

Frank Kameier

Aeroakustik und Strukturschwingungen

Haus der Technik e.V., Essen
Seminar Aeroakustik
25.-26. Mai 2000

FH D

Fachhochschule Düsseldorf

Institut für Strömungsmaschinen
Fachbereich 4
Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Josef-Gockeln-Str. 9
40474 Düsseldorf

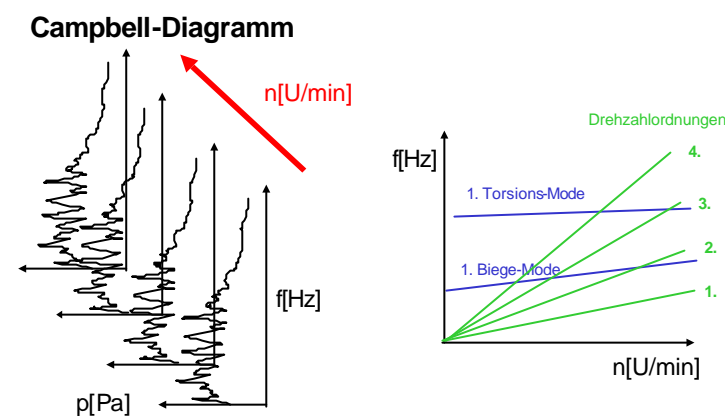
Phone (0211) 4351-448
Fax (0211) 4351-509
E-Mail Frank.Kameier@fh-duesseldorf.de

Aeroakustik und Strukturschwingungen

- Eigenschwingungen
- Campbell-Diagramm
- Periodische Strömungsanregungen
- Kavitäten
- Beispiele:
 - Kármánsche Wirbelstrasse
 - Kavitäten
 - akustische Resonanzen
 - rotierende Instabilitäten

Folie 1

Mechanische Strukturen schwingen grundsätzlich bei ihren Eigenfrequenzen. Aus dem Spektrum der anregenden Frequenzen nutzt die mechanische Struktur nur die Anteile aus, die auch mit Eigenfrequenzen der Struktur übereinstimmen. Besonders gut lässt sich dies bei rotierenden Maschinen anhand eines sogenannten Campbell-Diagramms oder Spektrogramms verdeutlichen.



Folie 2

Das Campbell-Diagramm ergibt durch die Auftragung Frequenz über der Drehzahl mit einer farbigen Amplitudenskalerung eine andere Perspektive auf die Messdaten als ein Wasserfalldiagramm. Trifft bei einem Hochfahrversuch eine sogenannte Drehzahlordnung, ein ganzzahliges Vielfaches der Rotationsfrequenz eine Eigenfrequenz der betrachteten mechanischen Struktur, so wird die mechanische Struktur in ihrer entsprechenden Eigenschwingungsform angeregt und schwingt.

