

Mit Sicherheit bessere Maschinen bauen

KONSTRUKTEURE MÜSSEN RISIKEN SCHON BEI DER PLANUNG VERMEIDEN

In technischen Systemen können Gefahren lauern. In der Maschinenbauforschung geht es deshalb auch darum, Maschinen sicherer zu konstruieren. Am Institut für Mechanik wurde ein Verfahren entwickelt, das spezielle Schäden bei Turbomaschinen vermeiden hilft.

1. Sicherheit in der Technik – Sicherheitstechnik

Der Begriff »Sicherheit« ist im Zusammenhang mit Technik äußerst vielschichtig. Daher soll im Folgenden – bevor exemplarisch ein sicherheitsrelevantes Bauteil untersucht wird – auf Begriffliches eingegangen werden.

Umgangssprachlich versteht man unter Sicherheit objektiv das Nichtvorhandensein von Gefahr und subjektiv die Gewissheit, vor Gefahren geschützt zu sein. In technischen Systemen können jedoch stets Gefahren lauern.

Deshalb kennen wir aus dem Alltag eine Reihe von Sicherheitseinrichtungen wie Sicherheitsschuhe an bestimmten Arbeitsplätzen oder Sicherheitsgurte im Auto, die uns individuell schützen und vor Schaden bewahren sollen. Wir kennen Schmelzsicherungen und Sicherungsautomaten, die einen elektrischen Stromkreis bei Kurzschluss oder Überlastung abschalten, damit Leitungen und Geräte nicht zu heiß werden und einen Brand auslösen. Zu den Schutzeinrichtungen gehört auch das Sicherheitsventil an einem Druckbehälter, das beim Erreichen eines vorgegebenen Druckes öffnet, um einen weiteren Druckanstieg und das mögliche Bersten zu vermeiden.

Aus dem Alltag kennen wir natürlich auch vielfältige Sicherheitsvorschriften und -hinweise, deren Anzahl im

Zusammenhang mit der Produkthaftung drastisch zugenommen hat.

Diese Sicherheitshinweise lösen allerdings keine Sicherheitsprobleme.

Wer Maschinen baut, sollte mit dem »Stand der Technik« und den allgemeinen Grundregeln der Gestaltung vertraut sein, wonach **Funktionalität, Einfachheit und Sicherheit** einer Konstruktion erfüllt sein müssen. Dabei bezieht sich die Sicherheit auf Haltbarkeit, Zuverlässigkeit, Unfallfreiheit und Umweltschutz, die bei der Gestaltung gleichzeitig und gemeinsam, also *unmittelbar* erfasst werden sollen.

Zur sicherheitsgerechten Gestaltung bestehen allgemeine Regeln (vgl. [1], [2]), danach unterscheidet man zwischen *unmittelbarer, mittelbarer* und *hinweisender* Sicherheitstechnik.

Grundsätzlich wird die *unmittelbare* Sicherheit angestrebt, bei der von vornherein und aus sich selbst heraus keine Gefährdung besteht. Dann folgt die *mittelbare* Sicherheit mit dem Aufbau von Schutzsystemen und der Einbeziehung von Schutzeinrichtungen. Die *hinweisende* Sicherheitstechnik kann nur vor Gefahren warnen und den Gefährdungsbereich kenntlich machen.

Sicherheit und Verbraucherschutz sind auch Gegenstand der europaweit einheitlichen Maschinenrichtlinie [3], die vor etwa zehn Jahren in nationales Recht umgesetzt wurde.

In der Maschinenrichtlinie – deren Anhang I zum Handwerkszeug jedes Maschinenbauers gehören sollte – finden sich grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen zu Konzipierung und Bau von Maschinen. Dort wird auch auf Gefahren hingewiesen sowie auf Schutzmaßnahmen und -maßnahmen eingegangen.

Die *Sicherheitstechnik* in dem vorgenannten Sinn befasst sich allgemein mit den Risiken, die beim Umgang mit der Technik auftreten und denen der Mensch und seine Umwelt ausgesetzt sind.

