

# Kapitel 1

## Einleitung

Mit der Entdeckung der elektromagnetischen Induktion durch Michael Faraday im Jahre 1831 und der darauf folgenden Erfindung der ersten Generatoren war es zu Beginn des 19. Jahrhunderts erstmals möglich, mechanische in elektrische Energie zu wandeln. Weitere Entdeckungen und Erfindungen, wie zum Beispiel von Werner von Siemens (dynamoelektrisches Prinzip, 1866) oder Friedrich August Haselwander (erster Drehstromgenerator, 1887), beschleunigten die aufkommende Industrialisierung erheblich und führten schließlich zum Aufbau einer flächendeckenden elektrischen Energieversorgung. Diese bildet das Rückgrat unserer heutigen Industrie- und Kommunikationsgesellschaft. Mit Ausnahme der Photovoltaik bleibt die Notwendigkeit der Wandlung von mechanischer in elektrische Energie auch beim Einsatz von regenerativen Energiequellen bestehen (z.B. Wind- und Wasserkraft) und somit wird auch zukünftig der Generator das Herzstück der Energieerzeugungskette bilden.

Der weitaus überwiegende Teil (84,7 %, 2008) der elektrischen Energie wird heutzutage in großen thermischen Kraftwerken erzeugt. Die Dampferzeugung kann dabei chemisch (Kohle, Öl, Gas), nuklear oder regenerativ (Biomasse, Solar- und Geothermie) erfolgen. Unabhängig davon erfolgt im Anschluss mit Hilfe von Turbinen die Umwandlung der im Dampf gespeicherten Energie in mechanische Rotationsenergie, welche schließlich durch den Generator in elektrische Energie transformiert wird. Dampfturbinen und Generator bilden gemeinsam den sogenannten Turbosatz.

Der Generator ist dabei nicht nur die Nahtstelle zweier Energieformen, sondern auch der Schnittpunkt der Ingenieurdisziplinen Maschinenbau und Elektrotechnik. Aufgrund der gegenseitigen Kopplung des mechanischen und elektrischen (Teil-) Systems ist eine klare Trennung der Disziplinen in diesem Bereich nicht möglich. Zahlreiche Kopplungsmechanismen und Effekte verlangen stets eine Betrachtung des elektromechanischen Gesamtsystems. Einer dieser Effekte sind Torsionsschwingungen des Wellensystems von Kraftwerksturbosätzen. Mit deren Auftreten, den Auswirkungen und der möglichen Dämpfung beschäftigt sich diese Arbeit.

## 1.1 Problemstellung

Bei Torsionsschwingungen handelt es sich um mechanische Drehschwingungen in Wellen. Prinzipiell entstehen diese immer, sobald rotierende Massen über eine Welle miteinander gekoppelt werden. Die Trägheitsmomente der Massen sowie die Steifigkeit der Wellen bilden ein mechanisches Schwingungssystem. Das Schwingungsverhalten und die damit unter Umständen verknüpften Probleme hängen maßgeblich von der vorhandenen mechanischen Eigendämpfung ab. Diese Eigendämpfung ist in vielen Antriebssträngen und Wellensystemen sehr gering.

So sind Torsionsschwingungen in Wellensystemen von Produktionsmaschinen, wie zum Beispiel zur Folienherstellung oder in Druckmaschinen, aber auch in Antriebsystemen (Automobil), unerwünschte Phänomene, die die Produktqualität oder das Leistungsvermögen der Anlage negativ beeinflussen. Auch die Struktur eines Kraftwerksturbosatzes birgt eine erhebliche Anfälligkeit gegenüber Torsionsschwingungen in sich. Dies liegt vor allem im ausgedehnten Wellen-Massen-System, in den hohen Steifigkeiten und in den großen Trägheitsmomenten begründet.

Die prinzipielle Anregung von Torsionsschwingungen erfolgt dabei stets nach dem selben Ablauf. Nach einer Störung des Momentengleichgewichts am Wellenstrang, also der Summe der Antriebs- und Abtriebsmomente, führt dieser einen mechanischen Ausgleichsvorgang aus, der mit einer Schwingung der Wellenmomente einhergeht. Der Ausgleichsvorgang dauert solange, bis sich ein neues stationäres Gleichgewicht gefunden hat. Das Spektrum der Störanregung entscheidet dabei zusammen mit den mechanischen Eigenschaften des Systems über die Höhe der auftretenden Wellenmomente.

Bei Turbosätzen von Kraftwerken können eine Vielzahl von Ereignissen zu einer Anregung von Torsionsschwingungen führen. Dabei sind grundsätzlich zwei Anregungsarten zu unterscheiden. Zum Einen sind dies Anregungen, die von der mechanischen Seite des Gesamtsystems ausgehen. Diese können z.B. durch einen Störfall im Dampferzeugungssystem des Kraftwerkes verursacht werden. Zum Anderen ist die Mehrzahl der Schwingungsauslöser auf der elektrischen Seite zu suchen. Jeder Störfall im elektrischen Energienetz, in dessen Folge es zu einer Lastschwankung am Generator kommt, führt zu einer Torsionsschwingungsanregung am Turbosatz. Mögliche Störfälle sind u.a. Klemmenkurzschlüsse, automatische Wiedereinschaltungen nach Netzkurzschlüssen, Schalthandlungen im Netz mit Fehlsynchronisationen oder Lastabwürfe. Die genannten Störungen stellen allesamt transiente Anregungsfälle des Turbosatzes dar. Darüber hinaus bilden periodische Anregungen ein erhebliches Gefährdungspotential für den Turbosatz. In diesen Fällen können die anregenden Störleistungen sehr gering sein. Sobald diese aber Frequenzanteile im Bereich einer oder mehrerer Eigenfrequenzen des Wellenstranges beinhalten, führt dies zu einem starken Ansteigen der Torsionsschwingungsamplitude. Man spricht

hierbei von *Subsynchronen Schwingungen* (Subsynchronous Oscillations, SSO). In Extremfällen können so innerhalb von Sekunden kritische Materialgrenzwerte überschritten werden. Die Höhe der angeregten Torsionsschwingungsmomente ist von der Art des Fehlerfalls, der räumlichen Distanz der Störung zum Turbogenerator, der Störungsdauer, dem Lastzustand des Generators vor Fehlereintritt sowie letztendlich vom Aufbau des Turbosatzes abhängig.