Eigenschwingungsformen mechanischer Strukturen

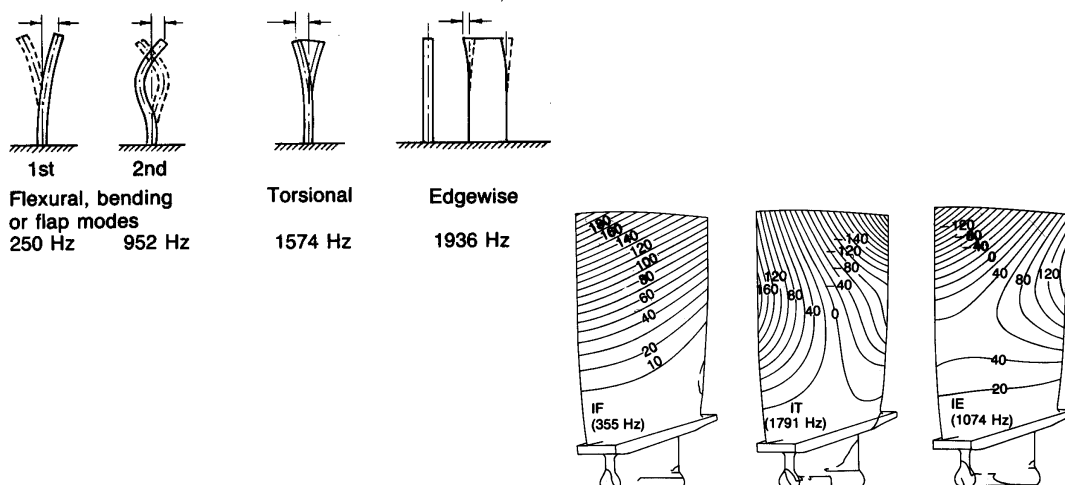
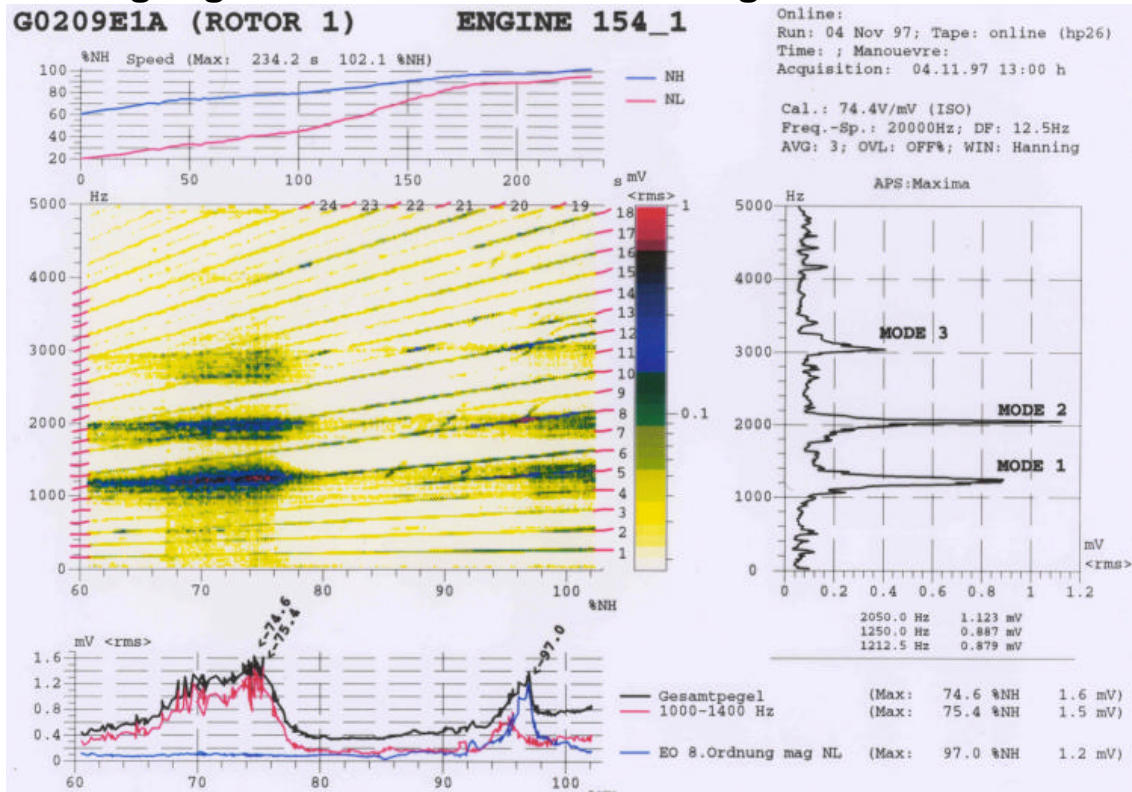


Fig. 10.3 Three low order blade mode shapes showing contours of equal displacement amplitude in first flap (IF), first torsional (IT) and first edgewise (IE) modes. (Reproduced with permission of Rolls-Royce)