Dabei geht es zum einen um technische Maßnahmen zur Erhöhung der Betriebssicherheit und Lebensdauer von Maschinen und Anlagen. Dieser Aspekt durchzieht alle Bereiche des konstruktiven Maschinenbaus und fließt bereits in die Grundausbildung aller Maschinenbau-Studierenden ein.

Zum anderen ist die Anwendung von Erkenntnissen zur Vermeidung von Unfällen und Berufskrankheiten sowie zum Schutz der Umwelt vor den Auswirkungen der Technik wichtig. Dieser Sachverhalt findet seinen Niederschlag in nationalen und internationalen Vorschriften, Richtlinien, Regeln, Standards

und Gesetzen, deren Einhaltung durch spezielle Organisationen, zum Beispiel Technische Überwachungsvereine, überprüft und in Betrieben mit mindestens 20 Beschäftigten durch speziell geschulte Sicherheitsbeauftragte und Sicherheitsingenieure überwacht werden.

Sondergebiete der Sicherheitstechnik wie Arbeitssicherheit, Verkehrssicherheit, Brand- und Explosionsschutz und Technischer Umweltschutz

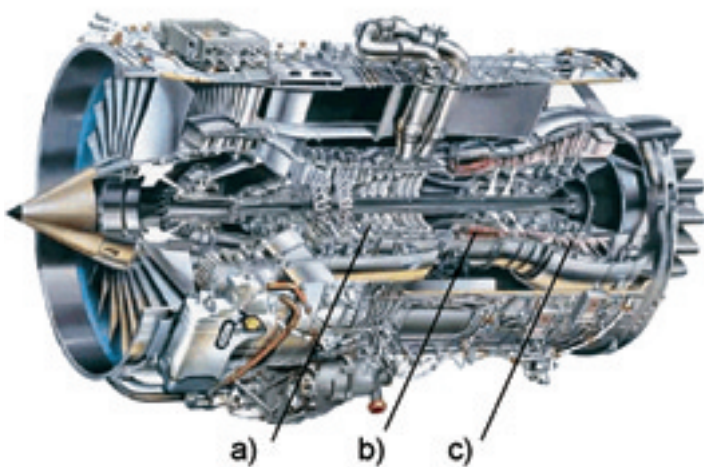
änderung Kräfte auftreten, die letztlich die Maschine in eine Drehbewegung versetzen (Turbine) oder mit denen umgekehrt die Drehbewegung eine Strömungsumlenkung mit einer damit verbundenen Druckerhöhung des Fluids bewirkt (Verdichter).

Es soll hier weniger auf die verschiedenen Bauformen von Maschinen als vielmehr auf die möglichen Schäden eingegangen werden. Diese Schäden entstehen durch den

übereinstimmt, nur durch die vorhandene Dämpfung begrenzt. Unvermeidliche Schaufelbewegungen werden unter anderem durch die Brennkammer und den Leitapparat verursacht.

Bei Turbomaschinen mit variabler Drehzahl, wie beispielsweise Flugtriebwerke, lassen sich Resonanzen praktisch nicht vermeiden. Wenn alle ungünstigen Einflüsse gleichzeitig auftreten, kann es zum Schaufelbruch kommen.

Abbildung 1 (links) Flugtriebwerk mit a) Verdichter, b) Brennkammer und c) Turbine.
Quelle: www.rolls-royce.de © Rolls-Royce 2003



schutz (vgl. [4]) verdeutlichen die Breite und gleichzeitig die gesellschaftliche Relevanz dieser Disziplin.

2. Aus Schaden wird man klug

Im Folgenden wird exemplarisch eine bestimmte Maschine herausgegriffen und ein sicherheitsrelevantes Bauteil betrachtet.

Wir wählen eine Turbomaschine, das heißt eine Turbine oder einen Verdichter oder eine Kombination aus beiden, wie sie zum Beispiel in einem Flugtriebwerk gegeben ist (vgl. Abbildung 1).

