

# Modelle der physikalischen Akustik

Folien-Repositoryum

zum

26. Workshop „Physikalische Akustik“

im Physikzentrum Bad Honnef

Oktober 2021

Herausgeber

Christian Adams, Joachim Bös, Matthias Klärner,  
Ivor Nissen

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	3
Das Modellhaus.....	4
1. Modelle in der Hydroakustik .....	6
2. Ansatz und Anwendungen der energiebasierten Finite-Elemente-Methode .....	19
3. Ein Multi-Modell-Ansatz zur Beschleunigung akustischer Berechnungen .....	20
4. Gekoppelte elektrodynamische und mechanische Modelle zur Berechnung von Oberflächenwellen in akustischen Mikrosystemen.....	35
5. Überströmte Schallabsorber .....	36
6. Identifikation der Materialparameter klassischer Gitarren auf Basis parametrisch modellordnungsreduzierter Finite Elemente .....	54
7. MOR-Methode zur effizienten Lösung akustischer Problemstellungen.....	59
8. Towards realistic damage modelling using quadtree decomposition in the context of ultrasonic guided waves-based SHM.....	60
9. Ray Tracing in der Atmosphäre: Gekrümmte Pfade als Basis für die Auralisierung von Fluglärm .....	61
10. Fraktionale Ableitungen in der Modellierung für die Strukturdynamik .....	76
11. Modellierung der Strukturintensität .....	97
12. Effiziente Bewertung der abgestrahlten Schallleistung von dünnwandigen Bauteilen .....	111
13. Diskussion und Zusammenfassung .....	112
Impressum .....	113

# Vorwort

Modellierung ist eine zentrale Fertigkeit, ein Modell ein Instrument, um beispielsweise Fragestellungen der physikalischen Akustik abzubilden, zu untersuchen und zu verstehen. Obwohl Modelle ganz unterschiedliche Fragestellungen in der physikalischen Akustik adressieren können, sind die zugrundeliegenden Modellierungsansätze und -philosophien häufig sehr ähnlich. Dieses wurde in dem diesjährigen Herbstworkshop des Fachausschusses Physikalische Akustik der DEGA am 22. und 23. Oktober 2021 im Physikzentrum Bad Honnef unter der Bezeichnung **Modelle der physikalischen Akustik** intensiv beleuchtet und diskutiert. Folgende Themen waren Gegenstand für Beiträge zum Workshop:

- Präsentation von Simulationsmodellen der physikalischen Akustik
- Strategien zur Modellierung
- Philosophie der verwendeten Modelle
- Quantifizierung von Abweichungen, z. B. zwischen numerischen und experimentellen Modellen

Eine zusätzliche Fragestellung des diesjährigen Herbstworkshops des Fachausschusses Physikalische Akustik war zudem, ob die Ansätze der Vortragenden auch übertragen werden können, Ähnlichkeiten herauszuarbeiten, aber auch Anti-Profile der individuellen Zugänge aufzuzeigen. Hierfür wird eine Beschreibung des Modells benötigt, ein Modell des Modells. Die Gruppe hat dazu das Kieler Modellhaus angewendet. In den hier zusammengefassten Foliensätzen sind die Modellhäuser angegeben. Eine beispielhafte Einführung in die Systematik des Modellhauses ist den Beiträgen vorangestellt.

Dieses Dokument ist ein Versuch im Bereich der Kunst der Modellierung einen Beitrag zu liefern.

Joachim Bös (Leiter des Fachausschusses),  
Ivor Nissen, Christian Adams, Matthias Klärner (Organisation des Herbstworkshops)

# Das Modellhaus

Es herrscht kein einheitliches Modellverständnis vor, es gibt eine dreistellige Anzahl an Definitionen, vielfältige Zugänge zum Modellsein und zur Fähigkeit, Modelle zu erschaffen. Wie kann man dann gemeinsam über Modelle sprechen oder sogar voneinander lernen? Das soll der Sinn dieses Workshops sein – uns gegenseitig zu erklären, welche Modelle wir wie im Arbeitsbereich der Physikalischen Akustik definieren und einsetzen und warum. Oft machen wir uns wenig Gedanken über das Modell selbst, schaffen und prüfen es gegen das Original. Das soll nun etwas tiefer durchdrungen werden. Ein Modell ist ein Instrument, welches in Bezug auf sein(e) Original(e) adäquat [ähnlich, regulär, nachvollziehbar, unmissverständlich] und zudem verlässlich [vereinfacht, abstrakt, charakteristisch, wesentlich] ist. Es funktioniert (nur) im Kontext X unter Bedingungen Y für Anwendungen Z. Durch unsere erhaltene Prägung bei der Ausbildung (in der Informatik, im Ingenieurwesen, in der Mathematik, in der Physik, ...) und der wissenschaftlichen Schule (dem Ort, unserer Lehrer) setzen wir Axiome voraus, die wir so nicht erklären respektive implizit immer voraussetzen.

Für eine Reflexion zu den verwendeten Modellen selbst kann es hilfreich sein, Modellbildung mithilfe eines Schemas, dem Kieler Modellhaus, zu betrachten.

Ein Beispiel aus der theoretischen Informatik: die Turing-Maschine als mathematisches Modell für eine abstrakte Rechenmaschine.

**Community of Practice (CoP):** Informatiker, Theoretiker

**Paradigmen:** von-Neumann-Architektur mit starrer Trennung von Rechnung, Steuerung und Speicher mit vollständiger Spezifikation

**Postulate:** Berechnung der Zustandstransformation, begrenzte Parallelität, potenziell unendliches Bandalphabet

**Annahmen:** Exklusivrechte am Datenraum, statische Abstraktion, endlicher Ein- und Ausgang, Schreib-/Lesekopf, Kompositionalität, funktionaler/relationaler Zustand, Transformation, Separation in Steuerung und Speicherung, codiertes Alphabet, Kopfbewegung oder Klebeband, strikte Kündigung

**Damit Nutzungsszenario und Nichtnutzungsszenario:** allgemeine Berechenbarkeitstheorie, Komplexitätstheorie

**Nicht anwendbar** für analoge, parallele oder kontinuierliche Berechnung, Kommunikation; Erfahrung oder Wissenstransfer; Erläuterung; effiziente Systementwicklung; Austausch von Teilen von Systemen; Simulation; Herkunftskontrolle; Berechnungslösung; Probleme; frühzeitige Validierung, Verifizierung oder Prüfung; Dokumentation; Optimierung; Ist-Zustandsanalyse; Prognose; Lernen; und und und ... und damit kein Modell für jeden Computer.

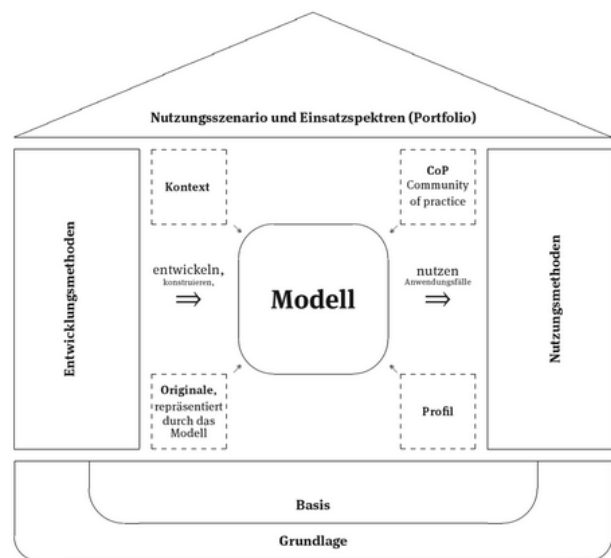


Abbildung: Modellhaus aus /1/

## Modellkategorien

<b>Modellkategorie</b>	<b>Kurzbeschreibung der Nutzungsfunktion</b>
Repräsentationsmodell	(ausschließlich) Darstellung, Beschreibung oder Illustration; <i>Essensausgabe</i> : Die Auswahl der Tagesgerichte wird visuell präsentiert, Kunden können sich vorab angebotenen Speisen ansehen; Original: zu verzehrendes Gericht; Spezialfall Dokumentationsmodell zur Reflexion und Beurteilung, zum Begreifen und Verstehen; Beispiel: <i>Herzmodell</i>
Erläuterungsmodell	
didaktisches Modell	spezielles Erläuterungsmodell im Rahmen von Lernprozessen; Beispiel: <i>grafische Darstellung in einem Lehrbuch</i>
Fertigungsmodell	Vorlage oder Schablone für die Fertigung weiterer Objekte; Beispiel: <i>Bauzeichnung</i>
Orientierungsmodell	Orientierung der Rezipienten im Rahmen von Handlungen; Beispiel: <i>Verhaltens- oder Warnschilder</i>
Imaginationsmodell	Deskription/Demonstration von Vorstellungen und Handlungen
Anleitungsmodell	Handlungsanleitung/Instruktion, Beispiel: <i>Aufbauanleitung eines Möbelhauses</i>
Ritualmodell	spezielle Form der Orientierung
Experimentiermodell	Leitfaden für Experimente
mathematisches Modell	in der Sprache der Mathematik
Rechenmodell	basierend auf einem (Halb-)Algorithmus
physisches Modell	physikalisches Instrument
Darstellungsmodell	zur Darstellung eines anderen Begriffs
schematisches Modell	Verwendung einer bestimmten Sprache, z.B. UML, Elektrotechnik
Erkundungsmodell	Suche bei Kleinanzeigen oder ähnlich
heuristisches Modell	basierend auf einer gewissen Fuzzy-, Wahrscheinlichkeits-, Plausibilitäts-Korrelation
Vorhersagemodell	basierend auf Fortsetzungsannahmen, Stetigkeit, ...

entnommen aus /1/ Thalheim, Nissen, „Wissenschaft und Kunst der Modellierung“ mit dem Verweis auf mehr Informationen zu dieser Thematik.

# 1. Modelle in der Hydroakustik

*Ivor Nissen*

Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung, WTD71, Kiel

Für Anwendungen zur Detektion, Navigation und Kommunikation unter der Wasseroberfläche über mehr als Meterdistanzen wird die Hydroakustik benötigt. Hier potenzieren sich verschiedenste physikalische Effekte, so dass Signale nach ihrer Aussendung durch Mehrwegeausbreitung, frequenzselektive Schwunderscheinungen und Abschattungen verformt und bis zur Unkenntlichkeit verstümmelt werden. Die Schallgeschwindigkeit, abhängig von Temperatur, Salzgehalt und Druck, variiert in der Wassersäule der Weltmeere mit maximal  $\pm 6\%$  um 1,5 km/s und führt damit zu unterschiedlichen Dopplerausprägungen. Mit verschiedenen Wassertiefen, Schichtungen in Wassersäule und Sediment, Seegangsausprägungen, Regen-, Wind- und Strömungsintensitäten bis hin zu pH-Wertvariationen steigt die Komplexität zusätzlich, so dass einfache Erfahrungsregeln und Tafelwerke nicht greifen. Gerade in der Unterwasserkommunikation werden genaueste Phasenbeziehungen betrachtet, in denen die zu übertragenden Nachrichten kodiert sind. Die stark mit Zeit und Ort fluktuierenden umweltbedingten Ausbreitungsbedingungen führen zu mindestens drei wichtigen Anwendungsfeldern der Modellierung:

- Verstehen der Natureffekte und -gesetze nebst deren Ausbildung;
- A priori-Vorhersagen für Planungen und Prävention;
- Adaptive Systeme und Maschinen, die sich auf den Umweltzustand einstellen können.

Die physikalischen Randbedingungen erfordern technische Innovation und raffinierte Verfahrensweisen, um eine robuste allwettertaugliche Infrastruktur für die Anwendung bereitstellen zu können. Durch die Komplexität und die meist nicht bekannten naturgegebenen Randbedingungen muß abstrahiert, reduziert sowie idealisiert werden. Modelle sind daher vielfältig: Von der digitalen, computergestützten Modellierung mittels Numerik und aufbauenden Simulationen oder analogen Emulation in Luft respektive Tank- oder Seeexperimenten ist die Palette breitbandig, bis hin zu hybriden Ansätzen, die Benchmarks gestatten. Der Vortrag beleuchtet diese Punkte als Einführung für diesen Workshop.



# MODELLE IN DER HYDRO-AKUSTIK FÜR DAS UNTERWASSER-INFORMATIONSMANAGEMENT

26. Workshop „Modelle der physikalischen Akustik“  
Physikzentrum Bad Honnef von DEGA und DPG  
Ivor Nissen (WTD 71 GF 630)



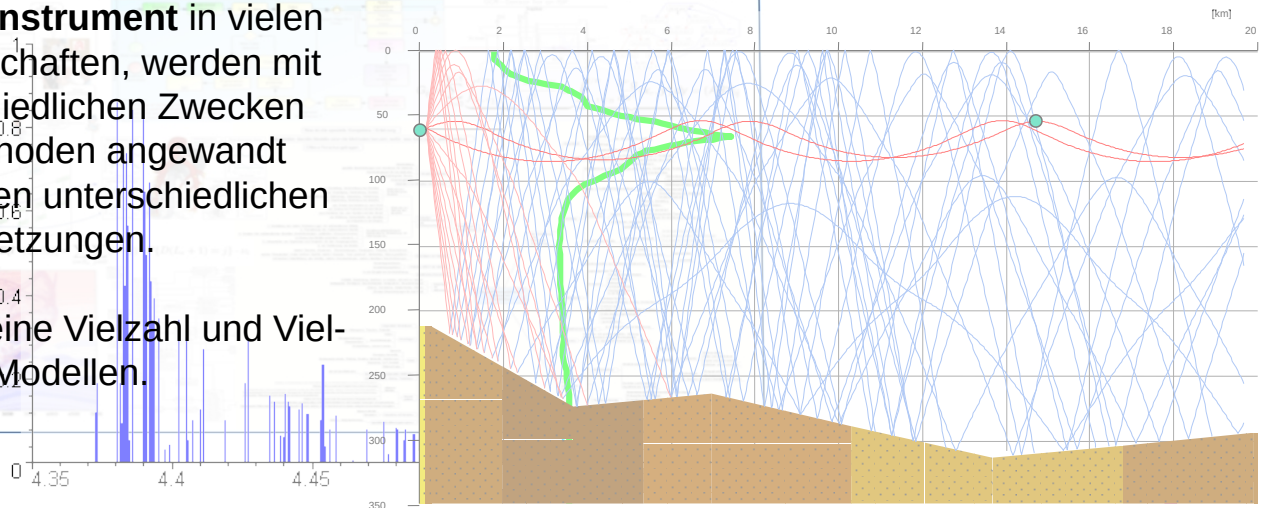
BUNDESWEHR

## WAS IST EIN MODELL?

Modelle sind ein zentrales **Arbeitsinstrument** in vielen Wissenschaften, werden mit unterschiedlichen Zwecken und Methoden angewandt und folgen unterschiedlichen Voraussetzungen.

Es gibt eine Vielzahl und Vielfalt von Modellen.

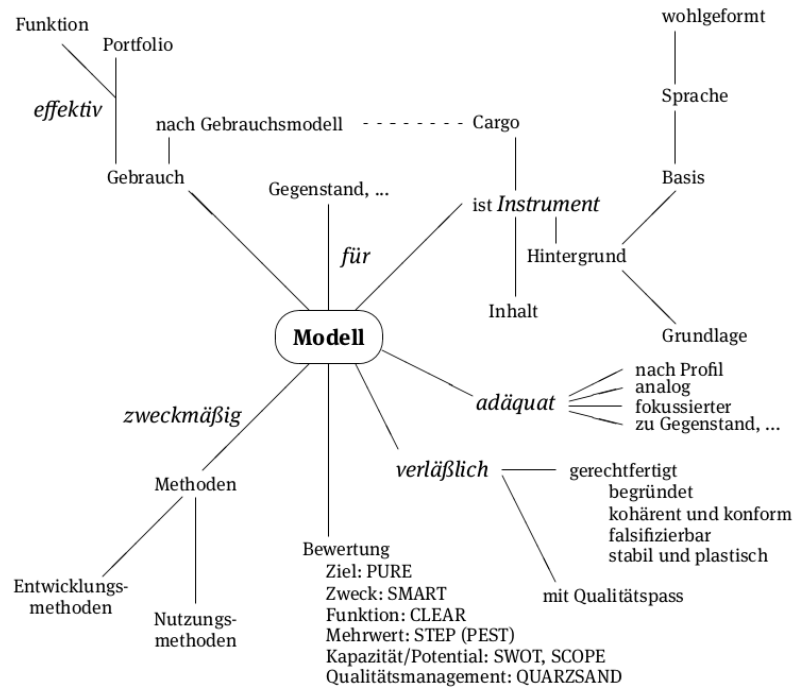
Wir nutzen Modelle täglich, beruflich oder privat.



Modelle sind ein zentrales **Arbeitsinstrument** in vielen Wissenschaften, ...

Ein Instrument kann als Werkzeug nicht nur Gegenstand oder Artefakt, sondern auch ein Lebewesen sein.

**Ein Modell ist ein Instrument, das adäquat und verlässlich sowie zweckmäßig und ggf. effektiv ist.**



THALHEIM, Bernhard; NISSEN, Ivor (Hg.). Wissenschaft und Kunst der Modellierung: Kieler Zugang zur Definition, Nutzung und Zukunft. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2015.

## MODELLE WERDEN ...

verwendet z.B. (Mahr15)

- *deskriptiv* zur Beschreibung,
- *präskriptiv* als Vorlage,
- *konzeptuell* zum Verständnis und als Vermittler,
- *exemplarisch* mit einem Abbild als (Museums-)Exemplar,
- *experimentell* mit einem Prototypen,
- *explikativ* mit einer Erklärung,
- *normativ* mit Postulaten und Annahmen,
- *prognostisch* als Vorhersagemodell,
- *metaphorisch* mit einer Anleihe oder einem Gleichnis,
- *hypothetisch* als empirisch-belegter Gegenstand,
- *substituierend* als Ersatz für ein Teilsystem,
- *gestalterisch* als Entwurf oder Plan,
- *nachprüfend* als Testfall-Suite,
- *anschaulich* als figurativer oder visueller Gegenstand,
- *repräsentativ* als Überbringer einer Kultur oder Nachricht,
- *verfeinerbar* als ‚inverses‘ Modell,
- *anleitend* als Arbeitsvorschrift

in unterschiedlichen Nutzungsszenarien („Gebrauchsspielen“ (Wit58)) verwendet. Deshalb kann eine Klasseneinteilung in

- Situationsmodelle,
- Perzeptionsmodelle,
- Realmodelle,
- Erklärungsmodelle,
- Experimentmodelle,
- formale Modelle,
- mathematische Modelle,
- Simulationsmodelle,
- Emulationsmodelle,
- Ersetzungsmodelle und
- Repräsentationsmodelle



verwendet z.B. (Mahr15)

- *deskriptiv* zur Beschreibung,
- *präskriptiv* als Vorlage,
- *konzeptuell* zum Verständnis und als Vermittler,
- *exemplarisch* mit einem Abbild als (Museums-)Exemplar,
- *experimentell* mit einem Prototypen,
- *explikativ* mit einer Erklärung,
- *normativ* mit Postulaten und Annahmen,
- *prognostisch* als Vorhersagemodell,
- *metaphorisch* mit einer Anleihe oder einem Gleichnis,
- *hypothetisch* als empirisch-belegter Gegenstand,
- *substituierend* als Ersatz für ein Teilsystem,
- *gestalterisch* als Entwurf oder Plan,
- *nachprüfend* als Testfall-Suite,
- *anschaulich* als figurativer oder visueller Gegenstand,
- *repräsentativ* als Überbringer einer Kultur oder Nachricht,
- *verfeinerbar* als ‚inverses‘ Modell,
- *anleitend* als Arbeitsvorschrift

in unterschiedlichen Nutzungsszenarien („Gebrauchsspielen“ (Wit58)) verwendet. Deshalb kann eine Klasseneinteilung in

- Situationsmodelle,
- Perzeptionsmodelle,
- Realmodelle,
- **Erklärungsmodelle**,
- **Experimentmodelle**,
- formale Modelle,
- **mathematische Modelle**,
- **Simulationsmodelle**,
- **Emulationsmodelle**,
- Ersetzungsmodelle und
- Repräsentationsmodelle

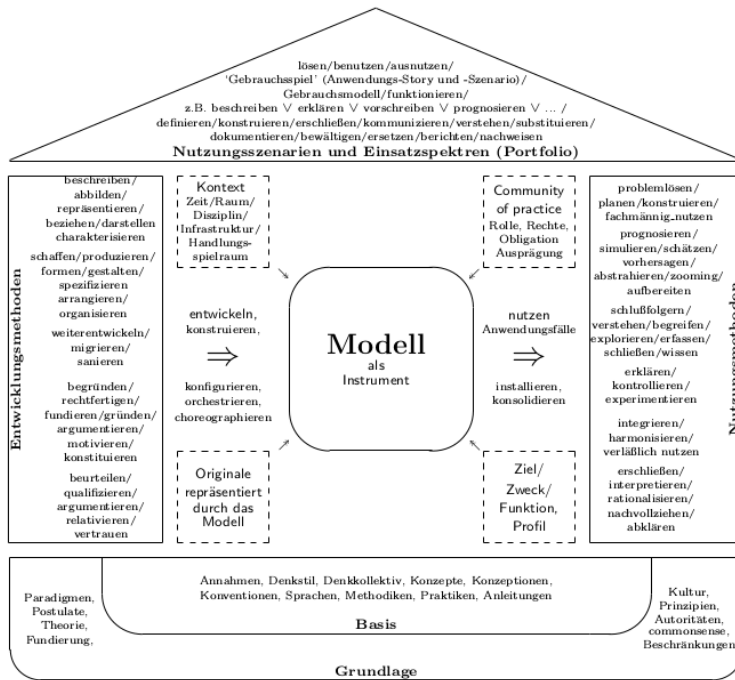
5

## WIE MODELLIERT MAN / WIE MODELLIEREN „WIR“ IN DER HYDROAKUSTIK?

Für diesen Workshop wollen wir uns gegenseitig „unsere“ Modelle aber auch die Techniken dahinter, deren Grenzen und versteckten Grundannahmen vorstellen – wir wollen voneinander lernen:

- Modellierung von Effekten
- Modellierung der Signalgenerierung
- Modellierung des Signalweges
  - Techniken mittels Finiten Differenzen und Finiten Elementen
  - Techniken mittel Normalmoden
  - Techniken mittels Wavenumber Integration
  - Techniken mittels Parabolic Equations
  - Techniken mittels Strahlenansatz
- Modellierung der Signalreflektierung an Körpern
  - künstliche / - natürliche
- Modellierung des Signalempfangs
- Modellierung im Netzwerk
- Modellierung der Signalkette durch Seeexperimente
- Modellierung durch Hybrid-Modelle (Benchmarks)

## WIE MODELLIEREN SIE – DAS KIELER MODELLHAUS?



Wie setzen Sie die Modelle in Ihrer Arbeit ein?

