung, Zielsetzungen	153
8.2 Versuchsanlage	154
8.3 Strömungs- und Kennfelduntersuchungen	157
8.3.1 Allgemeines	157
8.3.2 Meßtechnik, Meßwerterfassung	157
8.3.3 Stationäre Strömungsmessungen	160
8.3.4 Instationäre Strömungsmessungen	163
8.3.5 Wirkungsgraduntersuchungen	165
8.3.6 Zusammenfassung	168
8.4 Schwingungsuntersuchungen an axialen Turbinenbeschaufelungen	168
8.4.1 Einleitung	168
8.4.2 Allgemeine Betrachtungen zum Schwingungsverhalten von Turbinenbeschaufelungen und zu deren Anregungsbedingungen	169
8.4.3 Versuchsergebnisse von freistehenden Turbinenlaufschaufeln	172
8.4.4 Untersuchung von gekoppelten Niederdrucklaufschaufeln ...	179
8.4.5 Zusammenfassung	182
8.5 Zusammenfassung, Ausblick	183
8.6 Literatur	183

9 Simulation des Kraftwerksblockes zwecks Störfallanalyse und optimaler Störfallbeseitigung (TP C 3/4)

(R. Dolezal, G. Riemenschneider).

9.1 Einleitung	187
9.2 Dynamik einfacher Wärmetauscher	188
9.2.1 Bilanzgleichungen	188
9.2.2 Besonderheiten des Kesselmodells sowie Vor- und Nachteile der analytischen Lösung	188
9.2.3 Die Ersatzfunktion	190
9.2.4 Bestimmung von k bei zwei Strömen	191
9.2.5 Definition der Entkopplung	192
9.2.6 Überprüfung des Simulationsmodells durch Vergleich mit Messungen an einem Einzelwärmetauscher	192
9.2.7 Richtung der Fortpflanzung einer Störung	194
9.2.7.1 Berücksichtigung der Impulsbilanz	194
9.2.7.2 Rechenverfahren „stromabwärts“	195
9.2.7.3 Rechenverfahren „stromaufwärts“	196
9.3 Modell des Dampferzeugers und des Kraftwerksblockes	196

X *Inhaltsverzeichnis*

9.4	Störfallanalyse und ihr Einsatz	197
9.4.1	Die Störfallanalyse.	197
9.4.2	Optimale Behebung des Störfalles.	198
9.4.3	Vergleich der Messung mit der Simulation	201
9.4.3.1	Störfall „Speisepumpenausfall“.	201
9.4.3.2	Durchlaufkessel.	202
9.4.3.3	Trommelkessel.	202
9.5	Zusammenfassung.	205
9.6	Literatur.	205
10	Strukturoptimale Regelung von Kraftwerksblöcken über große Lastbereiche (TP C 5)	
	<i>(E. Welfonder)</i>	207
10.1	Einleitung.	207
10.2	Wirkungsweise und Handhabbarkeit des strukturoptimalen Regelkonzeptes.	208
10.3	Vorgabe eines linearen Prozeßdynamikmodells.	214
10.3.1	Experimentell ermitteltes lineares Prozeßdynamikmodell	217
10.3.2	Einfaches nichtlineares Prozeßdynamikmodell	217
10.3.3	Zeitdiskrete Prozeßzustandsbetrachtung	220
10.4	Entwurf des strukturoptimalen Mehrgrößenregelkonzeptes.	221
10.4.1	Regelkonzept bezüglich Anfangswertstörungen	223
10.4.2	Regelkonzept bezüglich sprungförmiger Führungsgrößenänderungen.	224
10.4.3	Regelkonzept bezüglich sprungförmiger Störgrößen	226
10.4.4	Regelkonzept bezüglich dynamischer Führungsgrößenänderungen.	226
10.4.5	Auslegung des Prozeßbeobachters.	230
10.4.6	Überlagerte Integralregelung	233
10.4.7	Ausdehnung des strukturoptimalen Regelkonzeptes auf große Lastbereiche.	233
10.5	Realisierung der strukturoptimalen Mehrgrößenregelung	237
10.5.1	Realisierung des strukturoptimalen Regelkonzeptes mittels Prozeß-/Mikrorechners.	237
10.5.2	Realisierung des strukturoptimalen Regelkonzeptes mittels digitaler Leittechniksysteme.	238
10.5.3	Zuverlässigkeit des realisierten strukturoptimalen Regelkonzeptes.	240
10.6	Zusammenfassung.	241
10.7	Literatur.	242
A	Dokumentarischer Anhang	245