Die für die Funktion einer solchen Maschine zentralen Bauteile sind Schaufeln, mit deren Hilfe die Strömung umgelenkt wird und infolge der damit verbundenen Impuls-

Bruch der Schaufeln infolge von zu hohen mechanischen Spannungen im Material, vgl. Abbildung 2.

Laut Allianzreport für Risiko und Sicherheit [5] verursachen Schaufelschäden 39 Prozent der schadensbedingten Instandsetzungskosten bei Gasturbinen.

Die überhöhten Spannungen kommen einerseits durch die geminderte Materialfestigkeit infolge der hohen Temperaturen und andererseits durch die statischen Spannungen infolge der hohen Fliehkräfte, die proportional zum Quadrat der Drehzahl sind, gepaart mit dynamischen Spannungen infolge der Schwingbewegungen der Schaufeln zustande. Die Schwingungsamplituden werden im Resonanzfall, wenn eine Eigenfrequenz der Schaufeln mit einer Erregerfrequenz

Die einzige Möglichkeit, dies zu vermeiden, besteht in zusätzlichen Dämpfungsmaßnahmen wie geteilten Deckbändern, Reibelementen oder Dämpferdrähten, vgl. Abbildungen 3a)–c).

Im Folgenden soll lediglich die Reibungswirkung der in Abbildung 3b) gezeigten Reibelemente betrachtet werden.

Diese Art der zusätzlichen Dämpfungselemente wurde in den letzten Jahren am Institut für Mechanik der Universität Hannover theoretisch und experimentell untersucht, so dass heute zuverlässige Auslegungs- und Optimierungsprogramme zur Verfügung stehen.

Abbildung 2 (rechts) Schaufelschaden durch Schwingungsbruch
Quelle: Allianzreport für Risiko und Sicherheit 2/98, S. 98

3. Reibungsdämpfer zur Erhöhung der Sicherheit von Turbomaschinen

In vielen Dampf- und Gasturbinen werden heute erfolgreich Dämpfelemente eingesetzt, um Schwingungsamplituden zu reduzieren und somit das Risiko eines Schau-

Der Konstrukteur steht nun vor der Fragestellung des optimalen Designs eines solchen Reibelements für die konkrete Anwendung.

Das Ziel muss lauten, eine möglichst dämpfungsoptimale Auslegung zu finden, mit der ein Maximum an Amplitudenreduktion erreicht wird.

der Schwingungsamplitude. Die offensichtlich sehr viel größere Dämpfung bewirkt in realen Turbinenbeschauelungen mit einer periodischen Anregung der Schaufeln eine merkliche Abnahme der Schwingungsamplituden bei sonst unveränderten Bedingungen.

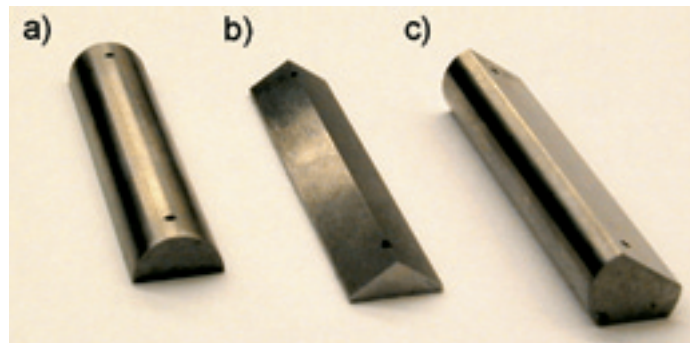
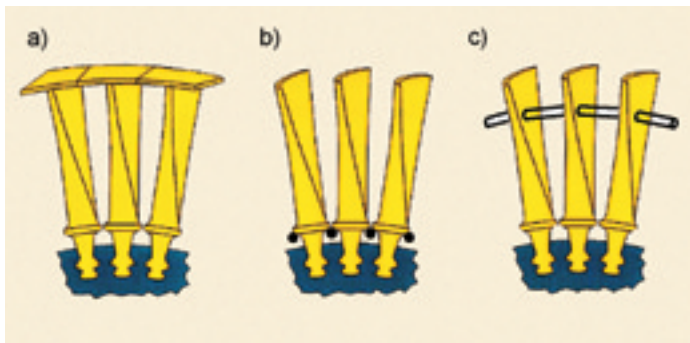