Was setzen Sie einfach voraus, weil Sie in Ihrer Ausbildung so geprägt worden sind? (Wissenschaftskultur)

Experiment in diesem Workshop:

Welche Modellhäuser erhalten Sie, wenn Sie über Ihre Modelle reflektieren?

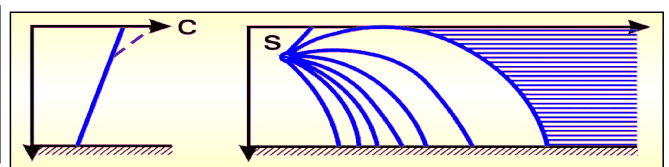
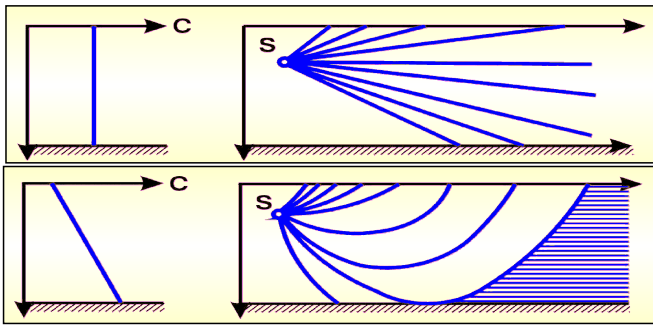
Synergieeffekte durch unterschiedliche Disziplinen.

## ERKLÄRUNGSMODELLE : MODELLIERUNG VON EFFEKTEN

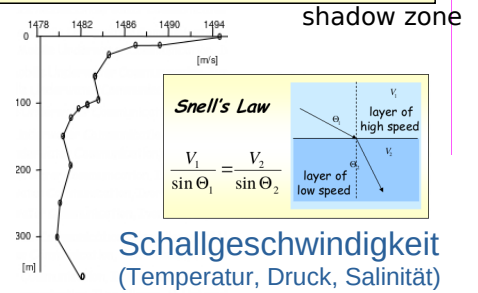
In diesem Beitrag kann nur unvollständig illustriert werden, für tiefergehende Zusammenhänge sei auf das Fundamentalwerk (Uri83) respektive Folgeliteratur verwiesen:

- Effekte:**
- Nichtlineare Effekte bei der Signalgenerierung
  - Wind und Seegang, Eintrag von Blasen, ...
  - Dopplereffekt, durch Bewegung von Sender und Empfänger sowie der Wassersäule (Strömung) abhängig auch von der meist unbekanntesten Mediumsgeschwindigkeit
  - Absorption als Umwandlung akustischer Energie in Wärme ist bei Seewasser kein einfacher nur von der Frequenz abhängender linearer Zusammenhang. Im Seewasser führen MgSO- und B(OH)-Ionisationsprozesse bis hin zur pH-Verteilung zu nichtlinearen Effekten, die mit mehrtermigen Fittings beschrieben werden können F.H. Fisher-V.P Simmons (JASA 62/7 1977).
  - Bestimmung der Schallgeschwindigkeit im Seewasser, abhängig von Druck, Temperatur und Salinität, kann mittels Fitting-Formeln von Leroy, Medwin, Mackenzie, Chen, Millero und Kremling (1976) unterschiedlich genau modelliert werden.
  - An Grenzflächen wird Schall scharf reflektiert, diffus gestreut, gebrochen, aber auch zum Teil in Schattenzonen gebeugt (Diffraction).

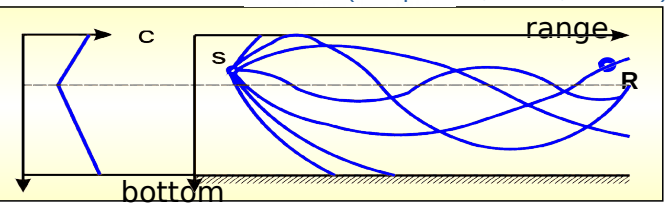
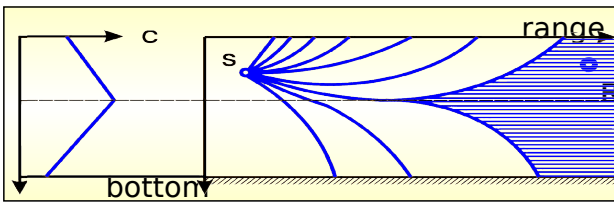
# ERKLÄRUNGSMODELLE : SNELLS LAW



Beugungen  
(Diffraktion)



deskriptiv zur Beschreibung,  
konzeptuell zum Verständnis und als Vermittler



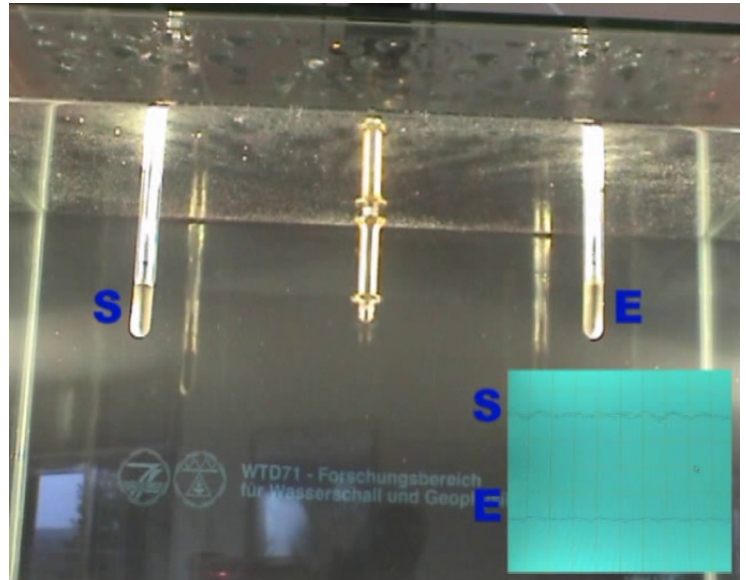
# ERKLÄRUNGSMODEL: EINTRAG VON BLASEN

oder komplexer ...

Beispielsweise zum Effekt des Blasenetrages durch Wellen bei der Unterwasserkommunikation.

Modell Wassertank und nur der eine Effekt wird erklärt durch Eigenversuch erklärt.

Jedes Modell hat sein Fundament mit Einschränkungen: Skalierbarkeit der Frequenz mit Blasengröße nicht gegeben.



Das Fundament aller numerischen hydroakustischen Modellierungen ist die Wellengleichung, abgeleitet aus der Hydrodynamik und der adiabatischen Beziehung von variierender Dichte bezüglich Ort und Zeit

Aus der Massenerhaltung und Euler'schen Gleichung ergibt sich

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \rho v \text{ und } \frac{\partial v}{\partial t} + v \nabla v = -\frac{1}{\rho} \nabla p(\rho)$$

mit der Reihenentwicklung unter Ausnutzung der Schallgeschwindigkeit  $c$  :

$$p = p_0 + \rho' c^2 + \frac{1}{2} (\rho')^2 c^4 + \dots$$

Numerische Lösung partiellen Gleichungssystems scheitert neben der Komplexität bereits an der Randproblematik, dass die Schallgeschwindigkeit im Sediment und Wasserkörper nicht in jedem Diskretisierungspunkt zu jedem Zeitpunkt bekannt ist, zudem ständig mit Strömung, Sonneneinstrahlung, Seegang usw. - also dem Unterwasserwetter - variiert.

## MATHEMATISCHE MODELLE DES SIGNALWEGES IM WASSER

### Modellierung des Signalweges

- Techniken mittels Finiten Differenzen und Finiten Elementen

- Techniken mittel Normalmoden [Basis:  $\sin * \sin$  ]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \rho(z) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2(z)} p = -\frac{1}{2\pi r} \delta(r) \delta(z - z_{TX}). \quad \text{Helmholtz}$$

- Techniken mittels Wavenumber Integration [Basis: Hankelfunktionen]

$$\Delta p(x) - \left( k^2 - \frac{\omega^2}{c^2(x)} \right) p(x) = -\delta(x - x_{TX})$$

- Techniken mittels Parabolic Equations

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + 2ik_0 \frac{\partial \psi}{\partial r} + k_0^2 (n^2 - 1) = 0.$$

- Techniken mittels Strahlenansatz

$$\Delta p(x) - \frac{\omega^2}{c^2(x)} p(x) = -\delta(x - x_{TX})$$

Ansatz

$$p(x) = e^{i\omega\tau(x)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\psi_j(x)}{(i\omega)^j}$$

Eingesetzt wird die Gleichung nur erfüllt, wenn gilt

1. die nichtlineare Eikonalgleichung

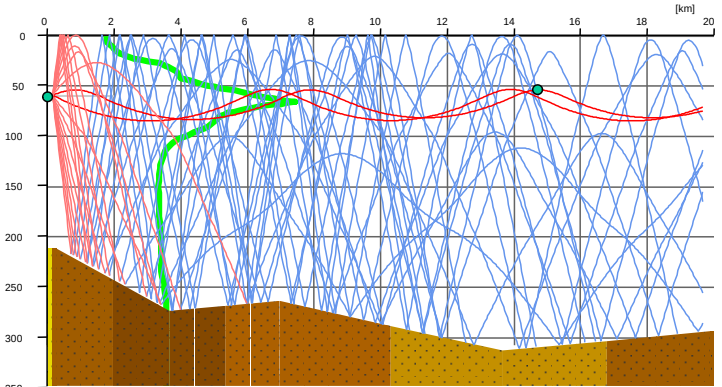
$$|\nabla\tau|^2 = \frac{1}{c^2(x)}$$

$$\psi_0\Delta\tau = -2\nabla\tau\nabla\psi_0$$

2. die Transportanfangsbedingung
3. ~~und die linearen Transportbeziehungen~~

$$\Delta\psi_{j-1} + \psi_j\Delta\tau = -2\nabla\tau\nabla\psi_j, j = 1, 2, \dots$$

werden komplett vernachlässigt  
→ Frequenzabhängigkeit entsteht



WIE BESCHREIBT MAN DIE UMWELT?

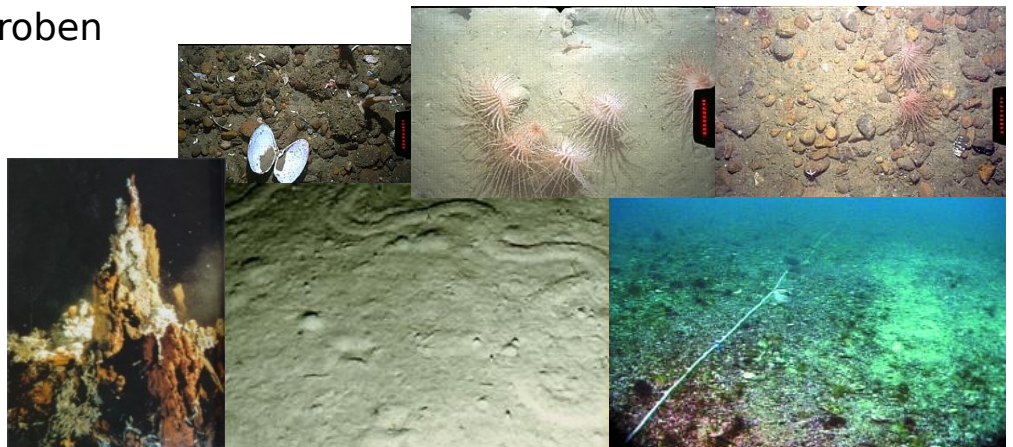
z.B. Meeresboden

- Punkte, Linien, Polygonzüge
- Analysen von Strukturen
- Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften
- Beschreibung von Proben

Vereinfachungen →  
Modellannahmen

z.B. Oberfläche /  
Seegang / Wellen

z.B. Schallgeschwindigkeit  
im Boden und  
der Wassersäule

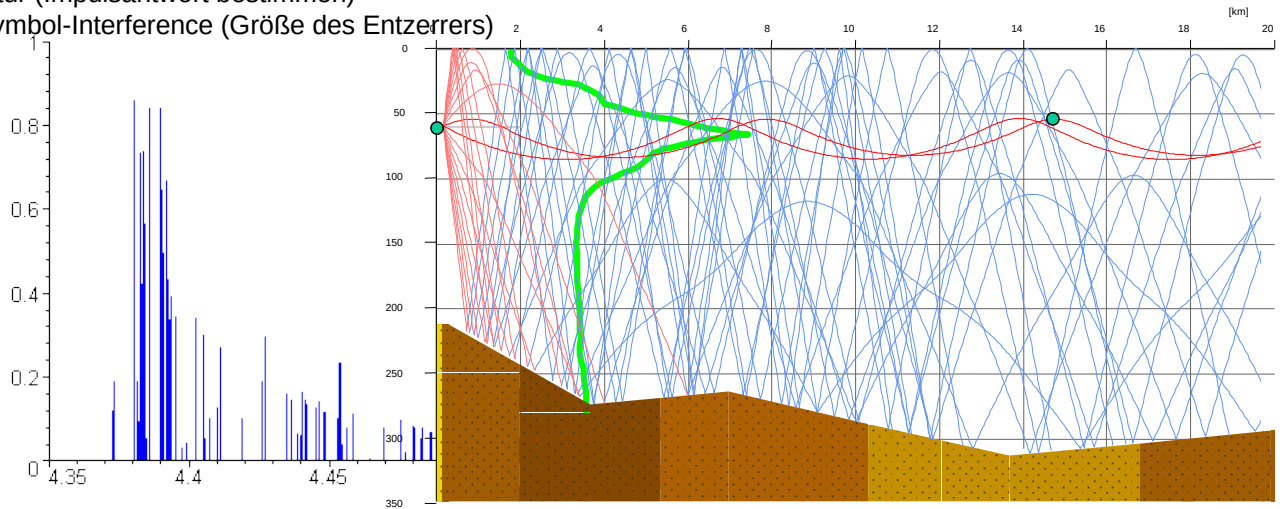


## Model based coding and decoding

Insbesondere:

Echostruktur (Impulsantwort bestimmen)

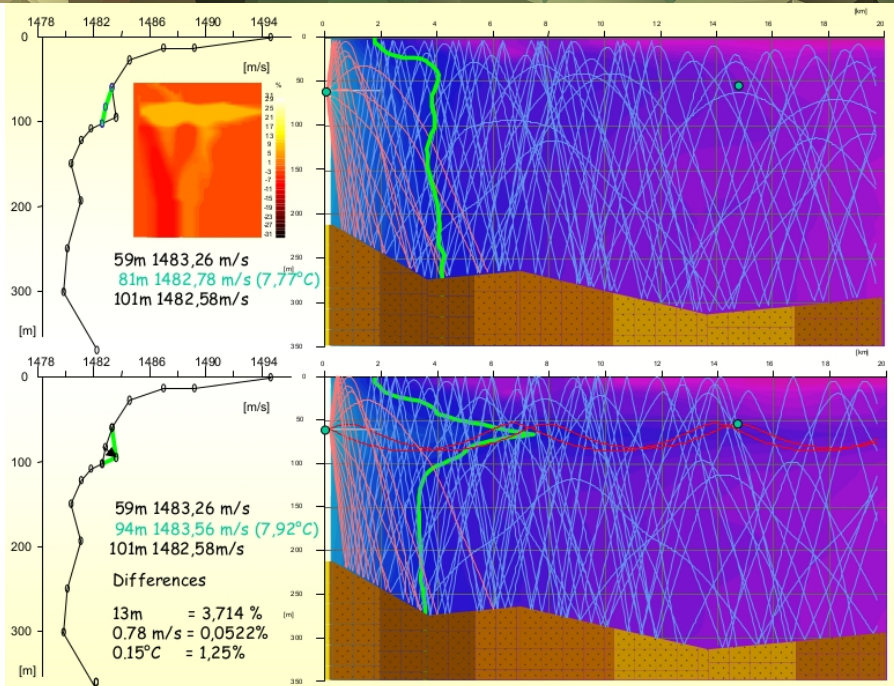
→ Inter-Symbol-Interference (Größe des Entzerrers)



## SENSITIVITÄT DER REALITÄT : WENN EINGANGSDATEN UNBEKANNT

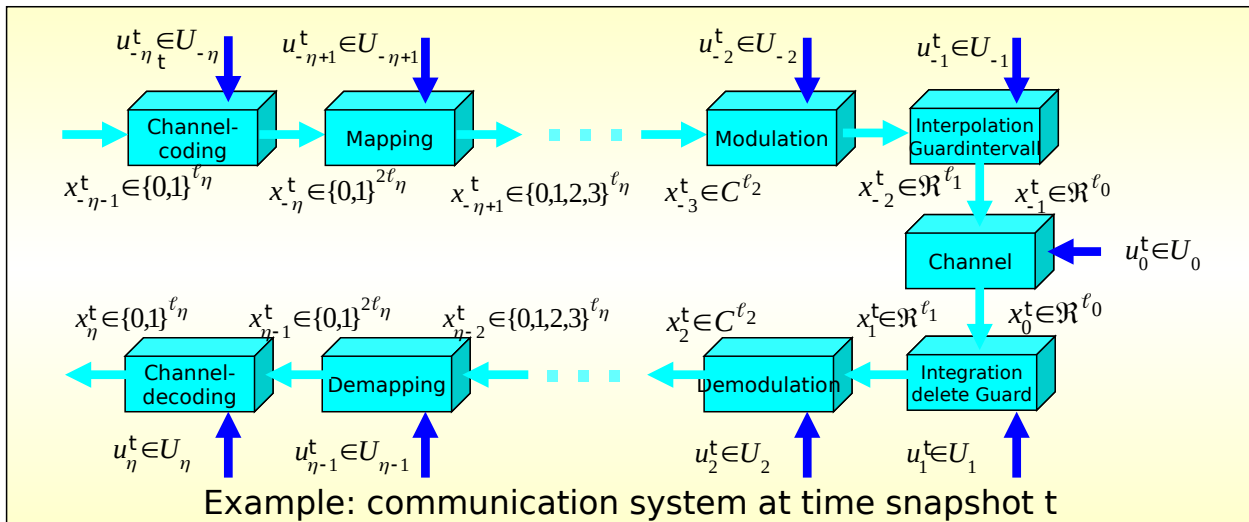
Ein Modell ist ein Instrument, das **adäquat und verlässlich** sowie zweckmäßig und ggf. effektiv ist.

Wie sinnvoll ist ein modellunterstützter Ansatz, wenn die Eingangsdaten bereits unsicher sind → GIGO

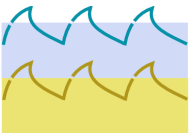


## Kompletter Prozess von der Signalgenerierung bis zur Auswertung

Beschreibungsmodell



## MODELLIERUNG IM NETZWERK BEI EINEM VERBUND VON TEILNEHMERN, ERSETZUNGSMODELLE



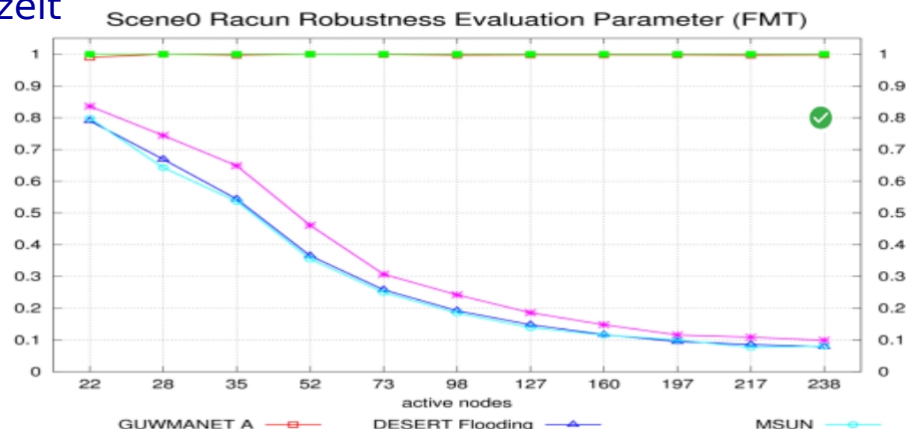
Simulator von Netzwerken (ns2) zur Modellierung von Netzwerkprotokollen unter Wasser über die Zeit Bei vorgegebenen Szenarien.