## 1.2 Motivation und Ziele

Eine Torsionsbeanspruchung führt nicht nur zu einer zunehmenden Materialermüdung der Welle, sondern belastet auch noch weitere Teile des Turbosatzes, wie z.B. die Schaufeln und die Kupplungen. Torsionsschwingungen bilden also ein erhebliches Gefährdungspotential für einen sicheren Betrieb des Turbosatzes und damit des gesamten Kraftwerkes. Die Torsionsproblematik spielt daher eine wesentliche Rolle bei der Auslegung, der Konstruktion sowie beim Betrieb eines Turbosatzes.

In den letzten Jahrzehnten wurden Torsionserfassungsgeräte entwickelt, deren Aufgabe es ist, gemessene Torsionsschwingungen zu bewerten und Aussagen über den Beanspruchungsgrad eines Turbosatzes zu treffen. Der nächste Entwicklungsschritt zur weiteren Optimierung eines Turbosatzes in Bezug auf Torsionsschwingungen liegt in der aktiven Dämpfung derselben. Hierbei wird im Gegensatz zur rein mechanischen (passiven) Dämpfung aktiv auf den Turbosatz eingewirkt. Durch den Einsatz eines aktiven Dämpfungssystems kann die Materialermüdung am Turbosatz deutlich reduziert werden. Somit könnten zukünftig Revisionsintervalle verlängert und damit Betriebskosten reduziert werden. Geht man noch einen Schritt weiter, ist eine kostengünstigere Konstruktion des Turbosatzes vorstellbar. Auch ein auftretender Störfall, bei dem der Turbosatz aufgrund von Torsionsschwingungsinteraktion abgeschaltet werden müsste, könnte mit Hilfe eines aktiven Dämpfungssystems ohne Abschaltung beherrscht werden.

Derzeit existieren keinerlei aktive Dämpfungssysteme für Torsionsschwingungen an Turbosätzen auf dem weltweiten Markt. Ein aktives Dämpfungssystem wurde im Jahre 2002 am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching für einen experimentellen Schwungradgenerator entwickelt. Notwendig wurde dies, als es aufgrund von Rückwirkungen des dortigen Plasmaexperiments zu erheblichen Torsionsschwingungen und damit zu Kupplungsschäden am Generator kam. Dieses System bildet den Ausgangspunkt der vorliegenden Forschungsarbeit, deren Ziel ist es, die mögliche Übertragbarkeit dieses speziellen Dämpfungssystems für Schwungradgeneratoren auf Turbosätze von Kraftwerken zu untersuchen und auf dieser Basis ein System zur aktiven Torsionsschwingungsdämpfung weiter zu entwickeln. Die Hauptunterscheidungsmerkmale der beiden Systeme sind das wesentlich komplexere Massensystem, die veränderten Anregungsmechanismen und die Netzanbindung

des Turbosatzes. Die Untersuchungen erfolgen in dieser Arbeit sowohl mit Hilfe von Computersimulationen als auch experimentell. Dazu war es notwendig, einen entsprechenden Modellturbosatz auszulegen und aufzubauen.

Die folgende Abhandlung beschäftigt sich zuallererst in Kapitel 2 mit Torsionsschwingungen im Allgemeinen. Neben den verschiedenen Methoden zu deren Messung werden insbesondere die Anregungsmechanismen und die Auswirkungen von Torsionsschwingungen in Antriebssystemen und in Turbosätzen diskutiert sowie die bisherigen Lösungsansätze vorgestellt.

Im Anschluss wird in Kapitel 3 die grundlegende Konzeption des Systems zur aktiven Dämpfung von Torsionsschwingungen behandelt. Dabei erfolgt auch eine Analyse des ursprünglichen Dämpfungssystems für Schwungradgeneratoren.

Kapitel 4 stellt die konzipierte und aufgebaute Versuchsanlage vor, mit deren Hilfe das Dämpfungssystem unter sehr realen Bedingungen validiert und getestet werden kann.

Im nächsten Kapitel erfolgt die physikalische Modellbildung des Gesamtsystems, das sich aus den mechanischen und den elektrischen Komponenten zusammensetzt. Dies beinhaltet auch eine Analyse der elektromechanischen Kopplungsmechanismen.

Eine Diskussion über mögliche Stromrichter, die zur Torsionsschwingungsdämpfung eingesetzt werden können, wird in Kapitel 6 geführt. Dazu werden u.a. Simulations- und Messergebnisse präsentiert.

Kapitel 7 beschäftigt sich mit den Regelkonzepten zur Torsionsschwingungsdämpfung. Grundlage der Reglersynthese ist die in Kapitel 5 erfolgte physikalische Modellbildung.

Über die Erfahrungen mit dem Betrieb des Dämpfungssystems am Versuchsstand berichtet Kapitel 8.

Das letzte Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der Arbeit ab und gibt einen Einblick in die noch offenen Fragestellungen bezüglich des Einsatzes einer aktiven Dämpfung von Torsionsschwingungen in Kraftwerksturbosätzen.