Quelle: Cumpsty, Compressor Aerodynamics, 1989

Folie 3

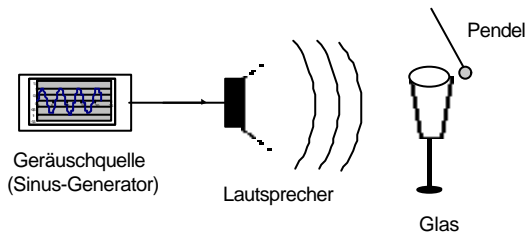
Schwingungen der Schaufeln eines Flugtriebwerkverdichters



vgl. Clarke, Ziegenhagen, Kameier, EuroNoise 1998

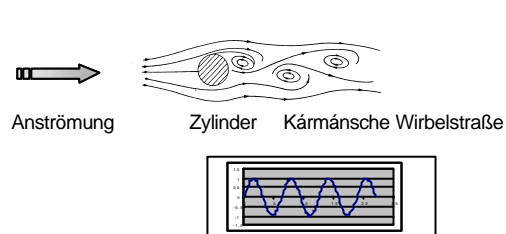
Folie 4

Visualisierung von Strukturschwingungen



Folie 5

„Aerodynamischer“ Sinus-Generator



Folie 6

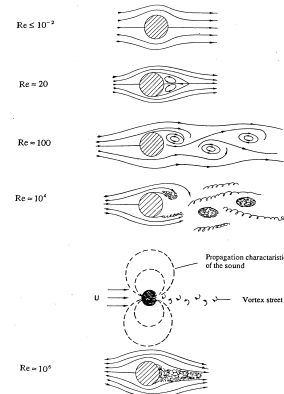
Reynoldszahl $Re = \frac{c D}{v}$
 © dimensionslose Anströmgeschwindigkeit
 (sofern Geometrie und Medium nicht variiert werden)

Strouhalzahl $St = \frac{f D}{c}$
 © dimensionslose Frequenz
 (sofern Geometrie nicht variiert wird)

Folie 7

Zylinderumströmung

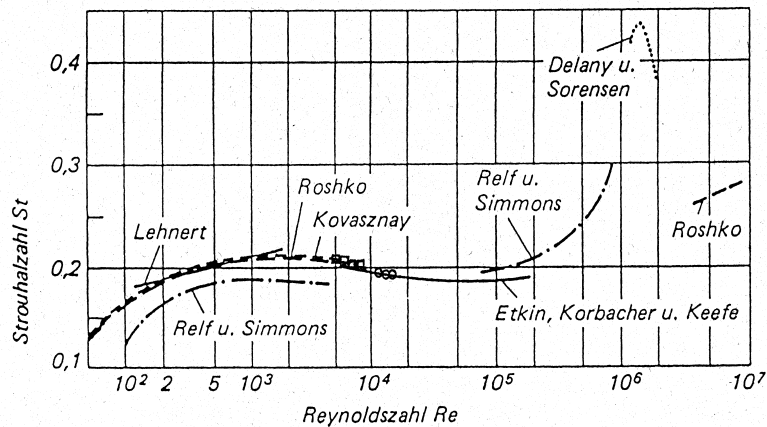
$$Re = \frac{c D}{v}$$



Quelle: R. Feynman, Lectures on Physics, 1974

Folie 8

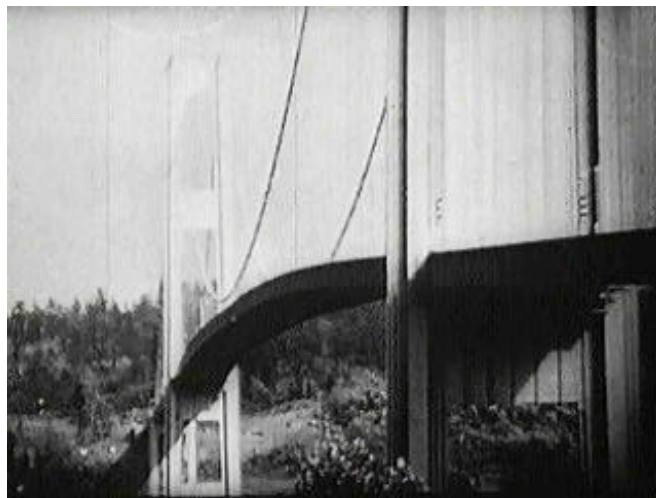
Variation der Frequenz



Quelle: Stüber, B., Untersuchung aerodynamisch erzeugter Schallfelder mit Hilfe der Modellmethode, Dissertation, TU München 1968.