Simulatorpaket: ns2 + DESERT

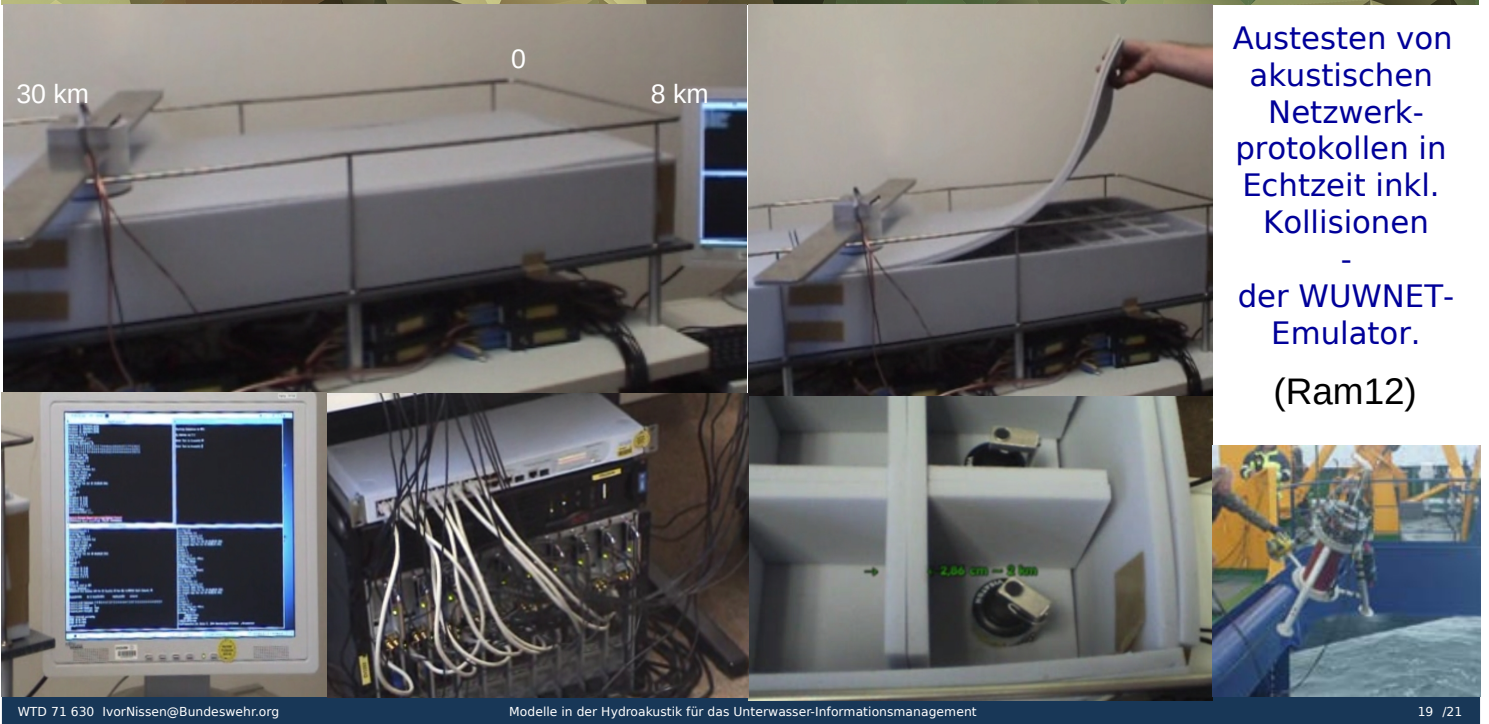
**Einschränkung:** keine Echtzeit  
Keine Kollisionen

Beispiel: verschiedene Netzwerkprotokolle in der Initialisierungsphase bei unterschiedlicher Anzahl von Knoten (bis 240)

GUWMANET, entstanden mit Fraunhofer FKIE, Bonn, seit 2010



## MODELLIERUNG IM NETZWERK : DER WUWNET-EMULATOR



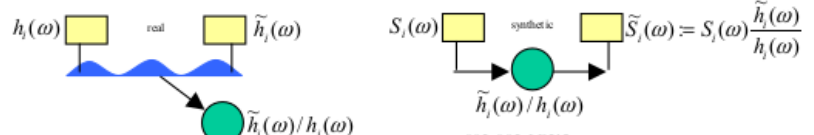
## MODELLIERUNG DURCH EINEN TESTTANK, ERSETZUNGSMODELL

Hier dient das „Arsenalbecken“ in Kiel als Modell für die offene See.  
Es können in dem Becken Experimente durchgeführt werden.  
Es gibt jedoch Einschränkungen/Unterschiede, die bekannt sein sollten.





Channel archive (Nis05)



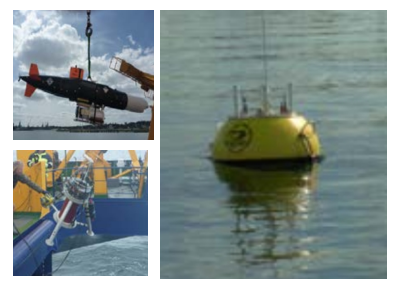
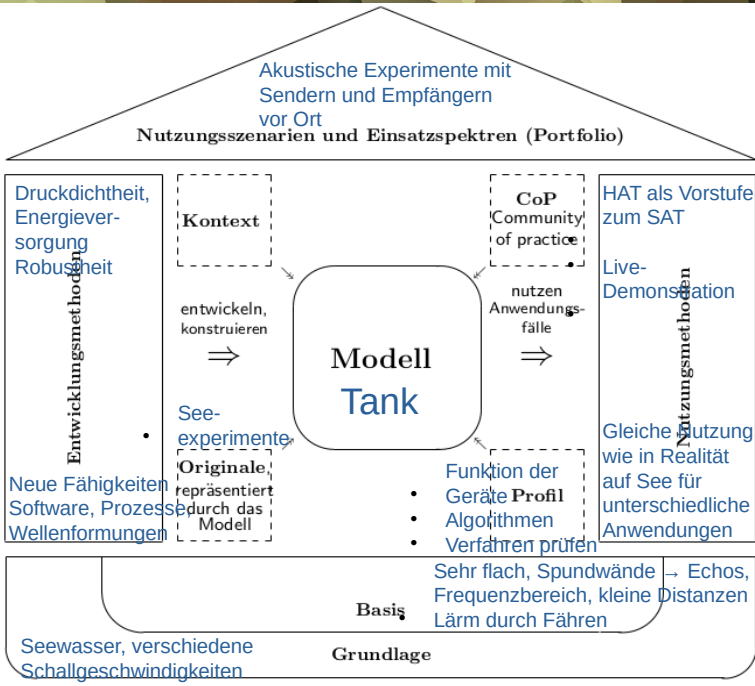
measure 005\_005\_LF512

Type	start	B	N	rate	BER	Eff
OFDM 4PSK	10095	4037	795	2542	3,57E-04	0,63
OFDM 4PSK	10664	2980	587	1565	8,93E-04	0,53
OFDM 4PSK	10684	2980	587	1409	1,79E-04	0,47
MFSK	9000	5000	1	150		0 0,03

- Messung der Übertragungsfunktion eines Schallkanales
- Abspeichern der Übertragungsfunktion
- Anwenden von synthetischen Signalen auf diese Modellkanäle
- damit Benchmark möglich
- seit 2010, WATERMARK, FFI, Norwegen



ZUSATZ: MODELLHAUS FÜR DEN TESTTANK (ARSENALBECKEN)



*Vielen Dank für die Aufmerksamkeit.*



[Mahr15] B. Mahr. *Modelle und ihre Befragbarkeit - Grundlagen einer allgemeinen Modelltheorie. Erwägen-Wissen-Ethik, forthcoming, 2015.*

[Nis05] I. Nissen. *PILOT-BASED OFDM-SYSTEMS FOR UNDERWATER COMMUNICATION APPLICATIONS, Turkey, TICA, 2005.*

[Ram12] Ramanagouda Odugoudar, IN, *Ad-hoc Network Emulation Framework for Underwater Communication Applications, Information and Coding Theory Lab (ICT), Christian-Albrechts University of Kiel, WUWNET, 2012.*

[Uri83] Robert J. Urick. *Principles of underwater sound. McGraw-Hill, 1983.*

[Wit58] L. Wittgenstein. *Philosophical Investigations. Basil Blackwell, Oxford, 1958.*

## **2. Ansatz und Anwendungen der energiebasierten Finite-Elemente-Methode**

**Boris Dilba, Sören Keuchel, Henning Lohmann, Olgierd Zaleski**  
Novicos GmbH, Hamburg

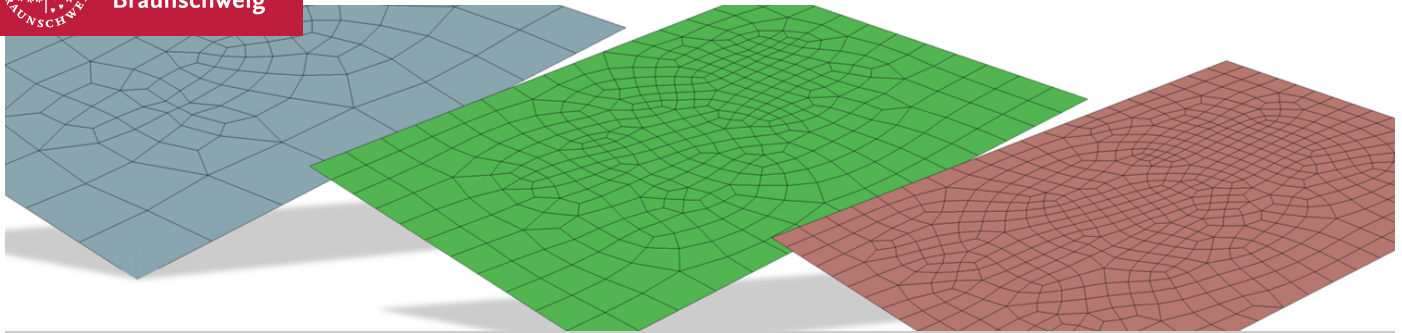
Die Berechnung von hochfrequenter Schallausbreitung und Abstrahlung stellt mit klassischen Methoden wie der Finite-Elemente-Methode (FEM) und der Randelemente-Methode (BEM) auch mit vergleichsweise hohen Rechenkapazitäten derzeit ein Problem dar. Es besteht hier die Möglichkeit, auf energiebasierte Rechenmethoden wie die Statistische Energie Analyse (SAE), oder die energiebasierte Finite-Elemente-Methode (EFEM) zurückzugreifen. Durch Beschränkung auf Energiegrößen erhält man ein Gleichungssystem mit einer im Vergleich zur FEM reduzierten Anzahl an Freiheitsgraden. Zudem kann eine gröbere Diskretisierung gewählt werden. Dazu werden in diesem Beitrag zunächst die mathematischen Ansätze aufgezeigt. Für die Berechnung der Schallabstrahlung von Strukturen ist die Bestimmung des Abstrahlgrades erforderlich. Dazu existieren unterschiedliche Ansätze. Diese werden untereinander verglichen und auf ihre Eignung in verschiedenen Anwendungsbereichen untersucht. Abschließend werden EFEM-Ergebnisse aus unterschiedlichen Anwendungsgebieten im Hinblick auf Genauigkeit und Rechenzeit vorgestellt.

### 3. Ein Multi-Modell-Ansatz zur Beschleunigung akustischer Berechnungen

*Tobias P. Ring, Steffen Hoffmann, Christopher Blech, Sabine C. Langer*  
TU Braunschweig, Institut für Akustik

Gemäß dem „Modellkonzept der Erkenntnis“ bedarf jegliche Begegnung eines denkenden Wesens mit der Welt eines Modells. Findet ein Ereignis in der Realität statt und wird dieses beobachtet (oder imaginiert), so generiert die/der Beobachter/-in eine Vorstellung von diesem Ereignis. Diese Vorstellung ist bereits ein Modell in dem Sinne, dass es abbildend (d. h. Attribute des Originals enthaltend), verkürzend (d. h. Teile des Originals weglassend) und pragmatisch (d. h. nur für den Zweck dieses Ereignisses verwendbar) ist. Dies ist das Realitätsmodell. Basierend auf dem Realitätsmodell erstellen Ingenieure/-innen häufig weitere Modelle: Das mathematische Modell beschreibt das Realitätsmodell mit Differenzialgleichungen; das numerische Modell ermöglicht Näherungslösungen des mathematischen Modells; eine Implementierung ermöglicht die Berechnung konkreter Ergebnisse mit Computern. Auf allen genannten Ebenen sind jeweils eine Mannigfaltigkeit an Modellen für einen Zweck möglich, die/der Modellierer/-in wählt basierend auf der Erfahrung geeignete Modelle aus. Die Auswahl auf allen Ebenen beeinflusst das Ergebnis der Untersuchung.

Eine Alternative besteht im Ansatz eines Multi-Modell-Verfahrens. Dabei werden durch die/den Anwender/-in nur Modellalternativen definiert, das Verfahren wählt das jeweils geeignetste Modell für eine bestimmte Fragestellung aus; dabei kann zwischen hoher Effizienz und hoher Genauigkeit abgewogen werden. Der vorliegende Beitrag stellt zunächst den Modellierungsprozess vor und leitet aus diesem Möglichkeiten zur Erzeugung alternativer Modelle ab. Das Verfahren wird auf ein Berechnungsbeispiel aus der Strukturmechanik basierend auf Diskretisierungsverfahren angewendet. Dabei wird die Schwingungsantwort eines einfachen Systems (Balken/Platte, mehrschichtiger Aufbau) unter Verwendung mehrerer alternativer Modelle (homogenisierter Aufbau, vereinfachte/komplexe auflösende Beschreibung) berechnet.



# Ein Multi-Modell Ansatz zur Beschleunigung akustischer Berechnungen

Herbstworkshops des *FA Physikalische Akustik* innerhalb der DEGA

Tobias P. Ring, Steffen Hoffmann, Christopher Blech, Sabine C. Langer, 21. Oktober 2021

Modelltheorie Erzeugung vereinfachter Modelle Berechnungen im Frequenzbereich Ein Multi-Modell Verfahren Anwendungsbeispiele Ein Modellhaus Fazit

## Was ist ein Modell?<sup>1</sup>

### Abbildungsmerkmal

- Modelle weisen Attribute eines Originals auf
- Attribute sind Eigenschaften, Merkmale und Relationen
- Abbildung (Zuordnung) ermöglicht Schluss vom Modell auf das Original

### Verkürzungsmerkmal

- Modelle verfügen nur über *Teilmenge* der Attribute des Originals
- Vereinfachungen durch *bewusstes oder unbewusstes* Vernachlässigen von Eigenschaften

### pragmatisches Merkmal

- Zuordnung zwischen Modell und Original nicht eindeutig (beliebig viele Modelle möglich)
- Modelle erfüllen Repräsentationsaufgabe nur unter Berücksichtigung ihres Zwecks

<sup>1</sup> siehe: Stachowiak, H., Allgemeine Modelltheorie, Springer, New York, 1973. (S. 57)

# Was ist ein Modell?<sup>1</sup>

## Abbildungsmerkmal

- Modelle weisen Attribute eines Originals auf
- Attribute sind Eigenschaften, Merkmale und Relationen
- Abbildung (Zuordnung) ermöglicht Schluss vom Modell auf das Original

## Verkürzungsmerkmal

- Modelle verfügen nur über *Teilmenge* der Attribute des Originals
- Vereinfachungen durch *bewusstes oder unbewusstes* Vernachlässigen von Eigenschaften

## pragmatisches Merkmal

- Zuordnung zwischen Modell und Original nicht eindeutig (beliebig viele Modelle möglich)
- Modelle erfüllen Repräsentationsaufgabe nur unter Berücksichtigung ihres Zwecks

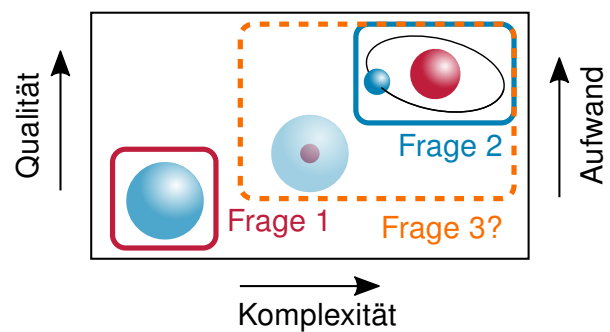
➔ Alles, was diese Merkmale aufweist, ist ein Modell!

<sup>1</sup> siehe: Stachowiak, H., Allgemeine Modelltheorie, Springer, New York, 1973. (S. 57)

# Spezifische Fragen erfordern spezifische Modelle

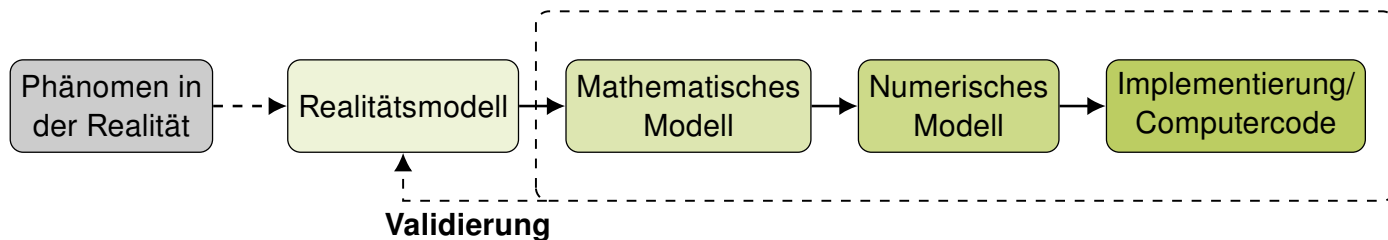
## Definition Modell<sup>2</sup>

Ein Modell ist ein vereinfachendes Abbild eines Teils der durch einen Beobachter rezipierten Realität. Es wird mit dem Ziel der Kommunikation über die Realität geschaffen.



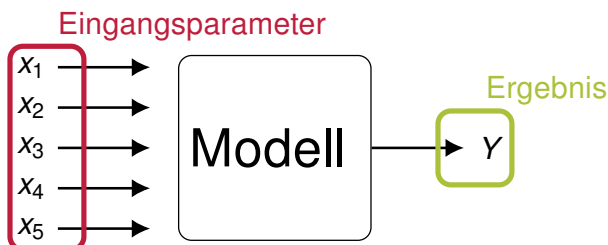
<sup>2</sup> Definition und die meisten der folgenden Folien übernommen aus Dissertationsschrift und Promotionsvortrag: Tobias P. Ring, *Effiziente Unsicherheitsquantifizierung in der Akustik mittels eines Multi-Modell-Verfahrens*. Diss., TU Braunschweig, 2019.

# Der Modellierungsprozess überführt Realität in Modelle



- Realität** ... das, was tatsächlich passiert
- Realitätsmodell** ... das, was ein Beobachter von der Realität wahrnimmt
- Mathematisches Modell** ... mathematische Beschreibung des Realitätsmodells
- Numerisches Modell** ... numerische Näherung des mathematischen Modells
- Implementierung** ... Repräsentation des numerischen Modells im Computer
- Validierung** ... Prüfung, ob die Modellierung das Realitätsmodell korrekt abbildet

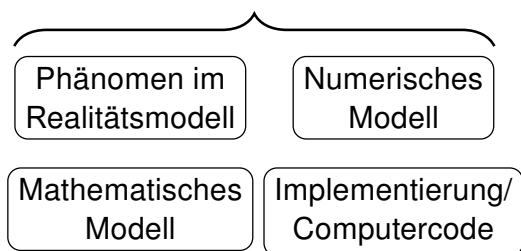
# Modelle bilden Eingangparameter auf die Ausgangsgröße ab



- Alle Ebenen des Modellierungsprozesses beeinflussen die Abbildungsfunktion des Modells
- Beeinflussung lässt sich nach den Ebenen einordnen

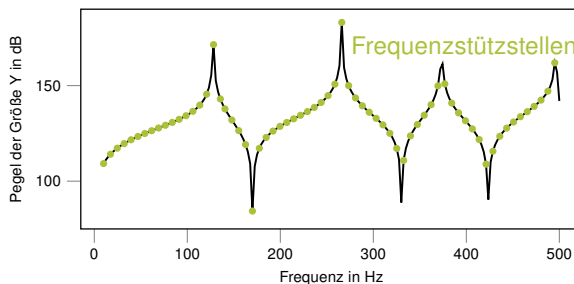
## Erzeugung alternativer Modelle

Variation der Modellierung *auf allen Ebenen des Modellierungsprozesses* möglich



# Beschleunigung von Berechnungen im Frequenzbereich

- Berechnet werden *frequenzabhängige Größen*
- Berechnungsergebnis: *Frequenzgang*
- Berechnungen erfolgen im *Frequenzbereich* für diskrete *Frequenzstützstellen*



Die allgemeine Modellfunktion

$$Y = \mathcal{M}(\mathbf{x})$$

wird um die Frequenz erweitert:

$$Y(f) = \mathcal{M}(\mathbf{x}, f)$$

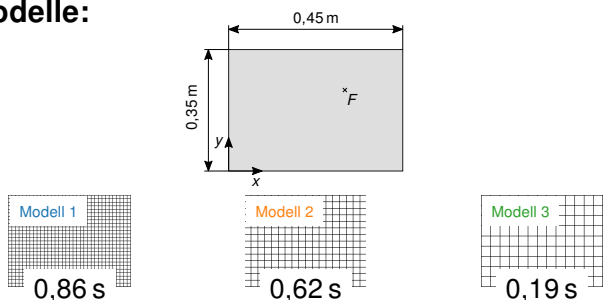
## Ziel der Arbeit

- Berechnung des Frequenzgangs eines **Referenzmodells** mit geringeren Kosten
- Maß der Kosten ist die erforderliche Rechenzeit
- Aufwandsreduktion durch Hinzunahme vereinfachter, numerischer Modelle

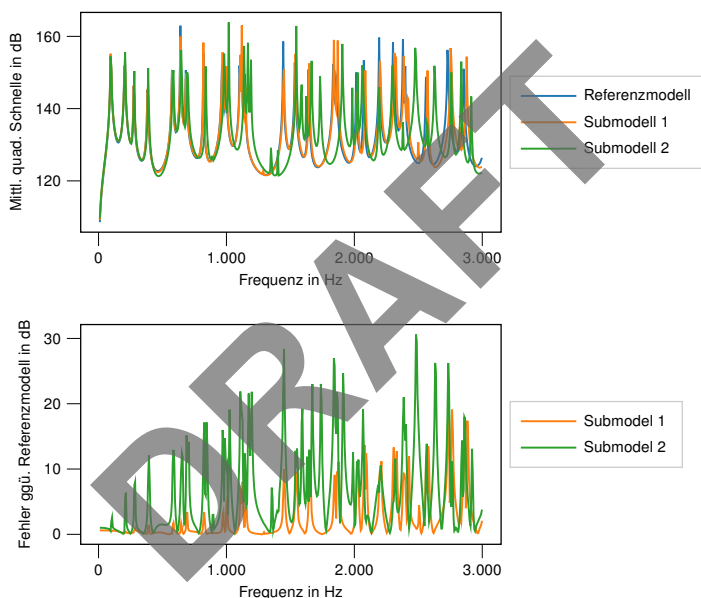
# Vorschlag für ein Multi-Modell Verfahren

- Berechnung der Frequenzantwort mit vier verschiedenen Diskretisierungen
- Fehlergrenze: 4,0 dB (gewählt)

Modelle:



**Rechenzeiterparnis**  
theoretisch ca. 13 % möglich

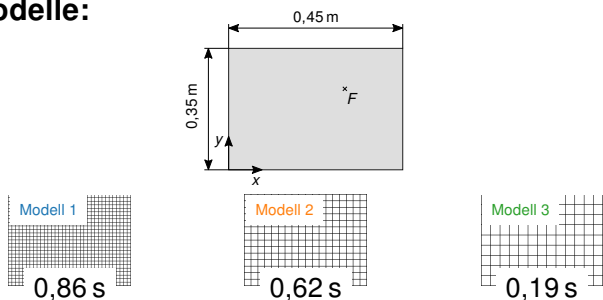




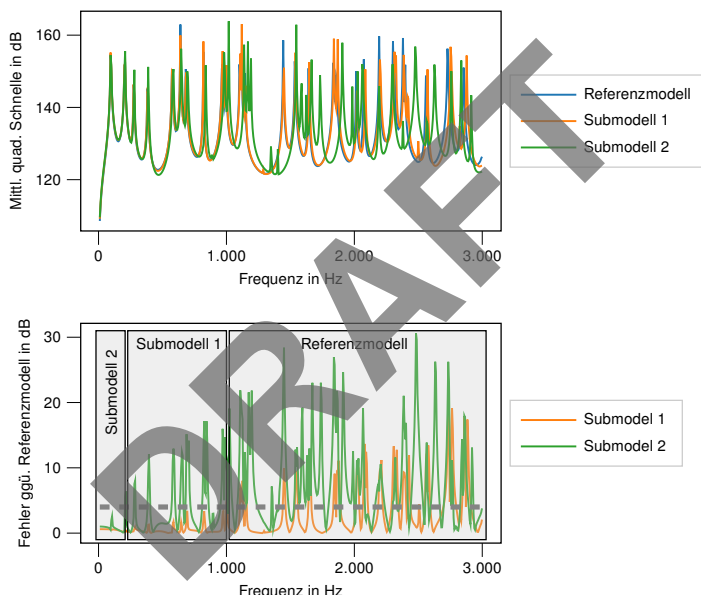
# Vorschlag für ein Multi-Modell Verfahren

- Berechnung der Frequenzantwort mit vier verschiedenen Diskretisierungen
- Fehlergrenze: 4,0 dB (gewählt)

## Modelle:



Rechenzeiterparnis  
theoretisch ca. 13% möglich

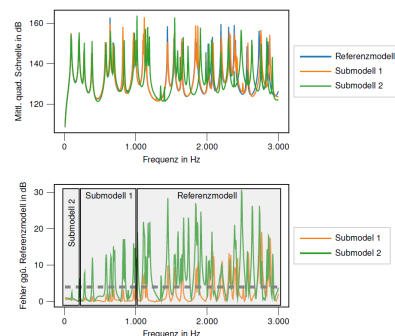


# Die Sicherung der Zeitersparnis durch Budgetplanung

**Budget:** Rechenzeit des Referenzmodells ( $B$ )

## Kosten der Modell-Management-Strategie

1. Ermittlung der Kosten aller Modelle (Kostenschätzung)  $\Theta^{KS}$
2. Bestimmung der Frequenzgruppen  $\Theta^{FG}$
3. Identifikation einsetzbarer Modelle (Validierung)  $\Theta^{Val}$
4. Lösung mit allen einsetzbaren Modellen  $\Theta^L$



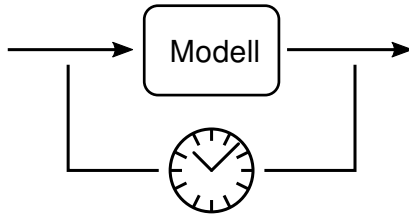
$$\underbrace{B}_{\text{Rechenzeit Referenzmodell (Budget)}} \geq \underbrace{\Theta^{KS}}_{\text{Kostenschätzung}} + \underbrace{\Theta^{FG}}_{\text{Ermittlung Frequenzgruppen}} + \underbrace{\Theta^{Val}}_{\text{Validierung der Modelle}} + \underbrace{\Theta^L}_{\text{Lösung mit allen Modellen}}$$

# Ermittlung der Modellkosten durch Messung der Rechenzeit

Rechenzeit/ Frequenzstützstelle ist unabhängig von der Frequenz (Annahme)



Ermittlung der Kosten aller Modelle durch Zeitmessung an einer Frequenzstützstelle



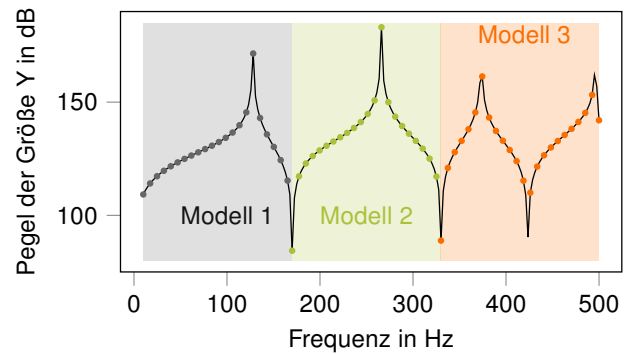
**Referenzmodell:** Budget ist bekannt  
**Vereinfachte Modelle:** Einsatz ist planbar



Kosten:  $\Theta^{KS}$   
 Kostenschätzung

# Kosten zur Lösung ist Summe über alle Bereiche

$$\underbrace{\Theta^L}_{\text{Lösung mit allen Modellen}} = \underbrace{n_{f,1} \theta_1}_{\text{Kosten für Modell 1}} + \underbrace{n_{f,2} \theta_2}_{\text{Kosten für Modell 2}} + \underbrace{n_{f,3} \theta_3}_{\text{Kosten für Modell 3}}$$



$n_{f,1-3}$  Anzahl Frequenzstützstellen Modell 1 – 3  
 $\theta_{1-3}$  Kosten Modell 1 – 3 (je Frequenzstützstelle)

$\underbrace{\Theta^L}_{\text{Lösung mit allen Modellen}}$

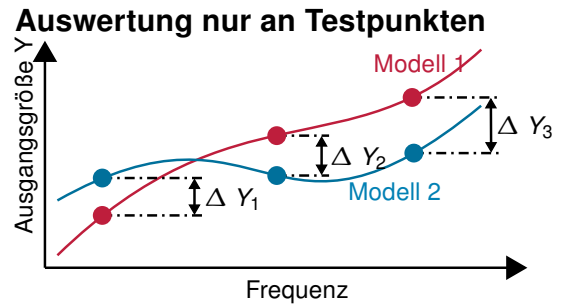
Anzahl Frequenzstützstellen und Kosten je Modell **noch unbekannt.**

# Validierung der Modelle erfolgt anhand Differenz an Testpunkten

- Validierung: Test **gegen Referenzmodell**
- Validierungsprozess bildet *wesentliche Kosten*
- Vorgabe des **tolerierten Fehlers**  $\Delta Y_{\max}$

## Validierungskriterien $K$

- Einfache Differenz
  - Relative Differenz
  - Einfache Pegeldifferenz
  - Mittlere Pegeldifferenz
  - Bhattacharyya-Koeffizient
- $$K = K(\{\Delta Y_1, \dots, \Delta Y_j\})$$

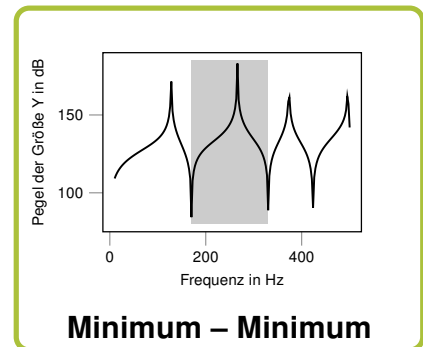
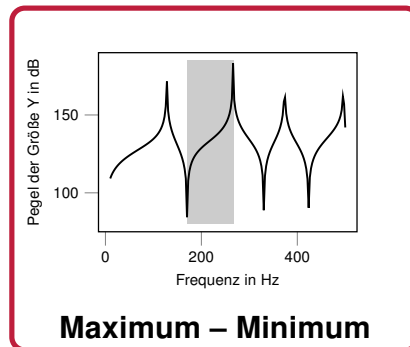


Anzahl der Testpunkte  
derart, dass Zeitersparnis  
erreichbar



# Definition der Einsatzbereiche anhand des Frequenzgangs

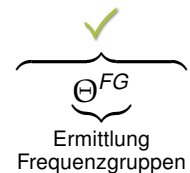
- Validierung der vereinfachten Modelle in jeder Frequenzgruppe
- Wahl der Bereiche für einfachen Validierungsprozess



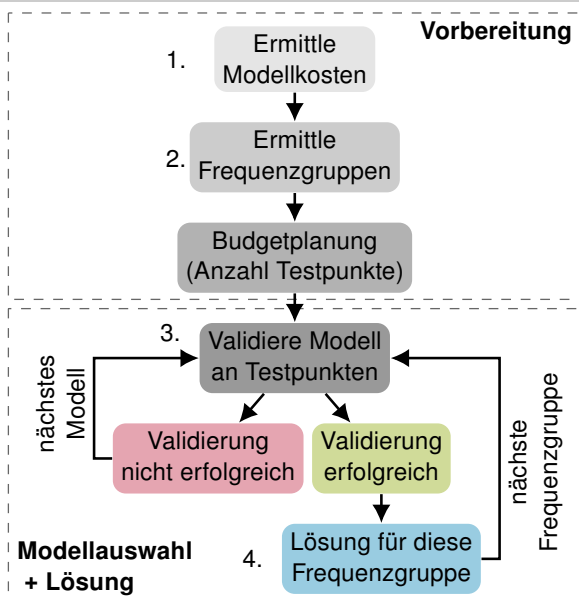
- Bekannter Frequenzgang erforderlich
- Annahme: Näherungslösung ausreichend



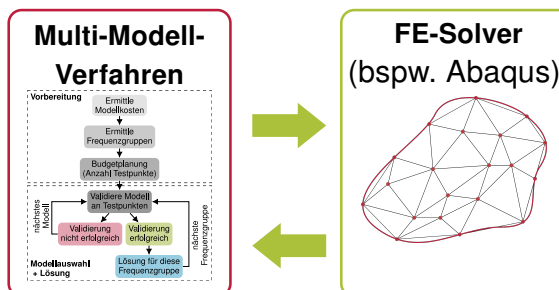
Berechnung der  
Näherungslösung mit  
**günstigstem Modell**



# Modell-Management-Strategie implementiert in Algorithmus



- Verfahren prinzipiell für alle Modellarten gültig
- Einfache Schnittstelle zur Kopplung an div. Software
- python-Implementierung + Abaqus (Solver)



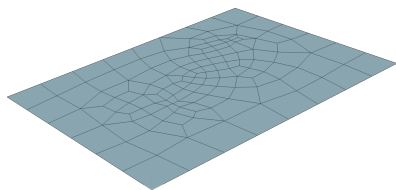
## Beispiel 1

### Variation d. numerischen Modells durch Variation der Diskretisierung

Variation der Diskretisierung = Variation des numerischen Modells

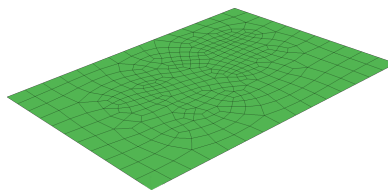
#### Submodell 2

- Elementgröße: 0,054 m
- 0,19 s / Frequenzstützstelle
- 10 Knoten /  $\lambda$  @ 500 Hz



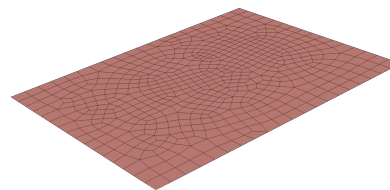
#### Submodell 1

- Elementgröße: 0,031 m
- 0,62 s / Frequenzstützstelle
- 10 Knoten /  $\lambda$  @ 1.500 Hz



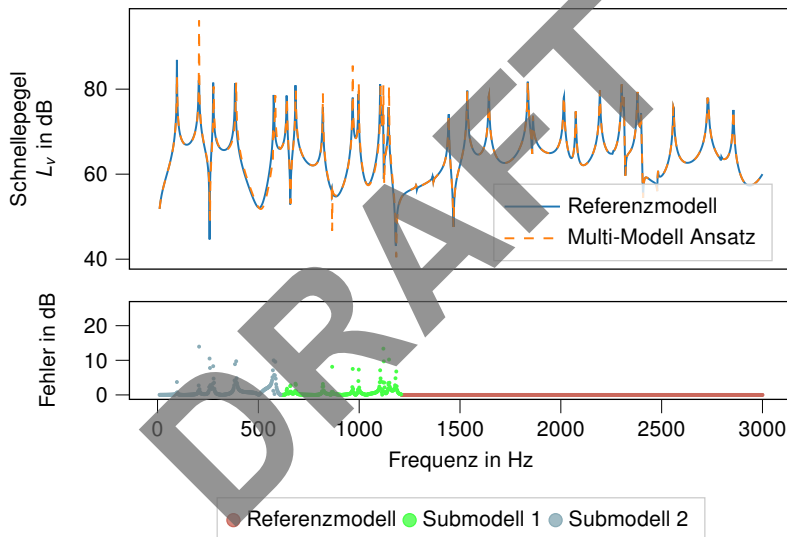
#### Referenzmodell

- Elementgröße: 0,022 m
- 0,86 s / Frequenzstützstelle
- 10 Knoten /  $\lambda$  @ 3.000 Hz



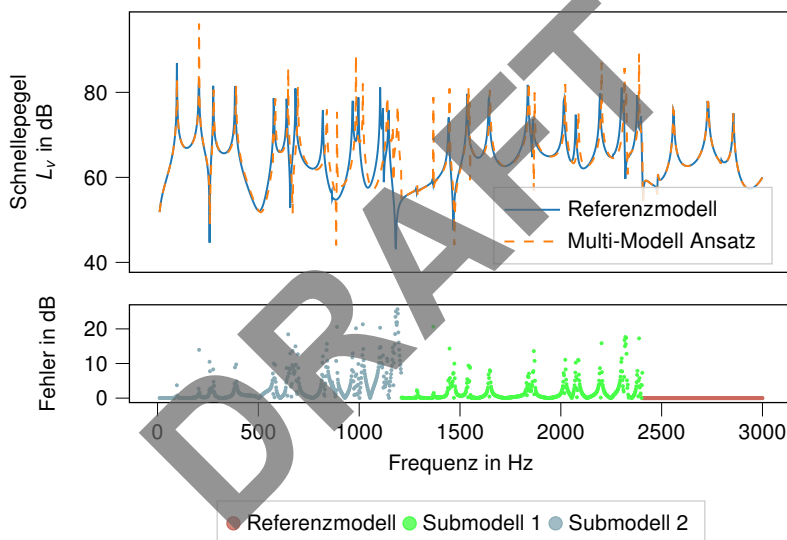
- Randbedingung: gelenkig gelagert
- Anregung: Punktkraft (harmonisch)
- Materialmodell: isotrop, linear elastisch
- Elementtyp: Shell, quadratisch

# Variation der Diskretisierung – Multi-Modell Verfahren



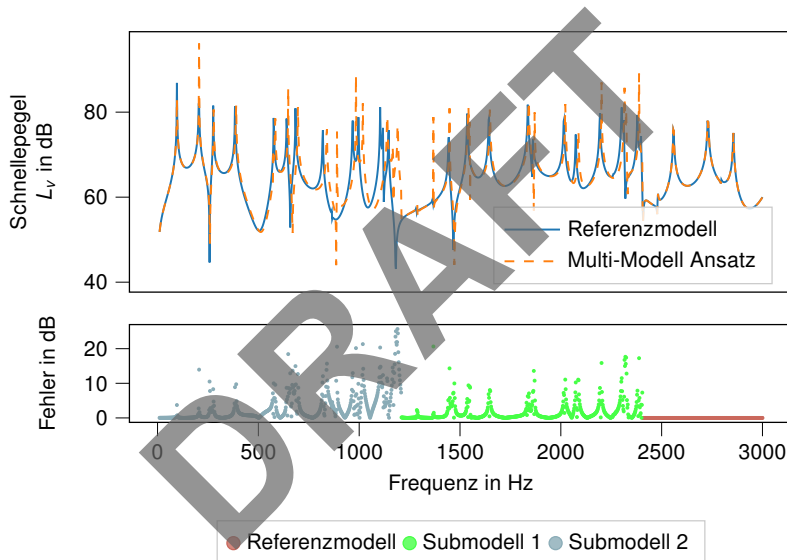
- Fehlerkriterium: Pegeldifferenz 1 dB
- Fehler:
  - Mittlerer Fehler: 0,72 dB
  - Max. Fehler: 13,95 dB
- Rechenzeiterparnis: 13,75 %

# Variation der Diskretisierung – Multi-Modell Verfahren



- Fehlerkriterium: Pegeldifferenz 3 dB
- Fehler:
  - Mittlerer Fehler: 5,99 dB
  - Max. Fehler: 25,68 dB
- Rechenzeiterparnis: 36,22 %

# Variation der Diskretisierung – Multi-Modell Verfahren



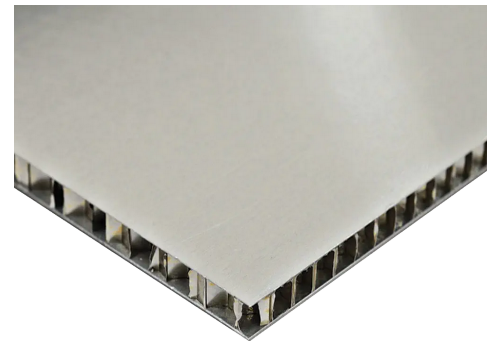
- Fehlerkriterium: Pegeldifferenz **3 dB**
- Fehler:
  - Mittlerer Fehler: 5,99 dB
  - Max. Fehler: 25,68 dB
- Rechenzeitersparnis: **36,22 %**

- Konzept ermöglicht bedarfsgerechten Einsatz der zur Verfügung stehenden Modelle
- Reduktion der Rechenzeit wird erreicht (bei akzeptablem Fehler?)

## Beispiel 2 Modellierung einer Sandwichplatte

### Aluminium-Sandwichplatte

- Verbund aus
  - Wabenkern (Distanzhalter, → Schersteifigkeit) und
  - Deckschichten (→ Biegesteifigkeit)
- Häufiger Einsatz im Leichtbau (z.B. Flugzeuge, Züge)
- Gewählte Dicke: Kern 5 mm, Deckschichten 1 mm



[aeroexpo.online]

### Mögliche Modellierungsschritte

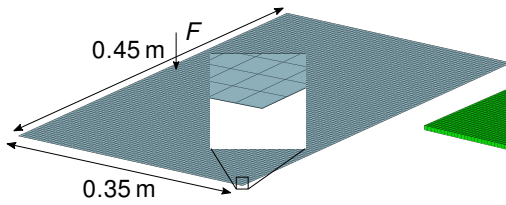
- Homogenisierung des Wabenkerns nach [1]
- Weitere Homogenisierung durch Sandwichtheorie
- Finite Elemente Diskretisierung zur Lösung der Modelle

[1] S. Malek and L. Gibson. "Effective elastic properties of periodic hexagonal honeycombs". In: Mechanics of Materials 91 (2015), pp. 226–240, 2015

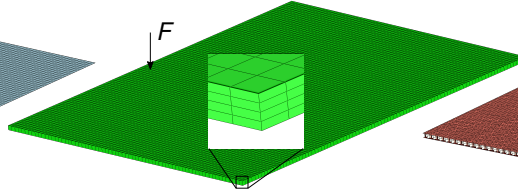
## Modellvarianten für Sandwichplatte als Variation des Realitätsmodells

Variation des Realitätsmodells / des mathematischen Modells

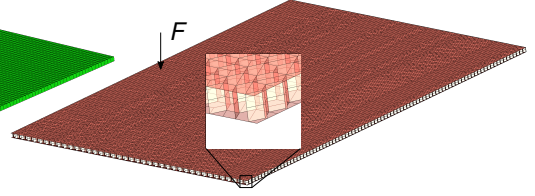
### Submodell 2



### Submodell 1



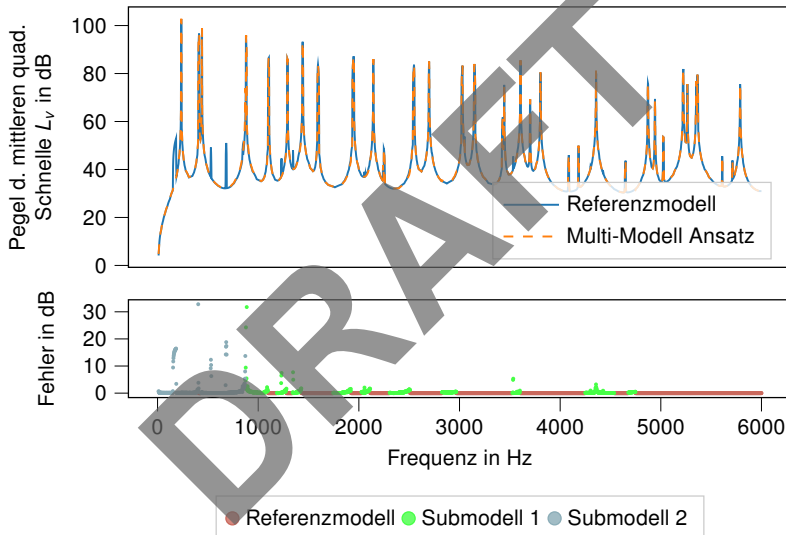
### Referenzmodell



- Homogenisiert (Mindlin-Platte) basierend auf Malek 2015
- 5,02 s / Frequenzstützstelle
- 3D Kontinuum (Kern)
- Mindlin-Platte (Deckschicht)
- 183,38 s / Frequenzstützstelle
- Auflösende Schale (Kern)
- Mindlin-Platte (Deckschicht)
- 251,58 s / Frequenzstützstelle

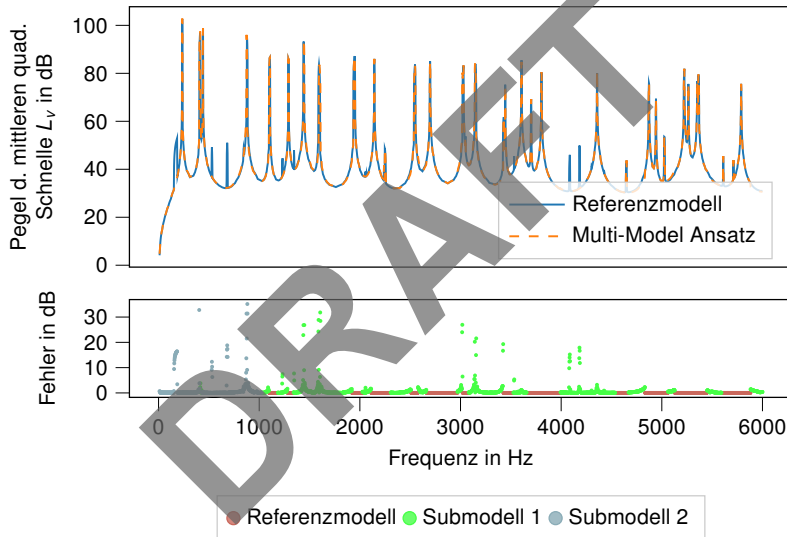
- Material: Aluminium ( $E = 70 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ ;  $\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$ ;  $\nu = 0,34$ ,  $\eta = 0,02 \%$ )
- Materialgesetz: isotrop, linear elastisch
- Anregung: Punktkraft (harmonisch)