Abbildung 3 (links)
Konstruktive Dämpfungsmaßnahmen an Turbinenschaufeln:
a) Deckband
b) Reibelemente
c) Dämpferdraht

Abbildung 4 (rechts)
Reibelementbauformen:
a) zylinderförmiges Reibelement
b) keilförmiges Reibelement
c) asymmetrisches Reibelement

felschadens deutlich zu mindern. Das Prinzip ist einfach: Werden die Schaufeln in Schwingungen versetzt, kommt es in den Kontaktzonen zwischen den Schaufeln und den durch Fliehkräfte an die Schaufelfußplatten gepressten Reibelementen zu Relativbewegungen und trockener Reibung. Die hierbei stattfindende Umsetzung von Bewegungs- in Wärmeenergie führt letztlich zu geringeren Schwingungsamplituden der Schaufeln.

Die daraus resultierenden Vorteile sind vielfältig: Kosten für Wartung und Instandhaltung werden herabgesetzt, es lassen sich leichtere, effizientere Schaufeln bauen und das Risiko eines Schwingungsbruches einer Schaufel mit den daraus resultierenden Folgen wird deutlich gemindert, so dass vor allem die Betriebssicherheit enorm erhöht wird.

In der praktischen Anwendung kommen verschiedenste Reibelementbauformen zum Einsatz. Einige typische Reibelementgeometrien sind in Abbildung 4 dargestellt.

Um diese Frage zu beantworten, wurden am Institut für Mechanik sowohl experimentelle als auch numerische Untersuchungen durchgeführt.

Abbildung 5 zeigt einen Versuchsstand, bestehend aus zwei vereinfachten Turbinenschaufeln, die über ein Reibelement gekoppelt sind.

Mit Hilfe eines Schwingerregers oder eines Impulshammers werden die Schaufeln zu Schwingungen angeregt und die Schwingungsamplituden mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern aufgezeichnet und analysiert.

Aus der in Abbildung 6 dargestellten Schwingungsantwort auf eine Impulshammeranregung mit und ohne Reibelement lässt sich sehr deutlich der Einfluss der Reibungsdämpfung erkennen:

Ohne Reibelement klingt eine durch den Impuls angeregte Schwingung aufgrund der geringen Materialdämpfung nur sehr langsam exponentiell ab.

Werden die Schaufeln über ein Reibelement gekoppelt, bewirkt die Reibung zwischen den Schaufelfußplatten und dem Reibelement ein sehr schnelles lineares Abklingen

In weiteren Versuchsständen werden sowohl die Wirkungsweise der Reibelemente in einem praxisnahen, periodisch fremderregten, rotierenden Schaufelkranz bestehend aus 30 Schaufeln untersucht als auch die in Abbildung 3a) dargestellten geteilten Deckbänder als Dämpfungsmaßnahme experimentell analysiert.

Neben den aus Experimenten gewonnenen Erkenntnissen, die Aufschluss über die Wirkungsweise der Reibungsdämpfer geben, ist es für den Konstrukteur von entscheidender Bedeutung, schon im Entwicklungsprozess mit Hilfe von Simulationen eine Optimierung der Reibelemente vornehmen zu können.

Dies erfordert problemangepasste theoretische Modelle, die dem nichtlinearen Phänomen der Reibung ausreichend genau Rechnung tragen.

Diese Modelle wurden am Institut für Mechanik über viele Jahre entwickelt, an experimentellen Ergebnissen validiert und in entsprechenden Softwaretools implementiert (siehe [6]–[8]).