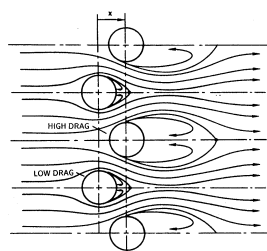
Folie 9

Tacoma-Bridge Kármánsche Wirbelstraße verursacht Strukturschwingung



Folie 10

Anordnung von Zylindern und Kármánschen Wirbelstraßen



Blevins: Flow-Induced Vibration, 1990

Folie 11

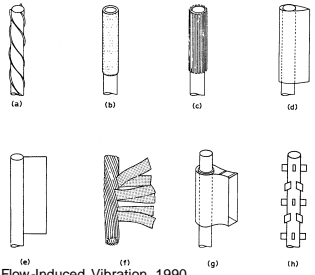
Ferrybridge (GB) Kühltürme
Kármánsche Wirbelstraße verursacht Strukturschwingung



Quelle: Krause, Zum 100. Geburtstag des Luft- und Raumfahrtpioniers Theodore von Kármán, Aachen, 1981.

Folie 12

Behinderung der Wirbelbildung



Quelle: Blevins, Flow-Induced Vibration, 1990

Folie 13

Behinderung der Wirbelbildung



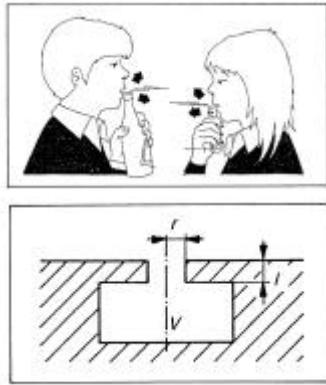
an der Blattspitze:
Winglet gegen das Überströmen der Blattspitze.

am Turm:
Spirale gegen die Bildung von Kármánschen Wirbelstrassen

Quelle: Mechanical Engineering, Vol.121, No12, Dec 1999

Folie 14

Helmholtz-Resonator



$$f = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi r^2}{V(l + \pi r/2)}}$$

Lips, Strömungsakustik(1997)

Folie 15

$C_{Anström.}$



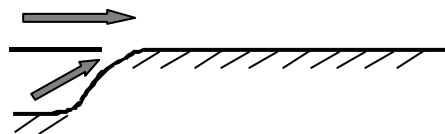
tiefe Frequenz

$C_{Anström.}$



hohe Frequenz

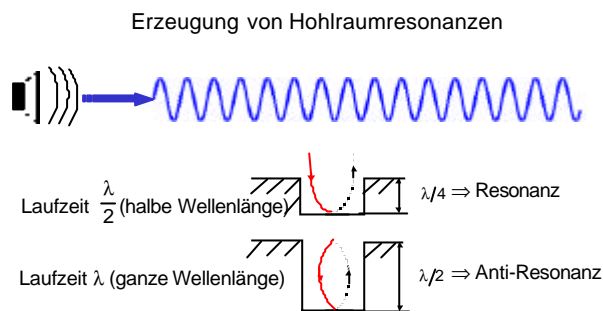
Wirbelbildung in Scherströmungen



(mit akustischer Anregung)

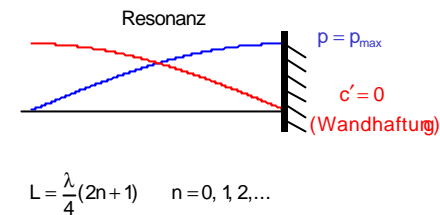
Quelle: M.Schober, <http://obiwan.pi.tu-berlin.de/M.Schober/wjallcases/acoustic.mpeg>

Folie 16



Folie 17

Stehende Welle im Rohr
Rohrabschluss = starre Wand



Folie 18

Herleitung der Resonanzbedingung für eine stehende Welle im Rohr

Impulserhaltung
(Eulersche Bewegungsgleichung)

$$\ddot{x} = \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

bei harmonischem Ansatz

$$p(x) = P_i \cdot e^{ikx} + P_R \cdot e^{-ikx} \quad u = -\frac{i}{\rho \omega} \frac{\partial p}{\partial x} \quad k = \frac{\omega}{c}$$

harter Wandabschluss

$$u = 0 \quad \mapsto \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$P_i \cdot e^{2ikL} = P_R$$

$$p(x) = P_i (e^{ikx} + e^{(-ikx+2kL)}) = 2 \cdot P_i \cdot e^{ikL} \cos k(L-x)$$

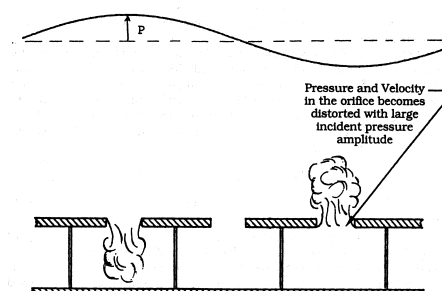
Das Fluid in der Kavität wirkt wie eine mechanische Feder.

$$L = \frac{\lambda}{4} (2n + 1) \quad f_{\text{res}} = \frac{(2n + 1)c}{4L}$$

Quelle: Lucas et al., Turbomachinery Cavities, 1997

Folie 19

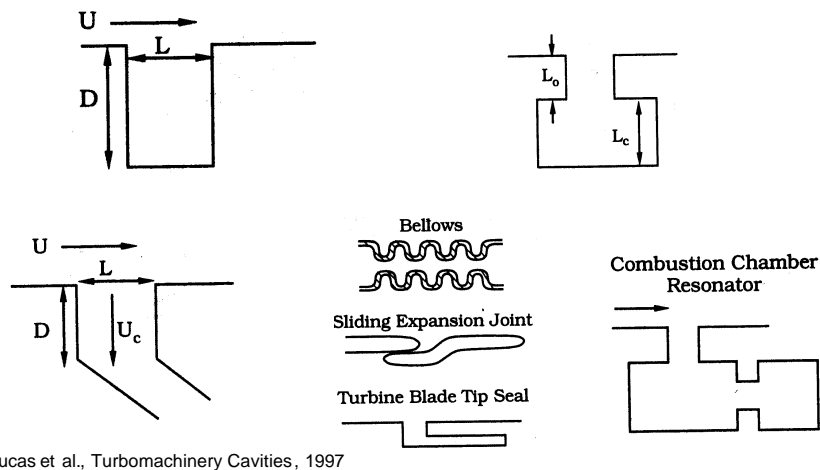
Überströmung von Kavitäten - Helmholtzresonator



Quelle: Lucas et al., Turbomachinery Cavities, 1997

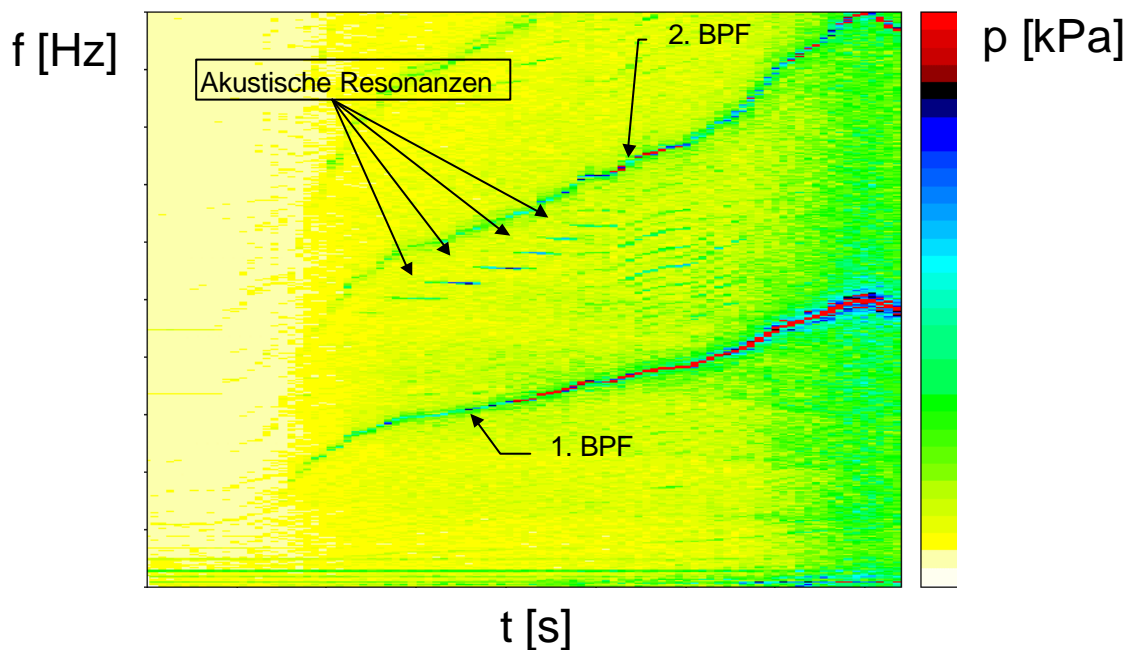
Folie 20

Überströmung von Kavitäten - Helmholtzresonator



Folie 21

Akustische Resonanzen



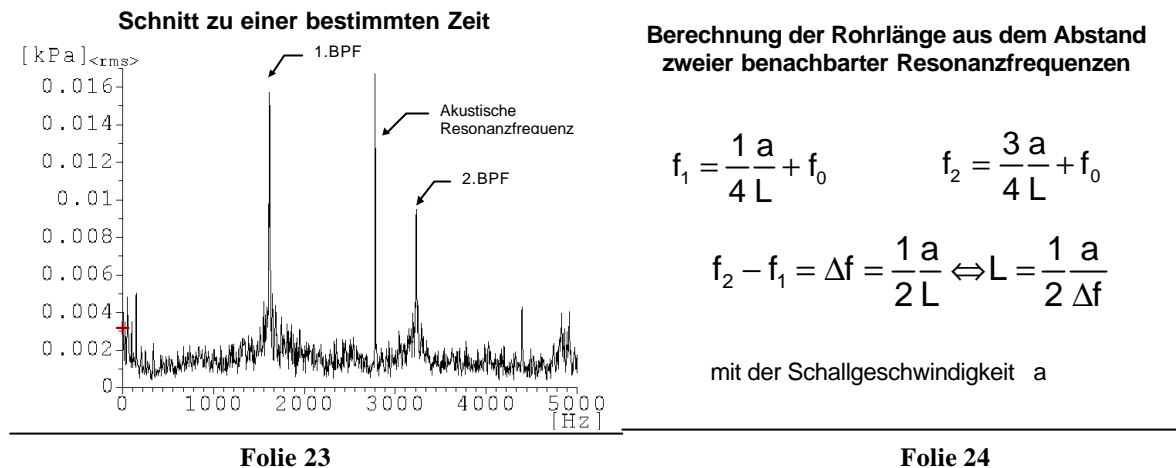
Druckaufnehmer am Bypass des Fans eines Flugtriebwerks

Folie 22

Druckschwankungen, die sich mit Geschwindigkeiten in der Größenordnung der Schallgeschwindigkeit ausbreiten, können unter bestimmten Bedingungen mechanische Strukturen zu hohen Schwingungspegeln anregen, man spricht dann von akustischen Resonanzen. Akustische Resonanzen treten bei einer dominierenden Frequenz auf, ihre Wellenlänge oder ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge muß mit einer geometrischen Abmessung übereinstimmen, um große Druckamplituden erzeugen zu können. Offene angeflanschte Rohrleitungen oder nur ihre Austrittsöffnungen erzeugen bei Überströmung solche Resonanzen in Strömungsmaschinen.

Die Frequenz hängt bei einer Strömungsanregung, die in der Regel breitbandig ist, im wesentlichen von der Geometrie der Öffnung ab. Diskrete Frequenzsprünge in Abhängigkeit der halben Wellenlänge sind möglich. Das obige Bild zeigt akustische Resonanzfrequenzen bei der Beschleunigung eines Triebwerks in den Wanddruckschwankungen stromab des Fans. Das folgende Bild verdeutlicht, daß es sich bei einer akustischen

Resonanzfrequenz um eine einzelne Frequenzkomponente handelt, wobei die Frequenz in Abhängigkeit der Drehzahl springen kann. Ähnlich der Schallabstrahlung eines Helmholtz-Resonators wird die Frequenz je nach Geometrie von der Schallgeschwindigkeit, dem Resonator-Volumen und dem Durchmesser der Zuleitung bestimmt. Die eigentliche Strömungsanregung ist eine Wirbelablösung an einer scharfen Kante der überstrichenen Öffnung. Entspricht die Öffnung einem schallhart abgeschlossenen Rohrstück, gibt es eine Amplitudenverstärkung bei Übereinstimmung der Öffnungstiefe mit einem oder drei Viertel der Wellenlänge. Aus dem Abstand zweier benachbarter Resonanzfrequenzen berechnet sich die Länge L des Rohrstücks:



Außerdem ist bekannt, daß akustische Resonanzen durch die im Nachlauf von Rotor-, Statorstufen oder Stützstreben auftretenden Wirbel angeregt werden können. Eine Wirbelablösung an sich muß jedoch nicht unbedingt akustische Wellen erzeugen. Unmittelbar in der Nähe der Wirbelablösung liegt die Ausbreitungsgeschwindigkeit verursachter Druckschwankungen in der Größenordnung der Strömungsgeschwindigkeit und nicht der Schallgeschwindigkeit, dies ist unter Umständen vergleichbar zu sogenannten akustischen Nahfeldern.

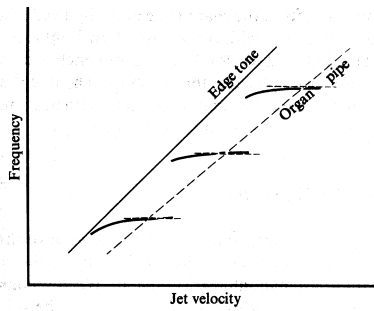
Strömungsablösung und Strukturschwingungen

Von einer abgelösten Strömung spricht man, wenn die Energie der Strömung in der Nähe einer Wand nicht mehr ausreicht, um einen Druckgradienten zu überwinden. Die Ablösung in Pumpen und Verdichtern tritt im rotierenden Schaufelkanal auf, dort liegt in Strömungsrichtung ein positiver Druckgradient aufgrund der zugeführten Energie vor. Die breitbandige Strömungsablösung kann Schwingungen mechanischer Strukturen induzieren und damit Festigkeitsprobleme verursachen.



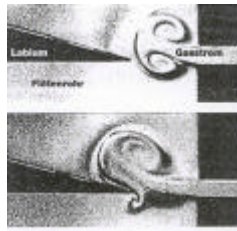
Folie 25

Spektrum einer Orgelpfeife



Fletcher, N.H., Rossing, T.D.: The Physics of Musical Instruments, 1991.

Periodische Strömung in einer Flöte



Quelle: Science Times, 12/98

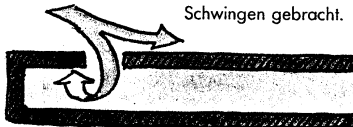
Folie 26

Folie 27

Strukturschwingungen am Beispiel von Musikinstrumenten

LIPPENPFEIFER

Flöte und Blockflöte werden vom Spieler über eine scharfe Kante im Mundloch geblasen. Die eingeschlossene Luftsäule im Rohr wird dadurch unmittelbar zum Schwingen gebracht.



Blockflöte

EINFACHES ROHRBLATT ALS MUNDSTÜCK
Das Mundstück von Klarinette und Saxophon enthält ein Rohrblatt, das beim Blasen mitschwingt und die Luftsäule zum Schwingen bringt.



Klarinette

DOPPELTES ROHRBLATT ALS MUNDSTÜCK
Oboe, Englischhorn und Fagott besitzen ein doppeltes Rohrblatt, das beim Blasen mitschwingt und die Luftsäule zum Schwingen bringt.

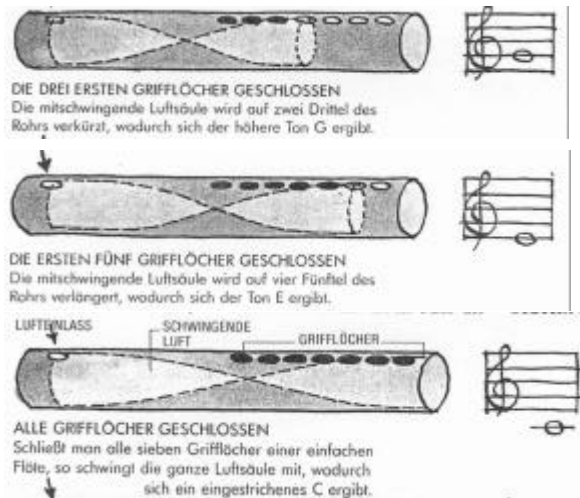


Oboe

Quelle: Macaulay, Ardley: Macaulay's Mammut Buch der Technik, Nürnberg 1989.