## Variation des Realitätsmodells – Multi-Modell Verfahren



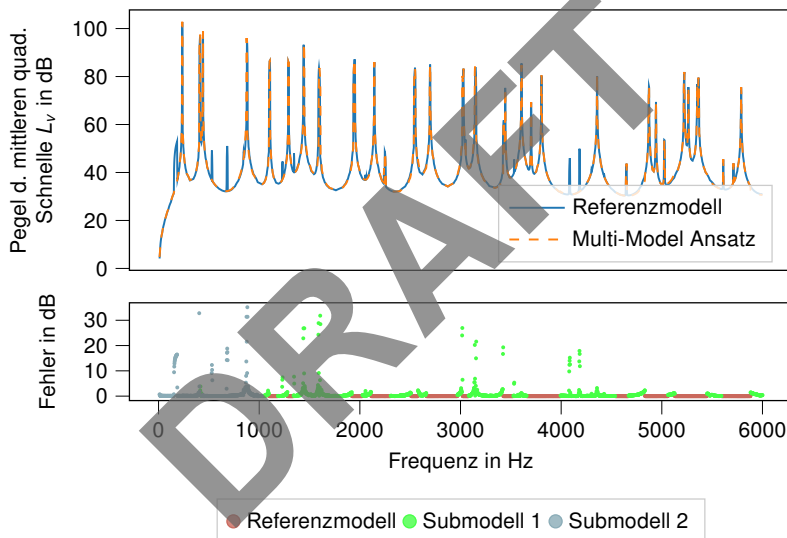
- Fehlerkriterium: Pegeldifferenz 1 dB
- Fehler:
  - Mittlerer Fehler: 4,03 dB
  - Max. Fehler: 32,79 dB
- Rechenzeiterparnis: 15,44 %

# Variation des Realitätsmodells – Multi-Modell Verfahren



- Fehlerkriterium: Pegeldifferenz 3 dB
- Fehler:
  - Mittlerer Fehler: 7,8 dB
  - Max. Fehler: 35,15 dB
- Rechenzeiterparnis: 21,35 %

# Variation des Realitätsmodells – Multi-Modell Verfahren

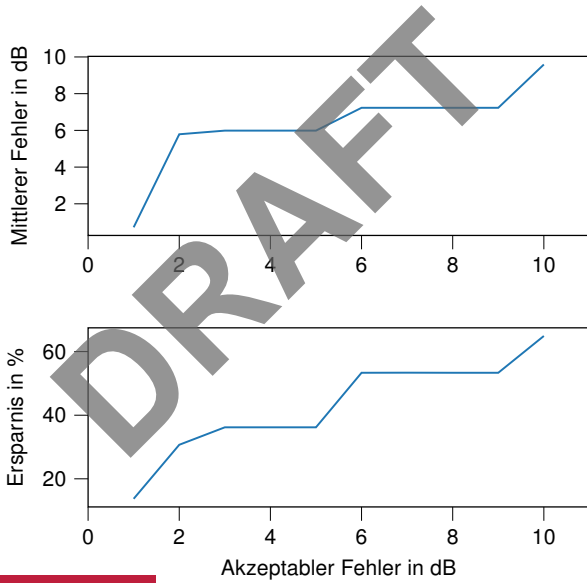


- Fehlerkriterium: Pegeldifferenz 3 dB
- Fehler:
  - Mittlerer Fehler: 7,8 dB
  - Max. Fehler: 35,15 dB
- Rechenzeiterparnis: 21,35 %

- Modelle werden automatisiert geeignet eingesetzt
- Fehler wird durch Abweichungen in den Resonanzstellen dominiert



# Variation des akzeptierten Fehlers

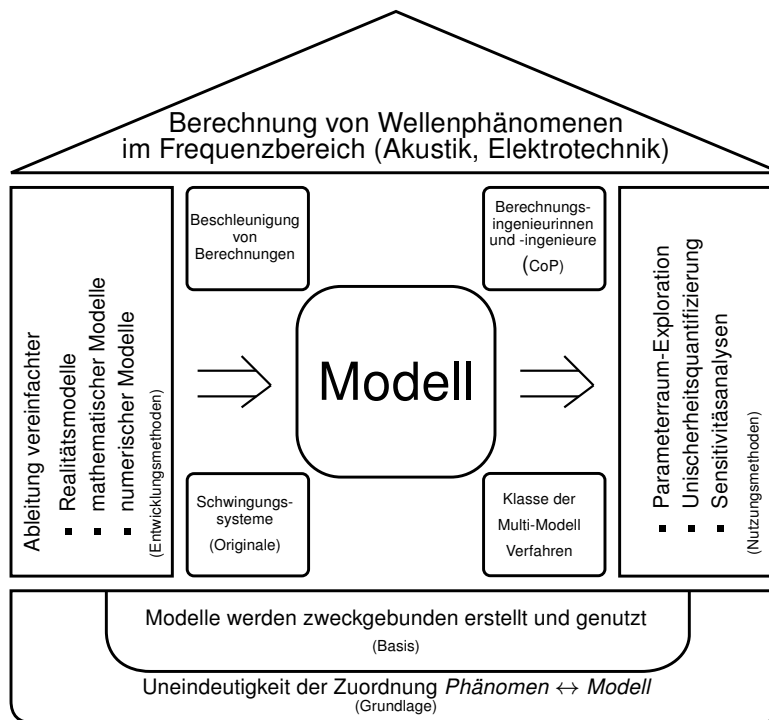


- Nutzung von Plattenmodell aus Bsp. 1
- Variation des tolerierbaren Fehlers



- Anstieg von resultierender Fehler und Rechenzeiterparnis
- Abwägung genaue / schnelle Lösung möglich

# Modellhaus



# Fazit und Ausblick

## Fazit

- Modelle sind (nur) zweckgebunden sinnvoll einsetzbar
- dem Zweck angepasste Modellierungen ermöglichen eine Aufwandsreduktion
- Anpassung an den Zweck sind auf allen Ebenen des Modellierungsprozesses möglich

## Ausblick

- Ausbau des Verfahrens
  - hinsichtlich frequenzabhängiger Fehlerschranken
  - Hinzunahme von Ingenieurwissen zur Modellauswahl
- Untersuchung geeigneter Fehlerkriterien  
(bspw. Robustheit ggü. geringer Verschiebung von Resonanzen)
- Idee: Nutzung von Machine-Learning zur Modellauswahl

## **4. Gekoppelte elektrodynamische und mechanische Modelle zur Berechnung von Oberflächenwellen in akustischen Mikrosystemen**

*Stefan Jacob*

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

# 5. Überströmte Schallabsorber

*Anita Schulz*

TU Berlin, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik

# Modellierung von überströmten Schallabsorbern

Anita Schulz

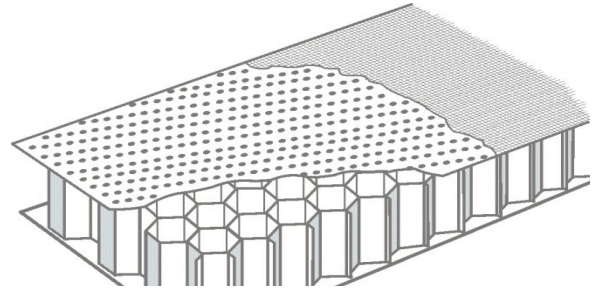
26. DEGA Workshop „Physikalische Akustik“, Bad Honnef

21.10.2021

Technische Universität Berlin,  
FG Turbomaschinen- und Thermoakustik

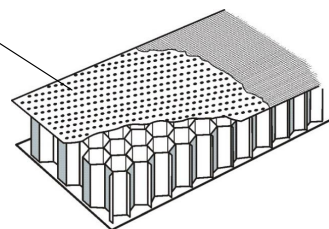


Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Abteilung Triebwerksakustik



26. DEGA-Workshop „Physikalische Akustik“ Bad-Honnef, 21.10.2021, Anita Schulz

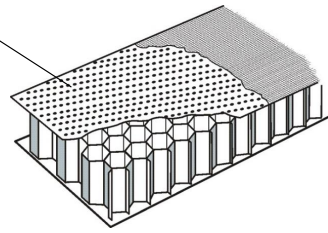
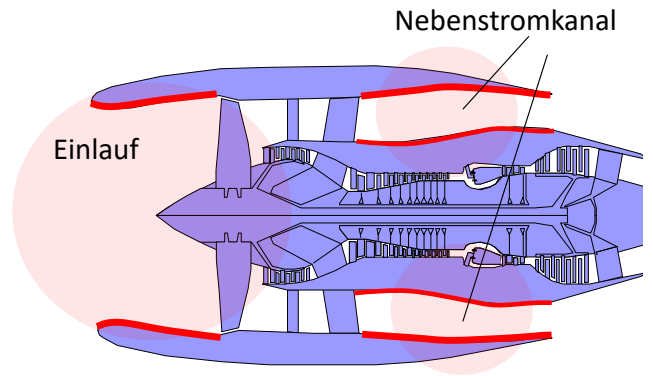
## Schallabsorber im Triebwerk



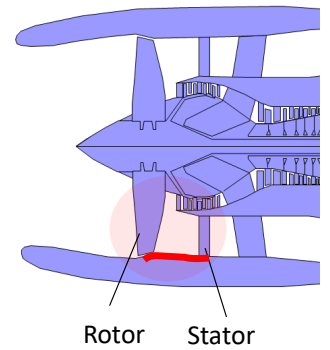
Perforierter  
Liner



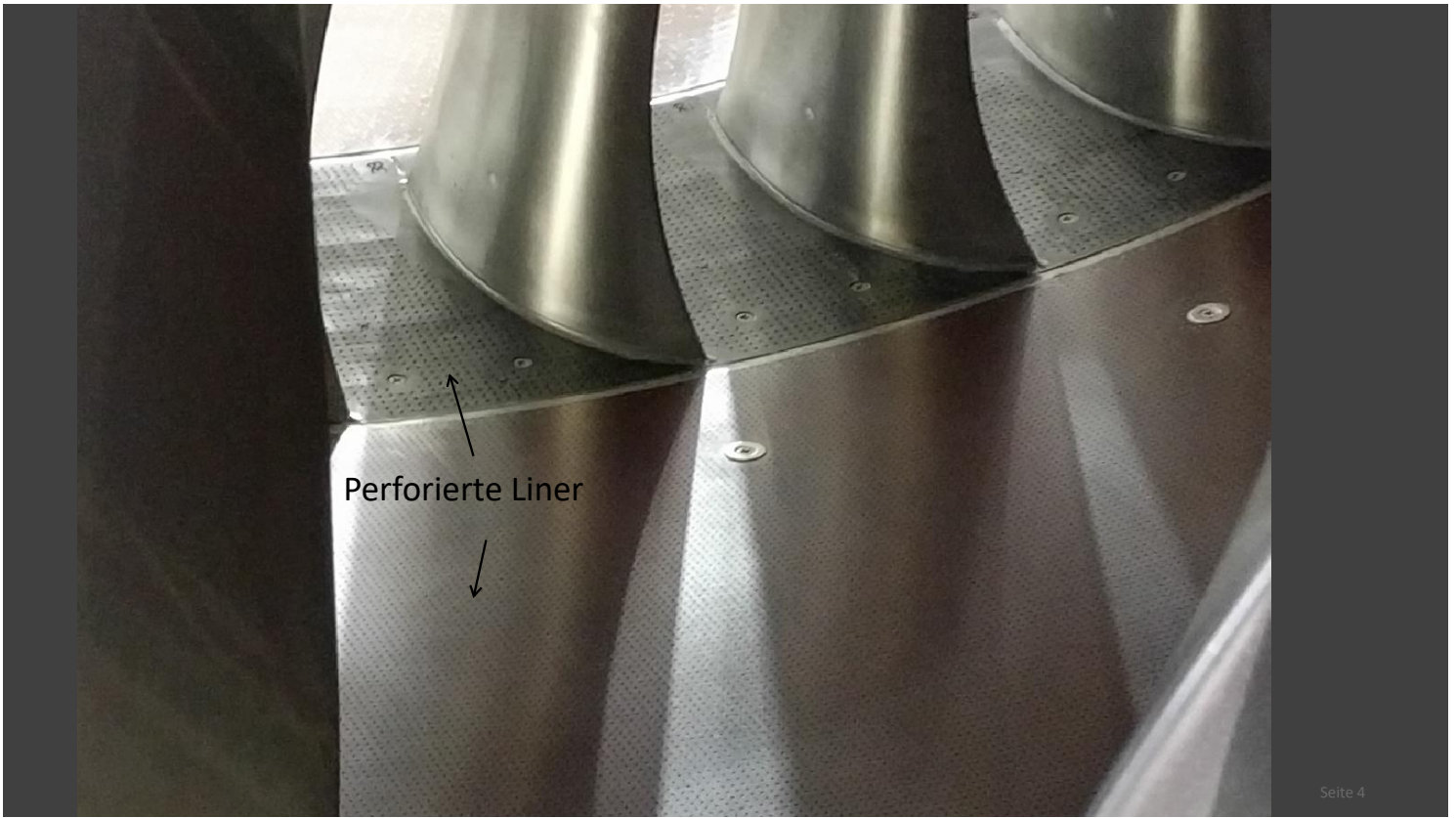
# Schallabsorber im Triebwerk



Perforierter Liner

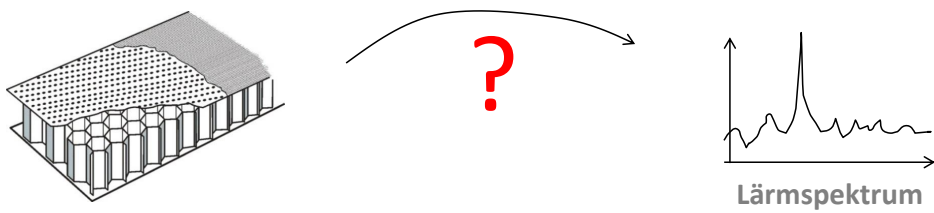


Photograph by R. Jaron, ILA 2016

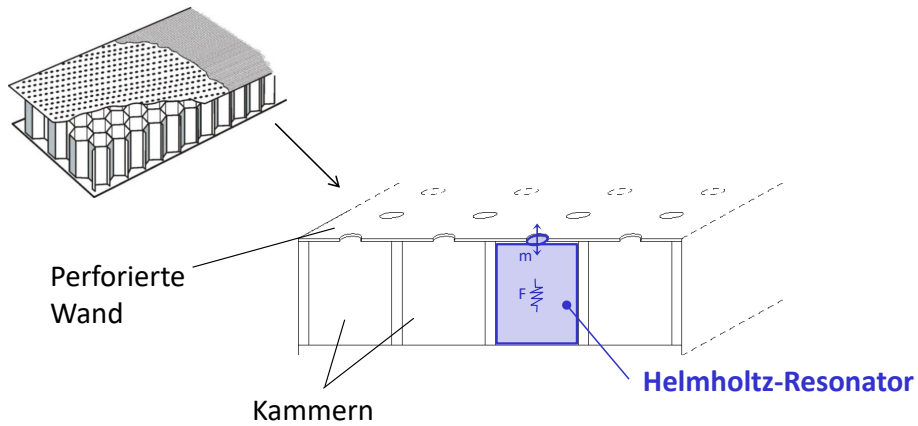


26. DEGA-Workshop „Physikalische Akustik“ Bad-Honnef, 21.10.2021, Anita Schulz

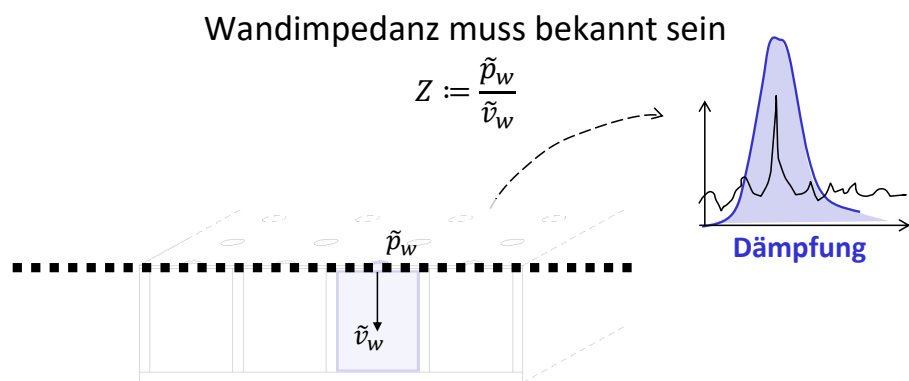
## Modellierung zur gezielten Auslegung von Linern



# Modellierung zur gezielten Auslegung von Linern

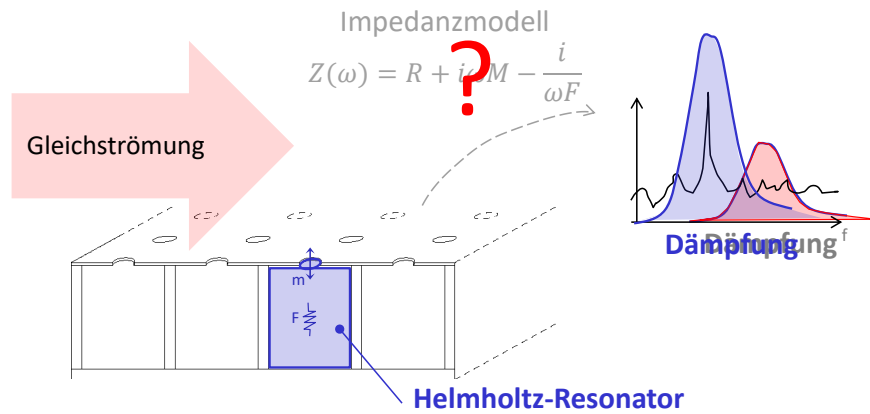


# Modellierung zur gezielten Auslegung von Linern





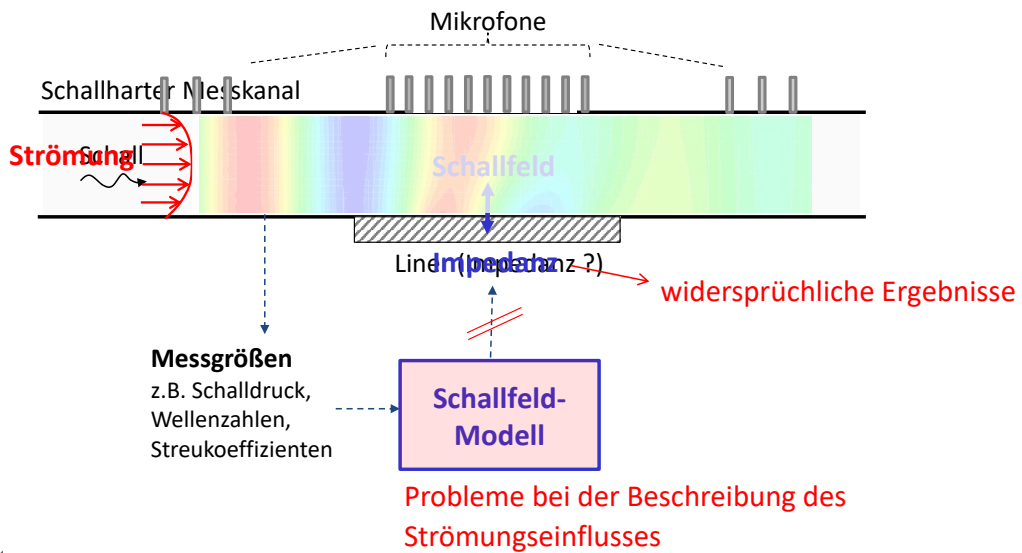
# Modellierung zur gezielten Auslegung von Linern



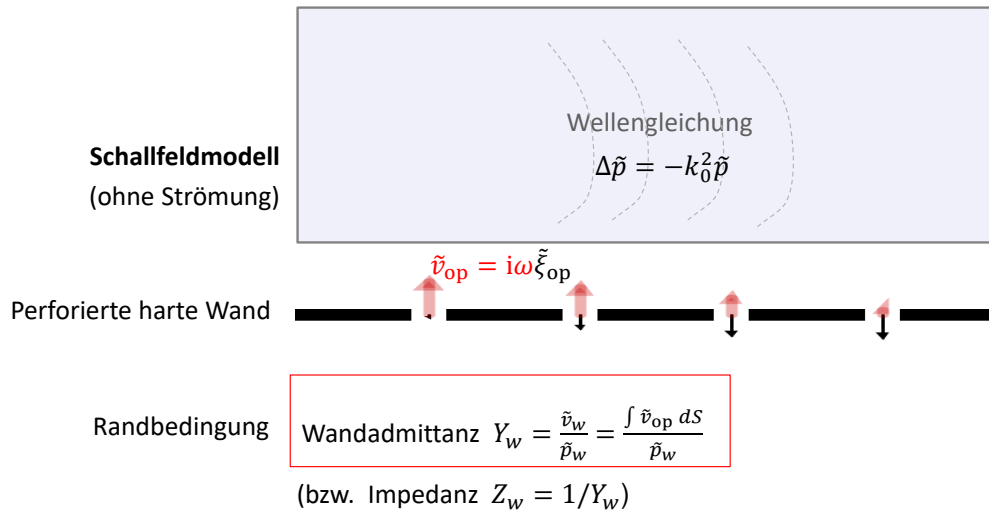
-> Probleme beim Impedanzmodell mit Strömungseinfluss



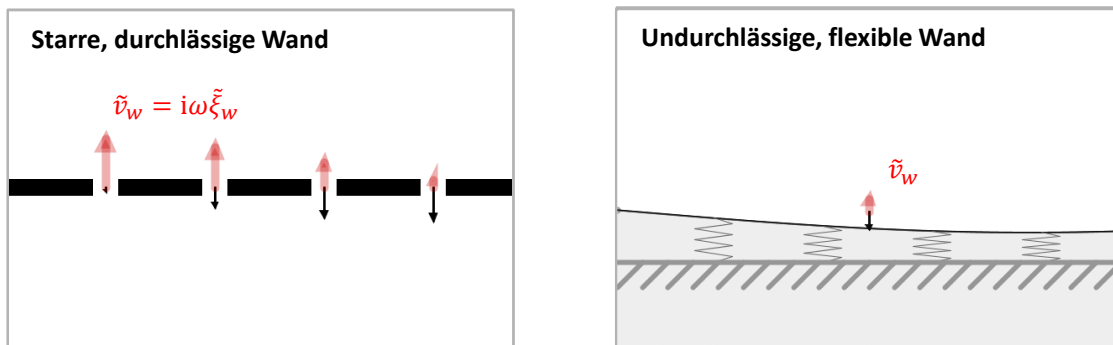
# Indirekte Impedanz“messung”



# Untersuchung des Schallfeldmodells



# Untersuchung des Schallfeldmodells



Beide Wandtypen sind äquivalent bezogen auf die Randbedingung!