Diese Softwaretools müssen sich durch möglichst schnelle Berechnungsalgorithmen auszeichnen, die den Entwick-

lungingenieur in die Lage versetzen, Parameterstudien zur Optimierung konstruktiver Details in kurzer Zeit durchzuführen.

Die a-priori-Kenntnis des Einflusses verschiedener Para-

Ein typisches Ergebnis einer solchen Optimierungsrechnung zeigt Abbildung 8, in der die Schwingungsamplituden über der Erregerfrequenz (äquivalent zur Drehzahl der Turbine) für verschiedene

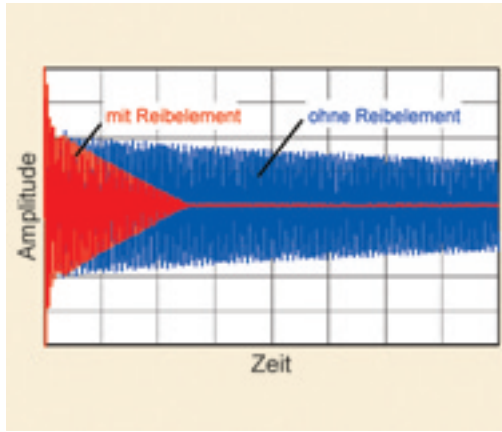
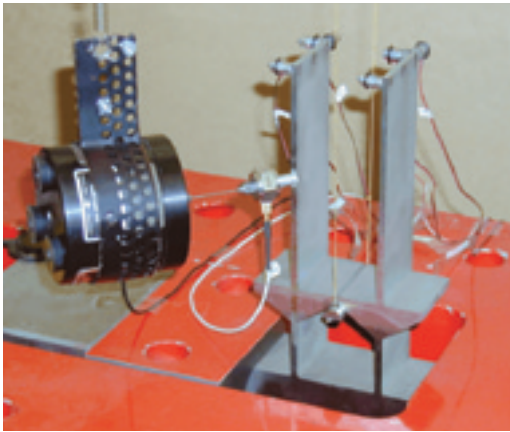


Abbildung 5
Versuchsstand mit zwei Schaufeln und einem Reibelement

Abbildung 6
Ausschwingversuch mit (rot) und ohne (blau) Reibelement

meter auf das Dämpfungsverhalten führt dazu, die zum Teil sehr komplexen Reibungsphänomene besser zu verstehen, Kosten für aufwändige experimentelle Untersuchungen zu reduzieren und eine deutlich bessere Auslegung der Reibelemente im Sinne einer Reduktion der Schwingungsamplituden zu erzielen.

Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Einbettung des am Institut für Mechanik entwickelten Programmsystems DATUR (Daempfung von Turbinenschaufeln mit Reibelementen) in die Gesamtauslegung einer Turbinenbeschaufelung, wie sie in der Industrie vorgenommen wird.

Mit Hilfe dieses Programmsystems kann eine Vielzahl praxisrelevanter Schwingungsprobleme mit Reibung bei Turbinenschaufeln sehr effizient berechnet werden.

Massen der Reibelemente dargestellt sind (vgl. [9]).

Man erkennt, dass zwischen den beiden Grenzfällen der Schaufeln ohne Reibelemente und mit sehr schweren Reibelementen offenbar eine optimale Masse zu finden ist, bei der die Reibelemente eine ganz erhebliche zusätzliche Dämpfung bewirken und die Schwingungsamplituden minimal werden. Dieses Optimum gilt es für den Entwicklungsingenieur zu finden!

Vor dem Hintergrund der Bestrebungen nach immer höherem Wirkungsgrad und steigender Effizienz bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit und Sicherheit von hochbelasteten Maschinenteilen wie Turbinenschaufeln kann die optimale Ausnutzung des in der Reibungsdämpfung vorhandenen Potenzials weitere Fortschritte bringen.

Die bestehenden Theorien und Softwaretools werden stetig weiterentwickelt und verfeinert und leisten für die Sicherheit zukünftiger Maschinen einen wertvollen Beitrag.