Folie 28

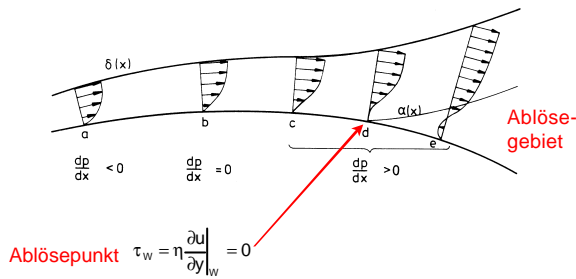
Stehende Wellen in Musikinstrumenten



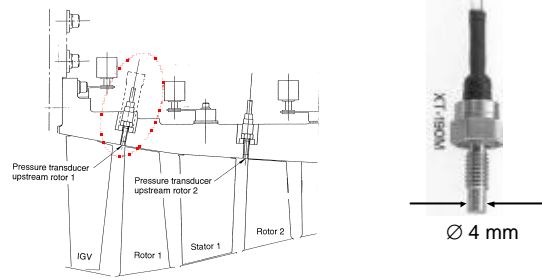
Quelle: Macaulay, Ardley: Macaulay's Mammut Buch der Technik, Nürnberg 1989.

Folie 29

Strömungsablösung als Quelle von Strukturschwingungen



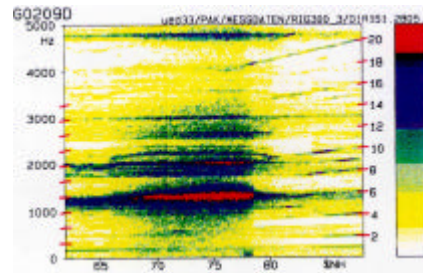
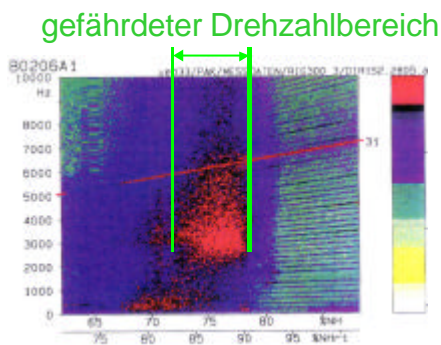
Beobachtung von Wanddruckschwankungen in einem Hochdruckverdichter



Folie 30

Folie 31

Rotierende Instabilitäten und Strukturschwingungen



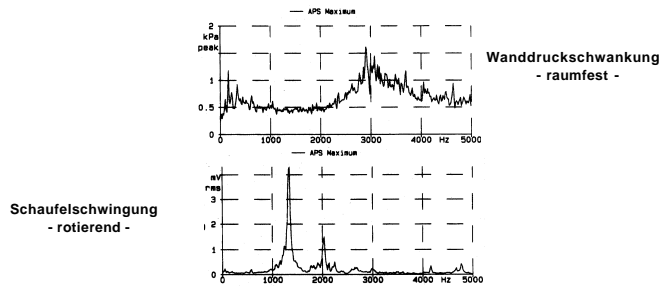
Schaufelschwingung
- rotierend -

Wanddruckschwankung
- raumfest -

BAUMGARTNER, KAMEIER, HOURMOUZIADIS,
ISABE Conference, Melbourne, 1995

Folie 32

Rotierende Instabilitäten und Strukturschwingungen



Folie 33

Literatur

- Blevins Flow-Induced Vibration, 1990.
- Cumpsty, Compressor Aerodynamics, 1989.
- Fletcher, N.H., Rossing T.D.: The Physics of Musical Instruments, 1991.
- Feynman, Lectures on Physics, 1974.
- Kameier, Reinartz: Vorlesungsskript Strömungsakustik, FH Düsseldorf 1999
<http://www.fh-duesseldorf.de/muv/STRM/download.htm>
- Lips, Strömungsakustik, 1995.
- Lucas et al., Handbook of the Acoustic Characteristics of Turbomachinery Cavities, 1997.
- Macaulay, Ardley: Macaulay's Mammut Buch der Technik, Nürnberg 1989.

Folie 34