Admittanz  $Y_w = \frac{\tilde{v}_w}{\tilde{p}_w}$

# Untersuchung des Schallfeldmodells

**Schallfeld mit homogener Strömung**

**Undurchlässige, flexible Wand**

**Randbedingung**

**Doppler-Verschiebung**

Konvektive Helmholtzgleichung

$$\Delta \tilde{p} = \left( ik_0 + M \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 \tilde{p}$$

$\omega' = \omega(1 - k_x M)$

$\tilde{v}_{eff} = i\omega' \tilde{\xi}_w$

$\tilde{v}_{eff} \rightarrow 0$

$\tilde{\xi}_w$

**Welche Randbedingung muss man nehmen?**

Ingard-Myers\*:  $Y_{eff} = \frac{\tilde{v}_{eff}}{\tilde{p}_w} = Y_w \left( 1 - \frac{k_x}{k_0} M \right)$



\*Keller1955, Franken&Ingard1956, Miles1957, Ribner1957, Ingard1959, Eversman&Beckemeyer1972, Tester1973, Myers1980

# Untersuchung des Schallfeldmodells

**Einschränkung**

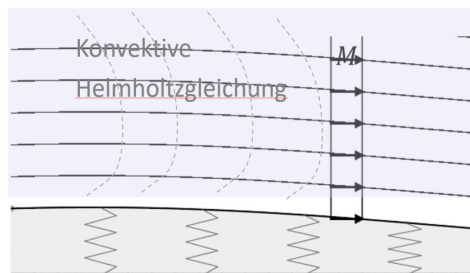
**Ingard 1959:**

shows that continuity of particle displacement cannot be replaced by continuity of velocity at  $x=0$ . The expression for the  $x$  component of the particle velocity in the fluid assumes that the boundary represents a streamline of the fluid, so that the total flow is tangential to the acoustically deformed boundary.

**Undurchlässige, flexible Wand**

**wurde ignoriert**

**Randbedingung**



Ingard-Myers\*:  $Y_{eff} = \frac{\tilde{v}_{eff}}{\tilde{p}_w} = Y_w \left( 1 - \frac{k_x}{k_0} M \right)$

**Anwendung an perforierten Linern produziert Fehler!**



\*Keller1955, Franken&Ingard1956, Miles1957, Ribner1957, Ingard1959, Eversman&Beckemeyer1972, Tester1973, Myers1980

# Verfeinerung des Schallfeldmodells

$$\frac{d^2 P}{dy^2} + \frac{2\Gamma}{1-\Gamma M} \frac{dM}{dy} \frac{dP}{dy} + k_0^2 [(1-\Gamma M)^2 - \Gamma^2] P = 0$$

**Schallfeld mit Scherströmung\***

Pridmore-Brown-Gleichung

$M$

$\delta_f$

**Perforierte harte Wand**

Randbedingung

Wandadmittanz  $Y_w = \frac{\tilde{v}_w}{\tilde{p}_w}$

Anwendung an perforierten Linern produziert ebenfalls Fehler!



\*Watson 2001, Rienstra 2001, Brambley 2011, Enghardt 2012, Jing 2015, Bodén 2017

# Verfeinerung des Schallfeldmodells

Kontinuitätsgleichung:  $\frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} + (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \tilde{p} + \rho_0 \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} = 0,$  (3.24)

Impulsgleichung:  $\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{u}} + (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{u}} + \frac{\tilde{p}}{\rho_0} (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{u}} = -\nabla \tilde{p} \frac{1}{\rho_0} + \nu \left[ \nabla^2 \tilde{\mathbf{u}} + \left( \frac{1}{3} + \frac{\mu_B}{\mu} \right) \nabla (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}}) \right] - \nabla \cdot \tilde{\mathbf{r}},$  (3.25)

Energiegleichung:  $\frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} + (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \tilde{T} = \frac{1}{c_p \rho_0} \left[ \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} + (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \tilde{p} \right] + a \nabla^2 \tilde{T} + \frac{2\nu}{c_p} \nabla \tilde{\mathbf{u}} [\nabla \tilde{\mathbf{u}} + (\nabla \tilde{\mathbf{u}})^T] - \nabla \cdot \tilde{\mathbf{q}},$  (3.26)

Gasgleichung:  $\frac{\tilde{p}}{\tilde{p}} = \frac{\tilde{p}}{\rho_0} + \frac{\tilde{T}}{\tilde{T}}.$  (3.27)

**Schallfeld mit Scherströmung, Zähigkeits- und Wärmeleitungsgrenzschicht +Turbulenz\***

Lin. Navier-Stokes-Gleichungen

$M$

**Perforierte harte Wand**

Randbedingung

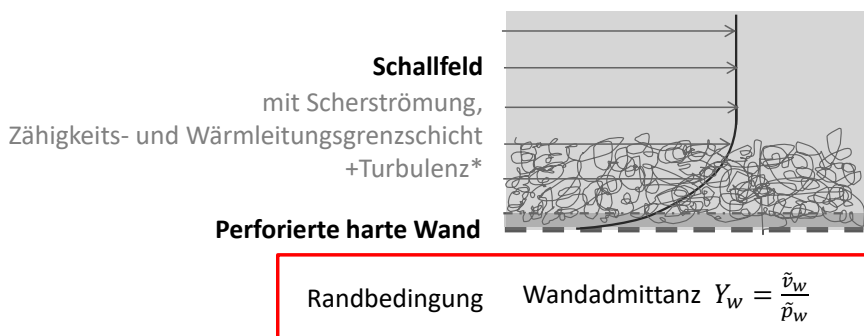
Wandadmittanz  $Y_w = \frac{\tilde{v}_w}{\tilde{p}_w}$

Anwendung an perforierten Linern produziert ebenfalls Fehler!



\*Weng et al. 2018

# Zwischenfazit

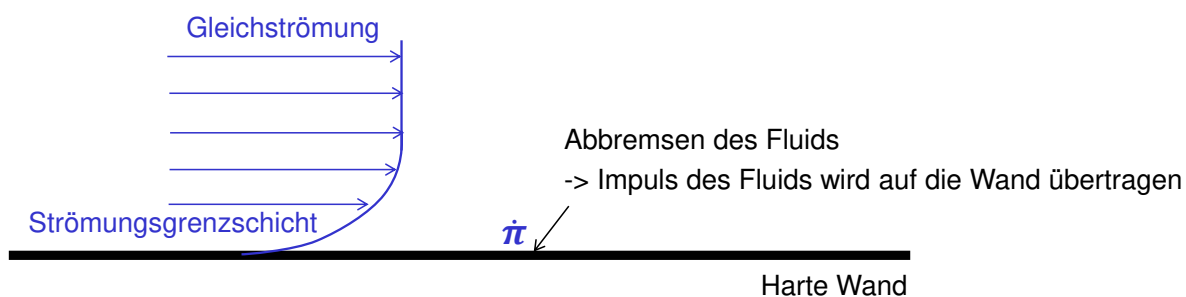


## Fundamentales Problem in der Randbedingung

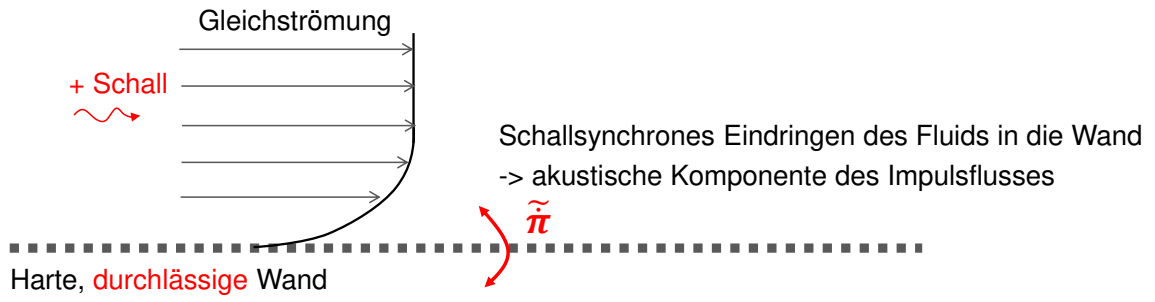
Was fehlt?



# Impulstransfer an der Wand



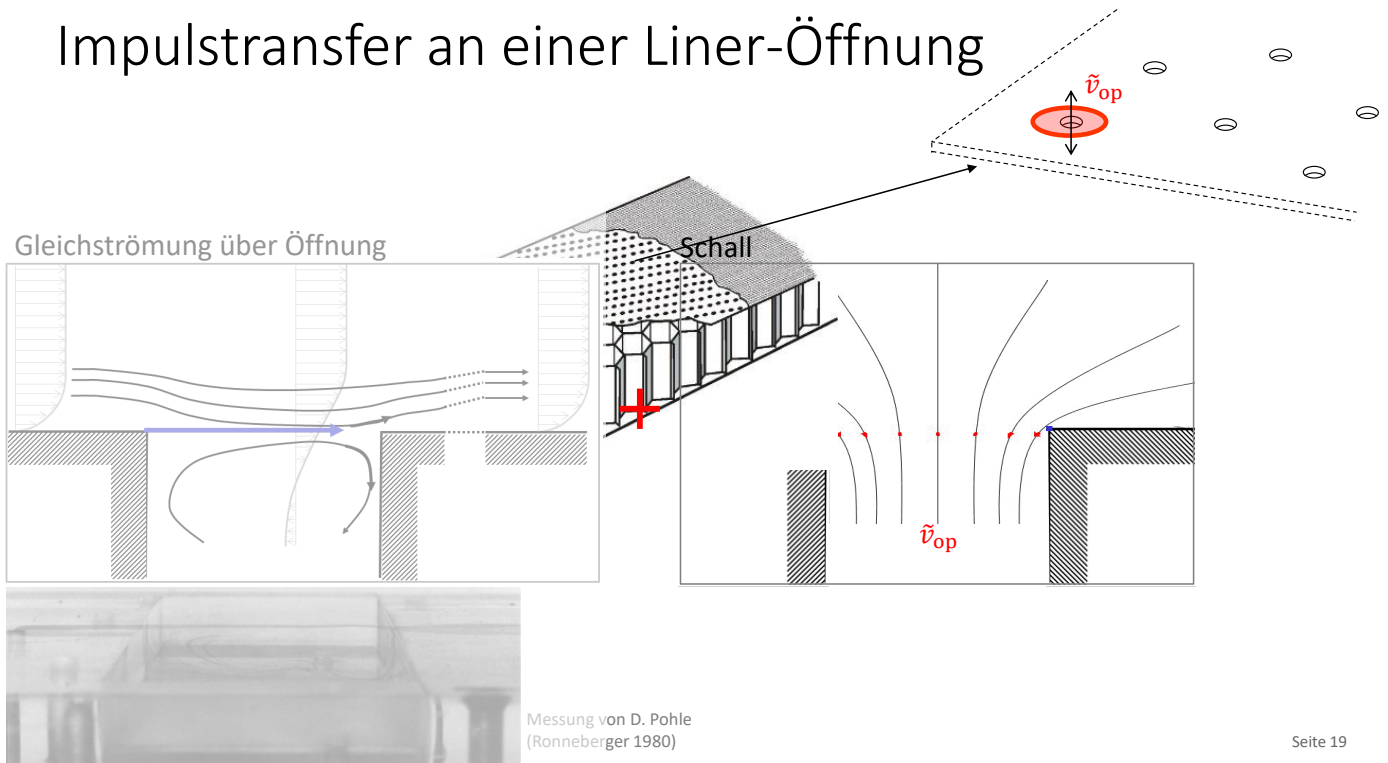
# Impulstransfer an der Wand



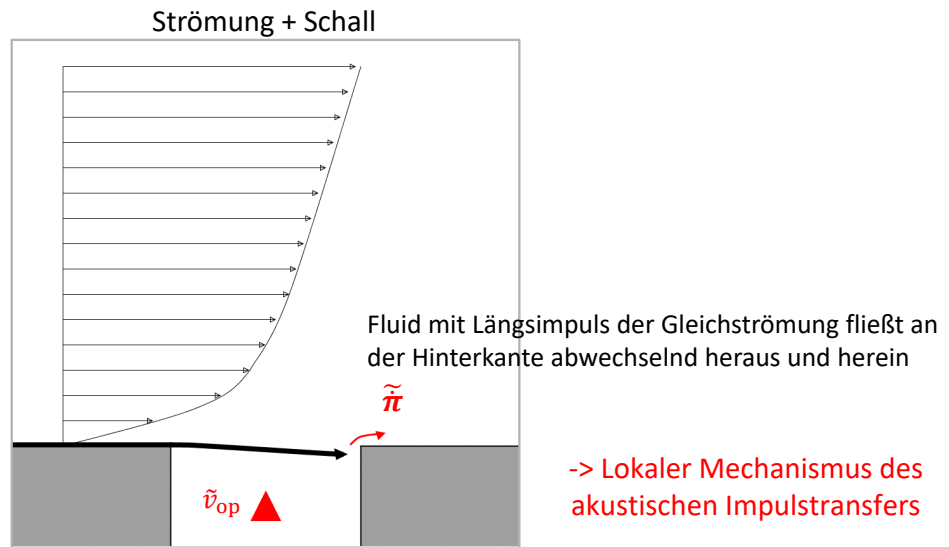
-> Quantitative und qualitative Änderung der Randbedingung



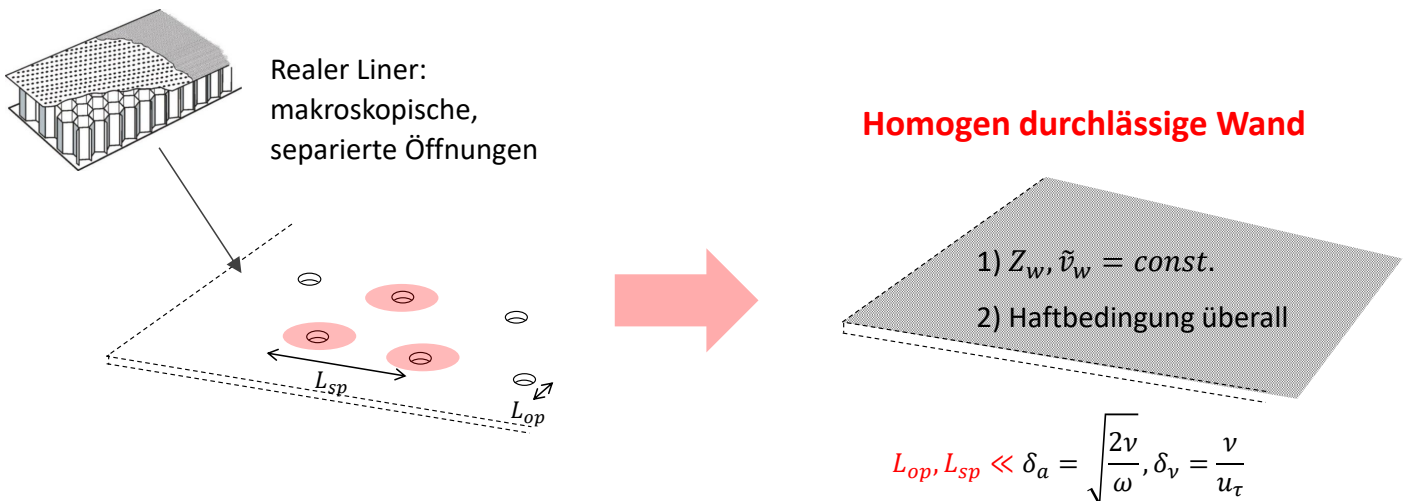
# Impulstransfer an einer Liner-Öffnung



# Impulstransfer an einer Liner-Öffnung



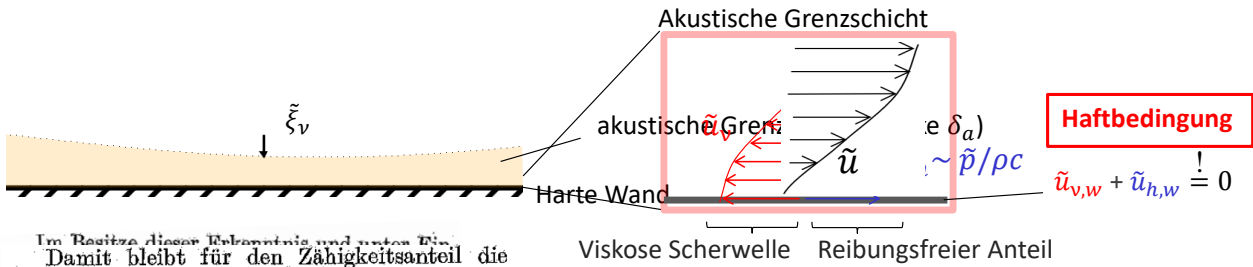
## Für die Modellierung des Impulstransfers: Idealisierung der Wand



**Über die akustische Grenzschicht vor starren Wänden**  
 Von **LOTHAR CREMER**, München.  
 (A. E. U. 2 [1948], 136–139; eingegangen am 15. Januar 1948)

# L. Cremer 1948

## Impulstransfer aufgrund der Zähigkeit



Im Besitze dieser Erkenntnis und unter die  
 Damit bleibt für den Zähigkeitsanteil die  
 homogene Differentialgleichung übrig:

$$\frac{\partial \tilde{\tau}}{\partial y} = \frac{i\rho\omega^2}{k_x} \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial y} \quad (3)$$

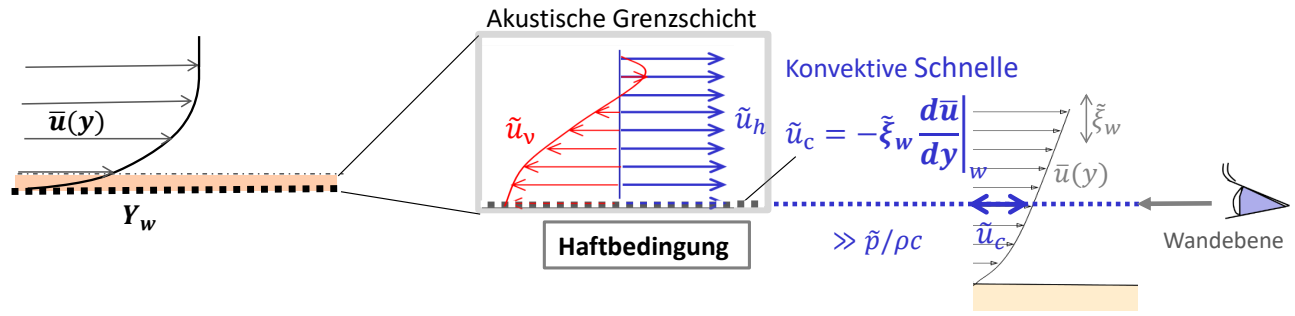
in denen die Randbedingungen gerne durch einen Wandwiderstand, d. i. Quotient aus Schalldruck  $p$  zur wandnormalen R-schnelle  $v_w$  ausgedrückt  $\rightarrow \xi_v = \frac{i k_x}{\rho\omega^2} \tilde{\tau}_w$

$\rightarrow$  Kompensation von  $\tilde{u}_h$  an der Wand durch akustische Schubkraft  $\sim \frac{\partial \tilde{\tau}}{\partial y}|_w$  mit Wandschubspannung  $\tilde{\tau}_w$

$$Y_v = \frac{i\omega\xi_v}{\tilde{p}_w} = \frac{k_x \tilde{\tau}_w}{\omega\rho\tilde{p}_w}$$



# Impulstransfer am überströmten Liner



- $\rightarrow$  Anregung einer Schubspannungswelle  $\tilde{\tau}(y)$  an der Wand durch die Haftbedingung
- $\rightarrow$  Schubspannung an der Wand  $\tilde{\tau}_w$  wächst durch Strömung um mehrere Größenordnungen

**Einfluss auf die akustische Randbedingung?**





# Modell für die akustische Randbedingung

Mit Strömung:

$$\frac{\partial^2 \tilde{\tau}}{\partial y^2} - \frac{i\omega'}{\nu} \tilde{\tau} = i\omega' \rho_0 \frac{d^2 \bar{u}}{dy^2} \tilde{\xi}$$

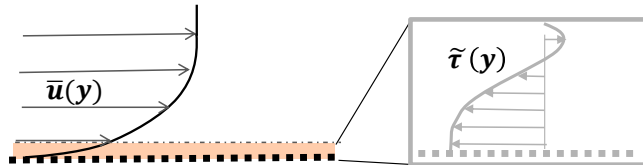
$$\frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial y} = - \frac{ik_x}{\rho_0 \omega'^2} \frac{\partial \tilde{\tau}}{\partial y}$$