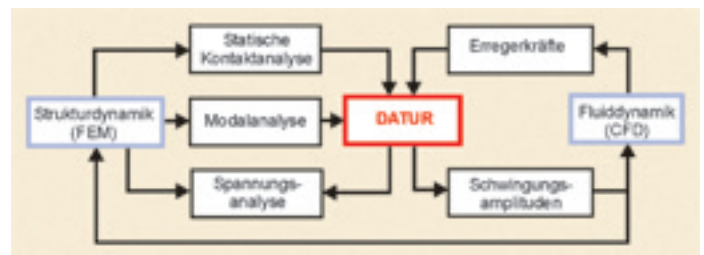


Abbildung 7
Auslegungsrechnung mit Hilfe von DATUR

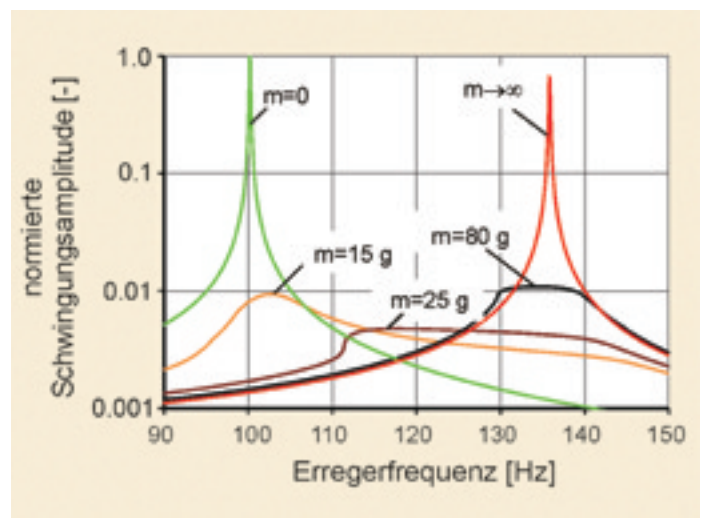


Abbildung 8
Reduktion der Schwingungsamplitude durch Optimierung



Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Popp
Jahrgang 1942, ist Geschäftsführender Leiter des Instituts für Mechanik und Leiter des Bereiches Dynamik.



Dr.-Ing. habil. Walter Sextro
Jahrgang 1962, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter Schwingungstechnik am Institut für Mechanik.

Zitierte Literatur

- 1 DIN 31000 Sicherheitstechnisches Gestalten technischer Erzeugnisse; Allgemeine Leitsätze.
- 2 Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau. 16. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 1987, S. F 17.
- 3 Austermann, R.: Maschinenrichtlinie. Vogel-Verlag, Würzburg, 1997.
- 4 Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal, Fachbereich Sicherheitstechnik: www.uni-wuppertal.de.
- 5 Allianzreport für Risiko und Sicherheit, Ausgabe 2/99, S.110.
- 6 Balmer, B.: Erhöhung der Dämpfung von Turbinenschaufeln durch Reibelemente. Diss. Universität Hannover. Fortschrittberichte VDI-Reihe 11, Nr. 197, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- 7 Treyde, T.: Modellierung des Kontaktes zwischen den Deckplatten von Turbinenschaufeln. Diss. Universität Hannover. Fortschrittberichte VDI-Reihe 11, Nr. 224, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- 8 Sextro, W.: Schwingungsverhalten von Schaufelkränzen mit Reibelementen bei Frequenzverstimung. Diss. Universität Hannover. Fortschrittberichte VDI-Reihe 11, Nr. 245, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- 9 Sextro, W.; Panning, L.; Götting, F.; Popp, K.: Fast Calculation of the Statistics of the Forced Response of Mistuned Bladed Disk Assemblies with Friction Contacts. ASME paper GT-2002-30427, Int. Gas Turbine & Aeroeng. Congress and Exh., Amsterdam, 2002.



Dipl.-Ing. Lars Panning
Jahrgang 1970, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanik.



Dipl.-Ing. Florian Götting
Jahrgang 1974, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanik.