



Thomas Zöller (Autor)  
**Aktive Dämpfung von Torsionsschwingungen in  
Wellensträngen von Kraftwerksturbosätzen**

Thomas Zöller

**Aktive Dämpfung von Torsions-  
schwingungen in Wellensträngen  
von Kraftwerksturbosätzen**



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/437>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Inhalt

1	Einleitung . . . . .	1
1.1	Problemstellung . . . . .	2
1.2	Motivation und Ziele . . . . .	3
2	Torsionsschwingungen . . . . .	5
2.1	Messung von Torsionsschwingungen . . . . .	5
2.2	Torsionsschwingungen in Antriebssystemen . . . . .	7
2.2.1	Produktionsmaschinen . . . . .	7
2.2.2	Fahrzeuge . . . . .	8
2.2.3	Multimegawatt-Antriebe . . . . .	10
2.3	Torsionsschwingungen in Turbosätzen . . . . .	11
2.3.1	Der Turbosatz . . . . .	12
2.3.2	Periodische Torsionsschwingungsanregungen . . . . .	13
2.3.3	Kurzzeitige Torsionsschwingungsanregungen . . . . .	16
2.4	Auswirkungen von Torsionsschwingungen . . . . .	18
2.5	Lösungsansätze zur Torsionsproblematik . . . . .	20
2.5.1	Vermeidung und Dämpfung von Torsionsschwingungen . . . . .	20
2.5.2	Erfassung und Bewertung von Torsionsschwingungen . . . . .	22
3	Aktive Dämpfung von Torsionsschwingungen . . . . .	23
3.1	Stellgrößen zur Torsionsschwingungsdämpfung am Turbosatz . . . . .	23
3.2	Einbringung der Stellgröße . . . . .	25
3.3	Gesamtsystemkonzept zur Torsionsschwingungsdämpfung . . . . .	26
3.4	Dämpfungssystem für Schwungradgeneratoren . . . . .	27
3.4.1	Ursache der Torsionsschwingungen . . . . .	28
3.4.2	Aktives Dämpfungssystem am IPP . . . . .	29
3.4.3	Grundlegende Unterschiede der Dämpfungskonzepte . . . . .	30
4	Versuchsanlage zur Untersuchung eines aktiven Dämpfungssystems . . . . .	33
4.1	Dimensionierung der Versuchsanlage . . . . .	34
4.2	Mechanischer Aufbau . . . . .	35
4.2.1	Fundamentierung . . . . .	35
4.2.2	Aufbauten . . . . .	36

4.3	Elektrische Maschinen . . . . .	39
4.3.1	Synchrongenerator . . . . .	39
4.3.2	Antriebsmaschine . . . . .	39
4.4	Transformatornachbildung und Serienkompensation . . . . .	40
4.5	Dämpfungsstromrichter . . . . .	41
4.6	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik . . . . .	42
4.6.1	Messsysteme . . . . .	42
4.6.2	Regelsysteme und deren Plattformen . . . . .	45
4.6.3	Steuerung des Versuchsstandes . . . . .	48
4.6.4	Kommunikationssysteme . . . . .	48
4.6.5	Schutz- und Sicherheitssysteme. . . . .	50
5	Physikalische Modellbildung. . . . .	53
5.1	Turbinen- und Wellensystem . . . . .	53
5.1.1	Berechnung der Eigenfrequenzen . . . . .	55
5.1.2	Modellierung der Dämpfung. . . . .	55
5.1.3	Identifikation des Versuchsstandes: Mechanisches System . . . . .	57
5.2	Generator . . . . .	61
5.2.1	Gleichungen zur Beschreibung eines Synchrongenerators . . . . .	61
5.2.2	Leistungsbilanz der Synchronmaschine . . . . .	63
5.2.3	Frequenzabhängigkeit der Generatorreaktanzen . . . . .	63
5.2.4	Inversreaktanz . . . . .	65
5.2.5	Identifikation des Versuchsstandes: Generator . . . . .	66
5.3	Elektromechanisches Gesamtsystem . . . . .	67
5.3.1	Transientes synchronisierendes Moment . . . . .	67
5.3.2	Identifikation des Versuchsstandes: Elektromechanische Kopplung . . . . .	70
6	Stromrichter zur Dämpfung von Torsionsschwingungen. . . . .	73
6.1	Netzgeführte Stromrichter mit induktivem Energiespeicher. . . . .	74
6.1.1	Schwachstellen der Sechspulsbrücke . . . . .	76
6.2	Selbstgeführte Stromrichter mit kapazitivem Energiespeicher . . . . .	78
6.2.1	Aufbau. . . . .	78
6.2.2	Regelung der Drehstrombrücke. . . . .	79
6.2.3	Messergebnisse des Dämpfungsstromrichters am Versuchsstand . . . . .	83
7	Regelkonzepte zur aktiven Dämpfung von Torsionsschwingungen . . . . .	87
7.1	Dämpfungsregelung . . . . .	87
7.1.1	Regelstrecke . . . . .	88
7.1.2	Resonanzregler . . . . .	89

7.1.3	Resonanzregler mit Bandpassfilterung . . . . .	92
7.1.4	Resonanzregler mit Kalman-Filter. . . . .	94
7.1.5	Linearer Quadratischer Gaußscher Regulator . . . . .	97
7.1.6	$H_\infty$ -Regler . . . . .	106
7.1.7	Vergleich der entworfenen Regler . . . . .	106
7.1.8	Anwendung des LQG-Regulators am First Benchmark Model	108
7.2	M/P-Regelung . . . . .	110
7.2.1	Theoretische Betrachtung der Leistungsaufteilung . . . . .	112
7.2.2	Messtechnische Analyse der Leistungsaufteilung . . . . .	115
7.2.3	Kopplung Generatorleistung und Maschinenmoment . . . . .	118
7.2.4	Schlussfolgerungen zur M/P-Regelung . . . . .	119
8	Einsatz des Dämpfungssystems am Versuchsstand . . . . .	121
8.1	Dämpfung von periodischen Störanregungen am Versuchsstand . . . . .	121
8.1.1	Bestehende Torsionsschwingungen. . . . .	122
8.1.2	Frequenzvariable Störanregung. . . . .	124
8.1.3	Subsynchroner Resonanzen . . . . .	125
8.2	Dämpfung von transienten Störanregungen am Versuchsstand. . . . .	129
8.2.1	Lastsprünge . . . . .	129
8.2.2	Fehlsynchronisationen. . . . .	132
9	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	135
9.1	Zusammenfassung . . . . .	135
9.2	Ausblick . . . . .	137
A	Koordinatentransformationen . . . . .	139
A.1	Mathematische Beschreibung. . . . .	139
A.2	Technische Interpretation . . . . .	140
B	First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonances . . . . .	143
C	Modellparameter Synchrongenerator . . . . .	145
	Abbildungen . . . . .	147
	Tabellen . . . . .	151
	Literaturverzeichnis. . . . .	153
	Abkürzungen und Formelzeichen . . . . .	163