Akustische Auslenkung

Akustische Schubspannung

Nichtkonstante Koeffizienten

$$\omega' = \omega - k_x \bar{u}(y)$$

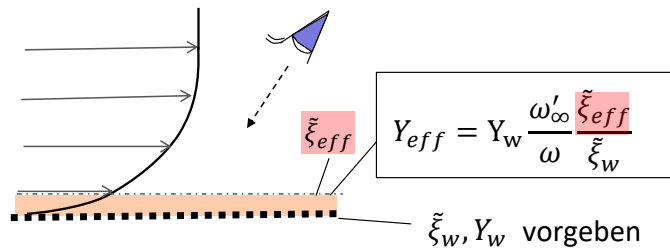


## Lösungen

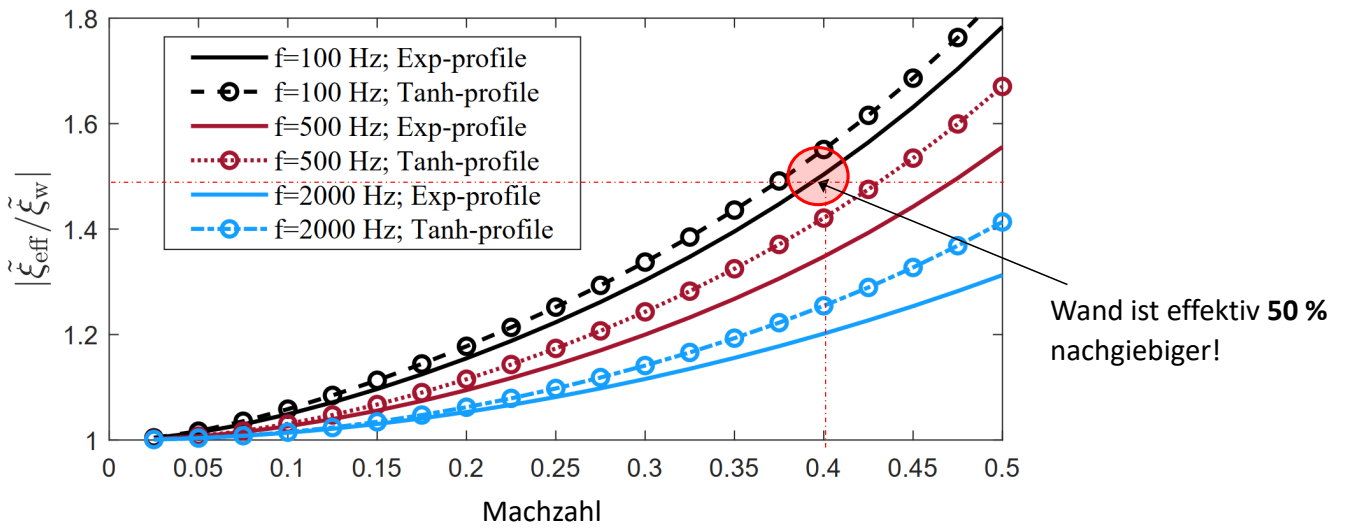
$$\frac{\partial^2 \tilde{\tau}}{\partial y^2} - \frac{i\omega'}{\nu} \tilde{\tau} = i\omega' \rho_0 \frac{d^2 \bar{u}}{dy^2} \tilde{\xi}$$

$$\frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial y} = - \frac{ik_x}{\rho_0 \omega'^2} \frac{\partial \tilde{\tau}}{\partial y}$$

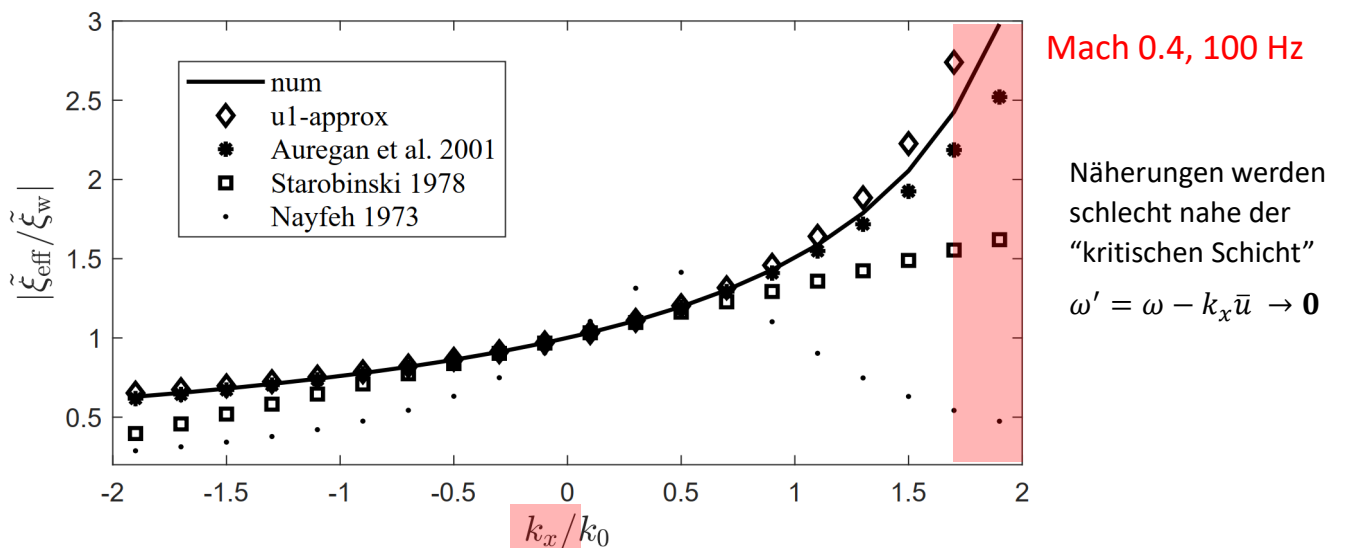
- Näherungslösung und numerische Lösung (FDM)
- Parameterstudie
- “Effektive Randbedingung”: Messung des Effekts von Wand+Grenzschicht



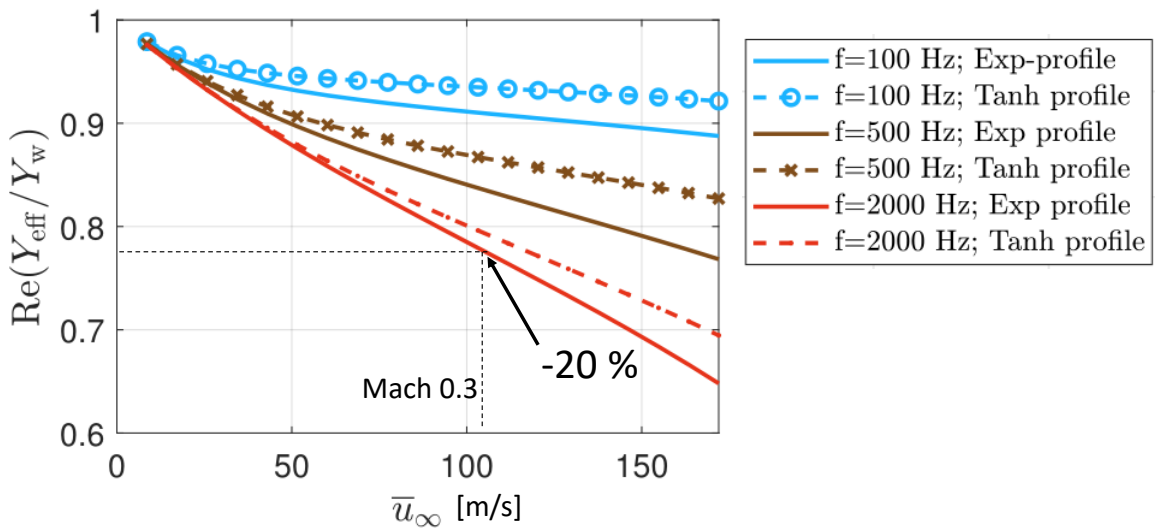
# Ergebnisse: Effektive Wandauslenkung



# Effektive Wandauslenkung

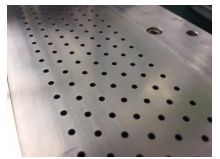


# Effektive Wandadmittanz

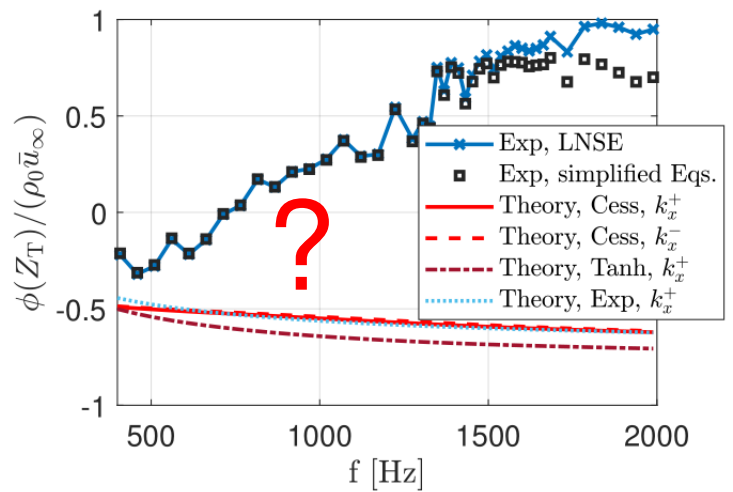
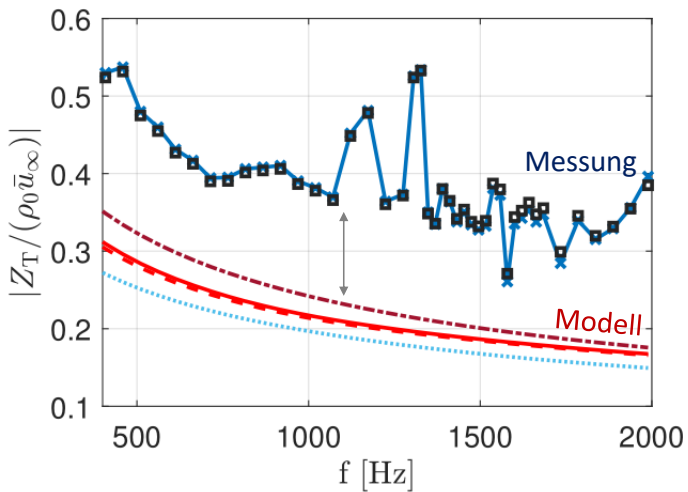


# Impulstransferimpedanz

$$Z_T = \frac{\tilde{\tau}_w}{\tilde{v}_w}$$



SDOF-Liner



# Fazit

- Aufgaben bei der Auslegung von Linern mit Strömung: Modellierung der Wandimpedanz, des Schallfelds und der **akustischen Randbedingung (RB)**.
- Im RB-Modell ist der strömungsbedingter Impulstransfer “groß” -> **nicht zu vernachlässigen**.
- Impulstransfer für das Modell der idealisierten **homogenen Wand** untersucht -> weitgehend verstanden.
- Hauptmechanismus: die **Haftbedingung** erzwingt die Anregung von akustischer Schubspannung an der Wand, diese breitet sich als Impuls-Diffusionswelle ins inhomogene Strömungsmedium aus.
- Maßgebliche Parameter der Dynamik des Impulstransfers: Frequenz, Wellenzahl und wandnahes Strömungsprofil.
- Hinweise, dass das Modell der homogenen Wand **nicht ausreicht**.



# Danksagung



Funded by  
**DFG** Deutsche  
Forschungsgemeinschaft  
German Research Foundation

**Dirk Ronneberger** (ehem. Drittes physikalisches Institut, Göttingen)



## Quellen

Folie 1+2: By Julian Herzog, CC BY 4.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=55711492>

Folie 3+4: R. Jaron privat, ILA 2016, Berlin



## 6. Identifikation der Materialparameter klassischer Gitarren auf Basis parametrisch modellordnungsreduzierter Finite Elemente

*Alexander Brauchler, Pascal Ziegler, Peter Eberhard*

Universität Stuttgart, Institut für Technische und Numerische Mechanik

Die klassische Gitarre ist ein beliebtes Saiteninstrument aus Holz, dessen Klang durch einen gekoppelten mechanischen Prozess entsteht. Typischerweise bestehen die verschiedenen Teile einer Gitarre aus verschiedenen Holzarten. Die Variabilität der Materialparameter der verwendeten Holzarten sorgt dafür, dass auch baugleiche Instrumente unterschiedliche Übertragungsverhalten aufzeigen und somit jedes Instrument einen individuellen Klang entwickelt. In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem die Identifikation der einflussreichsten Materialparameter einer fertiggestellten Gitarre möglich ist. Zunächst werden dafür die modalen Parameter einer spezifischen Gitarre durch eine experimentelle Modalanalyse bestimmt. Die Gitarre wird dann anhand von CT-Scans detailliert modelliert und für die Finite-Elemente-Methode diskretisiert. Das Modell beinhaltet neben der detaillierten Geometrie die orthotropen Materialparameter der verschiedenen Holzarten und die Fluid-Struktur-Interaktion zwischen dem Korpus und der darin eingeschlossenen Luft. Dieses mathematische Modell soll darauffolgend zur Identifikation der Materialparameter der realen Gitarre verwendet werden. Hierzu muss das parametrisierte Modell sehr häufig ausgewertet werden, was zu sehr langen Rechenzeiten führt. Aus diesem Grund wird ein Moment-Matching-Verfahren zur parametrischen Modellordnungsreduktion angewandt, mit dem die Modellordnung und damit die Rechenzeit signifikant reduziert werden kann, während die Parameterabhängigkeit im reduzierten Modell erhalten bleibt. Dieses effiziente Modell macht dann die Parameteridentifikation in einem höherdimensionalen Parameterraum möglich.

**DEGA Fachausschuss  
Physikalische Akustik  
21.10.21**

**Identifikation der Materialparameter  
klassischer Gitarren auf Basis parametrisch  
modellordnungsreduzierter Finite Elemente  
Modelle**

**Alexander Brauchler**, Pascal Ziegler and Peter Eberhard

Institute of Engineering  
and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

**Perceptual Study  
(TU Dresden, 2019)**

- equal guitars are compared in hearing tests
- only soundboard material varies

two major findings

- equal guitars with different material characteristics of the soundboard are **distinguishable**
- participants preferred soundboards with a **lower density** and **lower longitudinal stiffness**

S. Merchel, M. Altinsoy, D. Olson: Perceptual evaluation of brace-wood and soundboard wood variations on the preference of a steel-string acoustic guitar. The Journal of the Acoustical Society of America 146 (4), 2808-2818 (2019).

Institute of Engineering  
and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

**goal**  
approximate experimentally identified modal parameters of a classical guitar with a finite element model

**Motivation**

prospects

- contribute to the understanding of the instrument's physical behavior
- serve as virtual prototype to test geometric modifications
- non-invasive identification of unknown parameters of existing instruments

parameter identification / model updating

Institute of Engineering  
and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

**CT Scans of the Guitar**

- cooperation with Katharinenhospital Stuttgart to create the CT scans
- geometric modeling of the guitar from ~2000 sectional images
- resolution ~0.5mm

Institute of Engineering  
and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

**Finite Element Model**

- orthotropic material properties
- five different kinds of wood
- different element types for efficient simulation (shell, volume)
- ~ 500 000 DOF

ebony (C3D8 volume)  
 cedar (S4 shell)  
 rosewood (C3D8 volume)  
 mahogany (C3D8 volume)  
 spruce (C3D8 volume)  
 mahogany (S4 shell)

Institute of Engineering  
and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

**Fluid-Structure-Interaction**

acoustic infinite elements for radiating boundary (ACIN3D8)

air model with pressure based acoustic elements (AC3D8)

the air inside the guitar body acts like a Helmholtz-resonator

eigenfrequencies change significantly when FSI is added

FSI equation

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ \rho R^T & M_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \dot{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & R \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ p \end{bmatrix} = 0$$

Institute of Engineering  
and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

**Finite Element Model Results**

experiment      FE model

mode 8      mode 7

MAC

- 5 of the first 6 modes can be correlated with MAC > 0.85
- above the 8th mode the correlation is poor
- the sophisticated modeling process should yield better results

University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

**Need for Accurate Material Parameters**

- experimental results reliable? ✓
- model geometry detailed enough? ✓
- all necessary physics included? ✓
- material parameters accurate? ✗

soundboard material

S. Merchel, M. Altinsoy, D. Olson: Perceptual evaluation of brace-wood and soundboard wood variations on the preference of a steel-string acoustic guitar. The Journal of the Acoustical Society of America 146 (4), 2808-2818 (2019).

Institute of Engineering  
and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

### Challenges in Parameter Identification

- curse of dimensionality
  - 54 independent parameters due to different orthotropic materials

How to reduce the parameter space?

- computational time
  - 5 minutes per model evaluation

How to reduce the computational time?

- multiple parameter combinations possible
  - global optimization necessary

How to reach a global solution?

Institute of Engineering and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

### Challenges in Parameter Identification

How to reduce the parameter space?

How to reduce the computational time?

How to reach a global solution?

6 different orthotropic material regions

54 independent material parameters

sensitivity analysis

19

most influential material parameters

Institute of Engineering and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

### Challenges in Parameter Identification

How to reduce the parameter space?

How to reduce the computational time?

How to reach a global solution?

finite element model calculation time

300 s

surrogate model calculation time

0.25 s

PMOR (parametric model order reduction)

Institute of Engineering and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

### Projection Methods for Model Order Reduction

- linear FEM equation of motion
 
$$M\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = Bu$$

$$y = Cq \text{ with } q \in N$$
- approximation via projection
 
$$q \approx Vq_r, \quad q_r \in n, \quad n \ll N$$
- use approximation in equation of motion and left-multiplication with  $V^T$

parametric FE models

- parameter dependent equation of motion
 
$$M(p)\ddot{q} + D(p)\dot{q} + K(p)q = B(p)u$$

$$y = C(p)q$$
- goal: reduced, parameter dependent equation of motion
 
$$M_r(p)\ddot{q}_r + D_r(p)\dot{q}_r + K_r(p)q_r = B_r(p)u$$

$$y_r = C_r(p)q_r$$
- reduced equation of motion
 
$$M_r\ddot{q}_r + D_r\dot{q}_r + K_rq_r = B_ru$$

$$y_r = C_rq_r$$
- modal reduction, balanced truncation, moment matching, ...
- multiple model evaluations are much more efficient with a reduced order model

Institute of Engineering and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

### Parametric Model Order Reduction

- moment matching approach
 
$$H(\sigma_i, p_i) = H_r(\sigma_i, p_i)$$
- calculation of reduction basis
 
$$V_i(\sigma_i, p_i) = (\sigma_i^2 M(p_i) + \sigma_i D(p_i) + K(p_i))^{-1} B(p_i)$$
- concatenation of bases
 
$$V = [V_1, V_2, \dots]$$

Institute of Engineering and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

### Challenges in Parameter Identification

How to reduce the parameter space?

How to reduce the computational time?

How to reach a global solution?

Institute of Engineering and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

### Parameter Identification Workflow

- 19 independent parameters are used for 6 "material regions"
- parametric model order reduction applied
- parallel computation on 19 workstations of the institute
- sampling via quasi-random Sobol-set

objective function

$$J(p) = \sum_{r=1}^R \left( \frac{\omega_r^{Exp} - \omega_r(p)}{\omega_r^{Exp}} \right)^2 + \left( \frac{1 - \sqrt{MAC_{rr}(p)}}{\sqrt{MAC_{rr}(p)}} \right)^2$$

eigenfrequencies      mode shapes

Institute of Engineering and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

### Updated Results

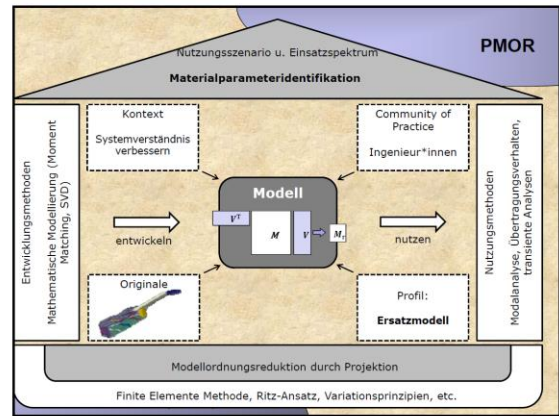
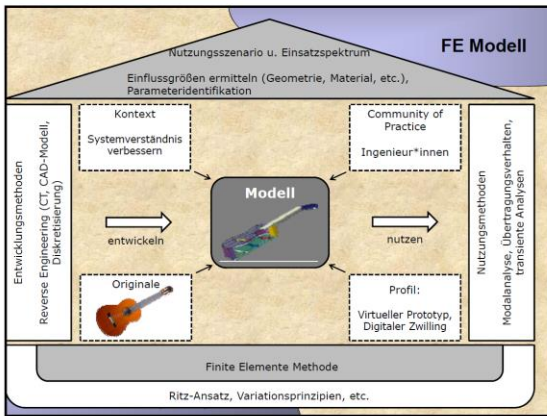
frequency in Hz

number of eigenfrequency

- first 14 eigenmodes are in excellent agreement
- eigenfrequencies fit well, although systematically low in the model

Institute of Engineering and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss





**Ingredients of a numerical guitar model**

- reliable experimental results
- detailed geometry model
- fluid structure interaction, orthotropic material
- material parameter identification

**Conclusion**

**goal**  
approximate experimentally identified modal parameters of a classical guitar with a finite element model

**how it helps understanding the instrument**

- quantify effects like fluid structure interaction
- serve as a virtual prototype
- material parameter identification of complete instruments

Institute of Engineering and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

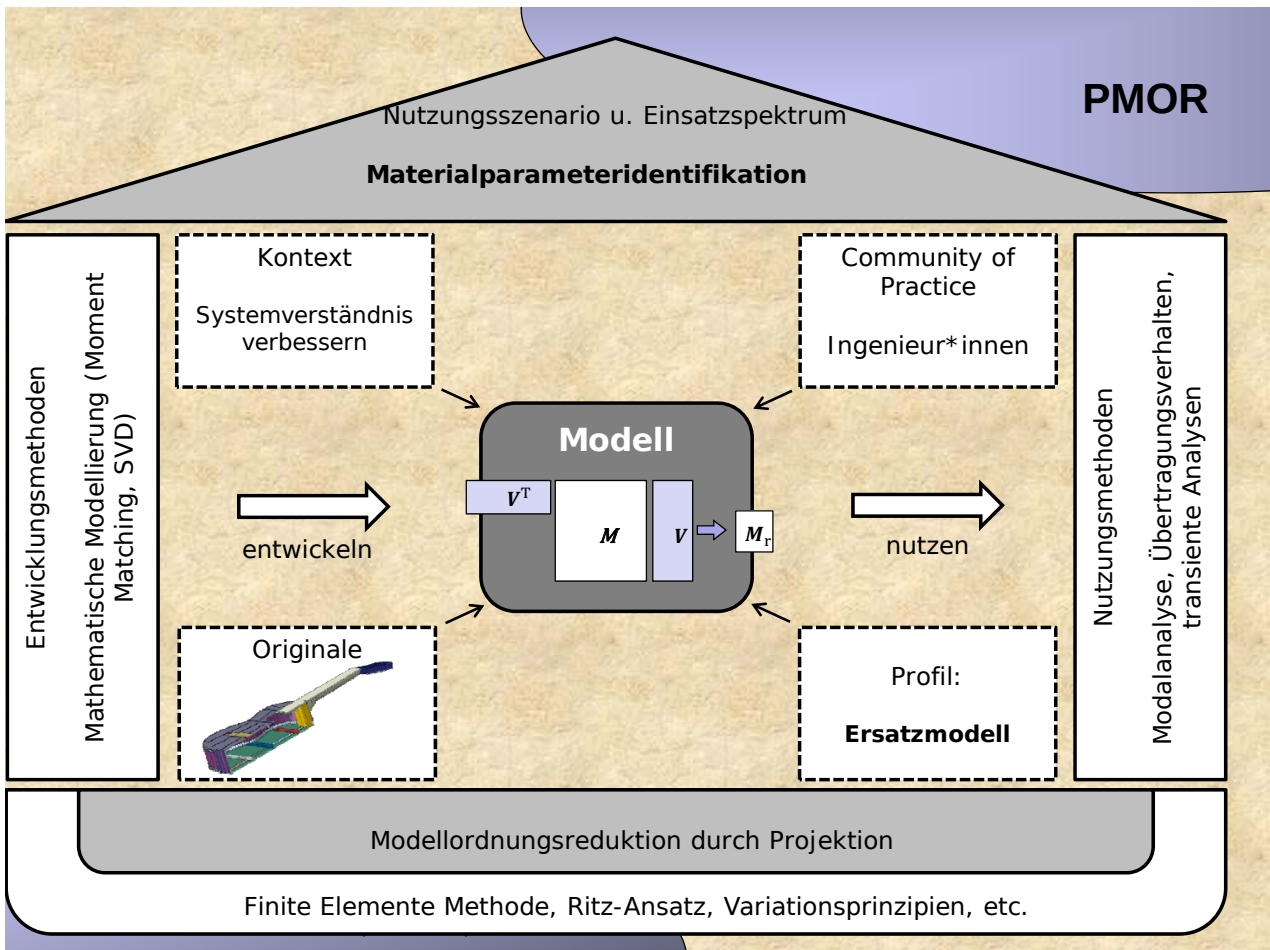
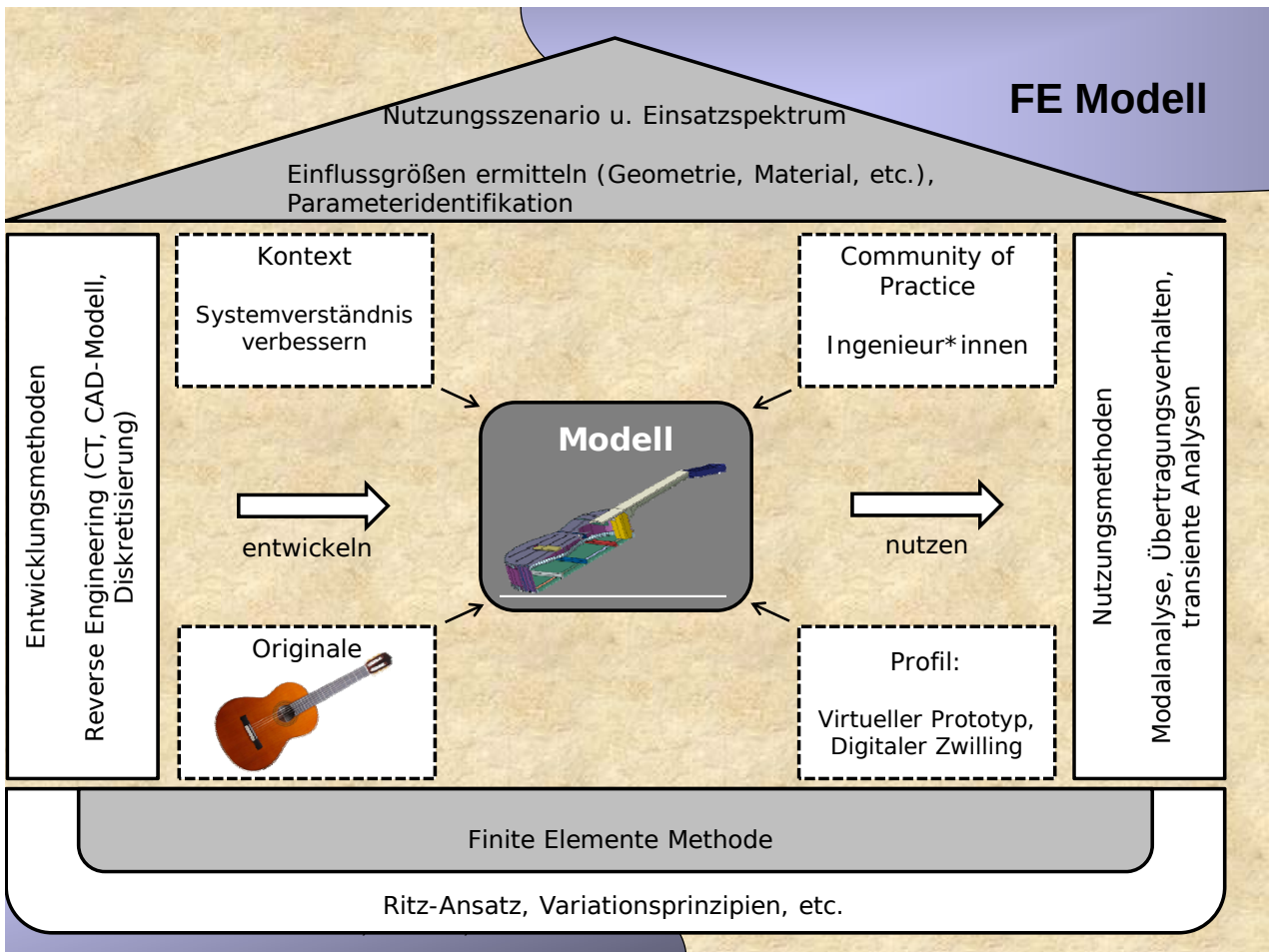
19

**Literature**

- Benner, P.; Gugercin, S.; Willcox, K.: A survey of projection-based model reduction methods for parametric dynamical systems. *SIAM Review* 57 (4), 483-531, 2015.
- Brauchler, A.; Ziegler, P.; Eberhard, P.: An Entirely Reverse-Engineered Finite Element Model of a Classical Guitar in Comparison with Experimental Data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149 (6), 4450-4462, 2021.
- Brauchler, A.; Ziegler, P.; Eberhard, P.: Modeling the Body of a Classical Guitar Using the Finite Element Method and Experimental Modal Analysis. *Fortschritte der Akustik - DAGA 2021*, Wien, 15. - 18. August 2021.
- Brauchler, A.; Ziegler, P.; Eberhard, P.: Numerical Models for Classical Guitars with Updated Parameters from Experimental Data. *Proceedings of Forum Acusticum 2020*, Lyon, 07. - 11. Dezember 2020.
- Merchel, S.; Altinsoy, M.; Olson, D.: Percipual evaluation of bracewood and soundboard wood variations on the preference of a steel-string acoustic guitar. *The Journal of the Acoustical Society of America* 146 (4), 2608-2618, 2019.

Institute of Engineering and Computational Mechanics  
University of Stuttgart, Germany  
Prof. P. Eberhard, J. Fehr, M. Hanss

20



# 7. MOR-Methode zur effizienten Lösung akustischer Problemstellungen

*Thomas Michaelis, Stefanie Retka*

Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt

## 8. Towards realistic damage modelling using quadtree decomposition in the context of ultrasonic guided waves-based SHM

*Daniel Lozano<sup>a</sup>, Jannis Bulling<sup>a</sup>, Hauke Gravenkamp<sup>b</sup>, Jens Prager<sup>a</sup>, Carolin Birk<sup>c</sup>*

a

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Akustische und elektromagnetische Verfahren;

b International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona, Spanien; c Universität Duisburg-Essen

In the context of ultrasonic guided waves for structural health monitoring and damage assessment, a key is the use of realistic numerical models. A promising method to create such models that resemble more closely the actual damage is image-based modelling. This technique relies on the fact that most information regarding the shape of a damage can be obtained using non-invasive techniques, such as ultrasound or X-ray computed tomography. Because of the high-resolution image, it is possible to convert geometrical information and integrate it into a computational domain for further analysis. One way to do this is the use of quadtree meshes. Quadtree meshes are created by converting the intensity of the pixels to quadrilateral cells. The same intensity pixels result in one quad, whereas fine features such as intensity gradients and discontinuities can be resolved by producing smaller quads in the dedicated areas. This paper describes the use of quadtree meshes in combination with the Scaled Boundary Finite Element Method (SBFEM). The SBFEM allows using polygonal elements so that mesh incompatibilities and hanging nodes issues can be avoided. The damage domain, also called quadtree domain, is embedded into the waveguide, which is mostly undamaged. The semi-analytical nature of the SBFEM allows modelling arbitrarily long undamaged regions of the waveguides without an increase of the computational time. This facilitates an efficient simulation of the wave interaction with damage. Examples show the numerical validity of this approach. Moreover, an improvement to overcome the issues related to the staircase approximation of edges is presented. Finally, real data is used for demonstrating the method's capabilities.

## 9. Ray Tracing in der Atmosphäre: Gekrümmte Pfade als Basis für die Auralisierung von Fluglärm

*Philipp Schäfer, Michael Vorländer*

RWTH Aachen, Institut für Hörtechnik und Akustik

Mithilfe der Auralisierung können echte Szenen, wie Flugzeugüberflüge, in einer virtuellen Umgebung sehr realitätstreu wiedergegeben werden. Die Auralisierung von Lärmsituationen kann dabei helfen, besser zu verstehen, wie Lärm wahrgenommen wird (z. B. durch Hörversuche). Des Weiteren kann den Betroffenen durch eine Auralisierung ein besserer Zugang zu einer Lärmsituation gegeben werden, als dies durch eine Darstellung von Lärmpegelwerten oder Lärmkarten geleistet werden kann. Um solche Szenarien zu auralisieren, ist ein Modell für die Schallausbreitung in der Atmosphäre notwendig. Aufgrund der Mediumsbewegung (Wind) sowie der Inhomogenität der Wetterparameter sind die Schallpfade in der Atmosphäre typischerweise gekrümmt. Auf der anderen Seite sind wir für die Auralisierung nur an den Schallpfaden (Schallstrahlen) interessiert, die eine Schallquelle – also das Flugzeug – mit einem Hörer am Boden verbinden. Die Berechnung dieser sogenannten „Eigenrays“ soll zudem möglichst schnell erfolgen, da für dynamische Szenen sukzessiv viele Simulationen durchgeführt werden müssen. Das Framework des „Atmospheric Ray Tracing“ (ART) wurde zu diesem Zweck entwickelt. Die besonders effiziente Methode des "Adaptiven Ray Zoomings" erlaubt es, Eigenrays in kürzester Zeit zu bestimmen. Dabei wird die Anzahl der zu simulierenden Strahlen drastisch reduziert. Der Vortrag geht auf das zugrunde liegende Modell sowie die Implementierung des Frameworks ein.



# Ray Tracing in der Atmosphäre: Gekrümmte Pfade als Basis für die Auralisierung von Fluglärm

Philipp Schäfer und Michael Vorländer

Institut für Hörtechnik und Akustik  
RWTH Aachen



## Aircraft noise auralization

---

- Aircraft noise
  - Reduction
  - Regulation
- How loud are aircraft and why?
  - Single-value numbers ( $L_{A,eq}$ )
- *Aircraft-malus* <sup>[1]</sup>
  - $L_{A,eq,aircraft} = L_{A,eq,rail/road}$
  - Aircraft overrated by  $\sim 5\text{dB}(A)$



<https://newdirection.online/publication/boosting-eu-trade-with-south-east-asia>

---

[1] H. Fastl and J. Hunecke: Psychoacoustic experiments on the aircraft malus, Proc. DAGA, pp. 407–410, 1995

## Aircraft noise auralization

- Psychoacoustic parameters
- Listening experiments
- Time signals
  
- Auralization
  - Maximum control over parameters
  - Large number of signals
- Fast simulations



<https://newdirection.online/publication/boosting-eu-trade-with-south-east-asia>

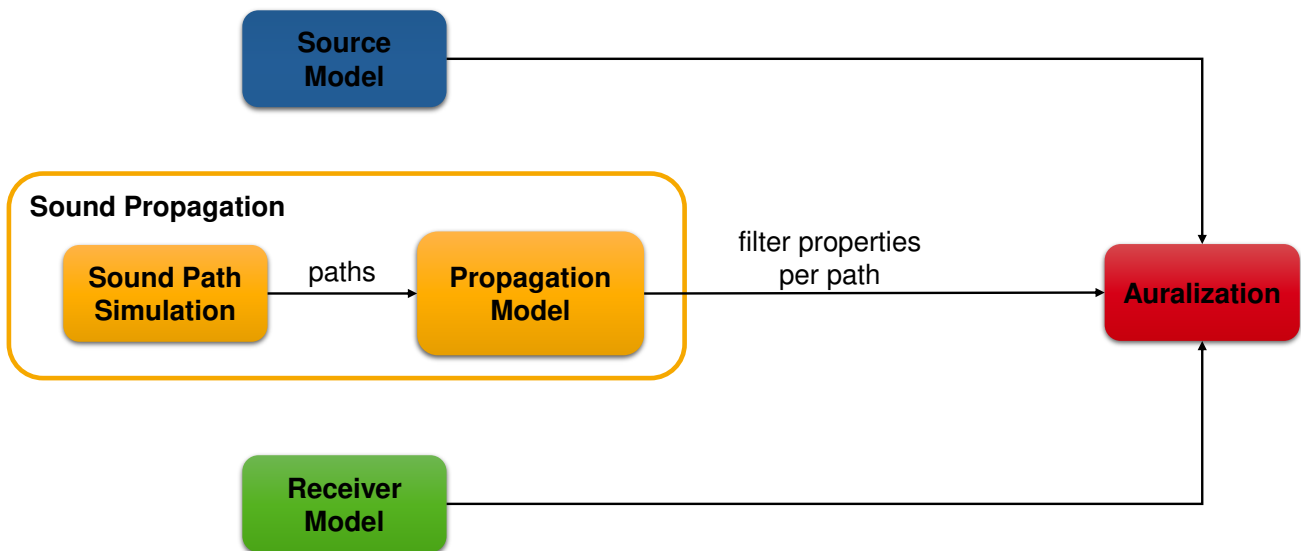
3

Ray Tracing in der Atmosphäre: Gekrümmte Pfade als Basis für die Auralisierung von Fluglärm  
Philipp Schäfer und Michael Vorländer

IHTA Institute for  
Hearing Technology  
and Acoustics

RWTHAACHEN  
UNIVERSITY

## Aircraft noise auralization



4

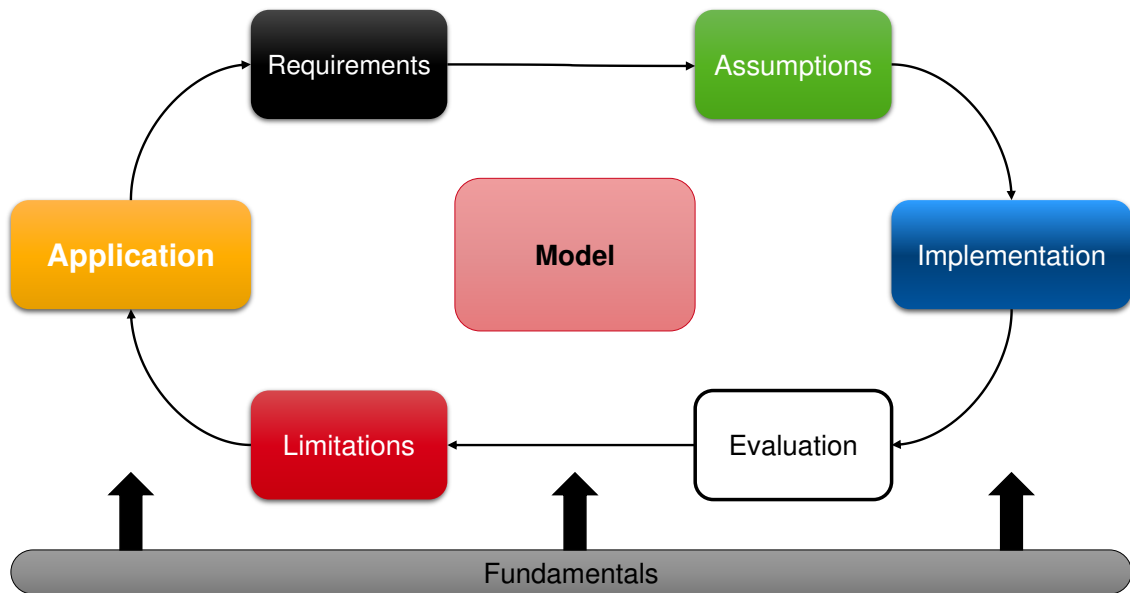
Ray Tracing in der Atmosphäre: Gekrümmte Pfade als Basis für die Auralisierung von Fluglärm  
Philipp Schäfer und Michael Vorländer

IHTA Institute for  
Hearing Technology  
and Acoustics

RWTHAACHEN  
UNIVERSITY

# Model development

## Process of model development

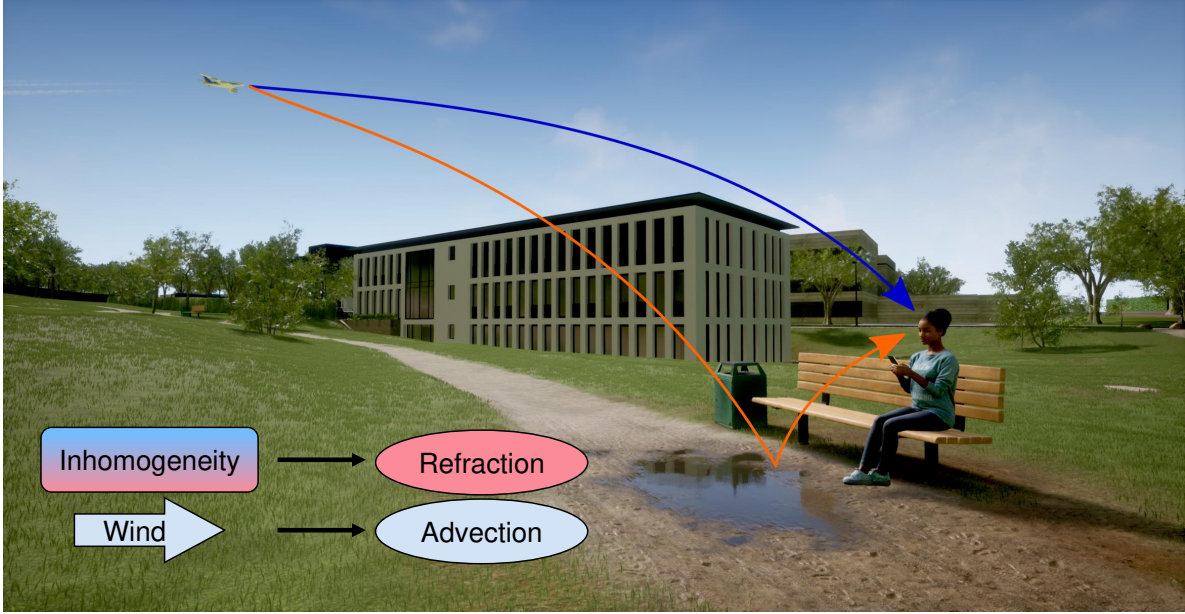




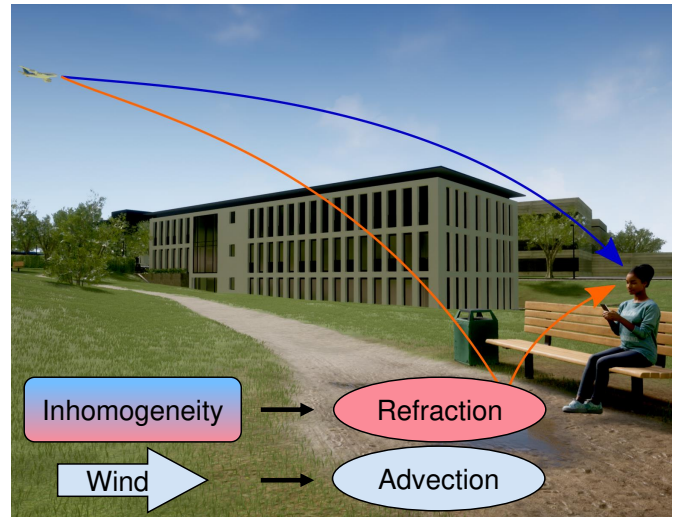
# Atmospheric Ray Tracing

## Atmospheric sound propagation

Fundamentals



- C++ framework
  - Atmospheric sound propagation
  - Open-source
- Propagation effects
  - Refraction
  - Advection
  - Ground reflection
- Design goal: (real-time) auralization
  - Finding curved eigenrays

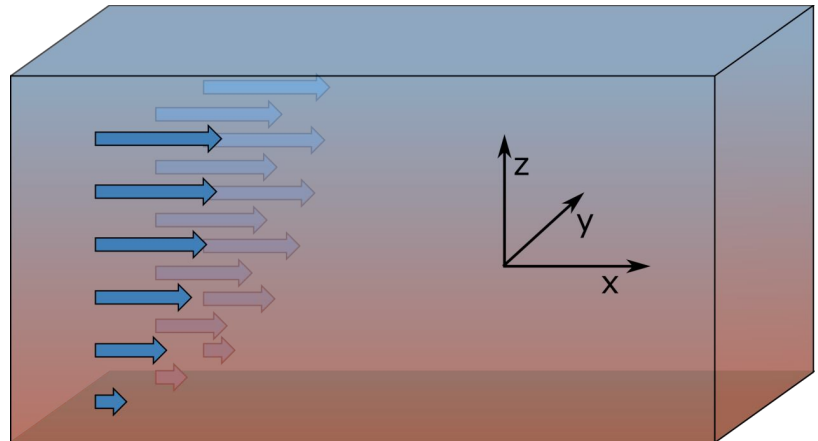


[1] P. Schäfer and M. Vorländer. Atmospheric Ray Tracing: An efficient, open-source framework for finding eigenrays in a stratified, moving medium. *Acta Acustica*, 5, 26, 2021

## Ray tracing in the atmosphere

Fundamentals & assumptions

- Assumptions
  - Weather conditions:  $f(x, y, z) \rightarrow f(z)$
  - Wind direction: purely horizontal
  - Ground:  $z = 0$

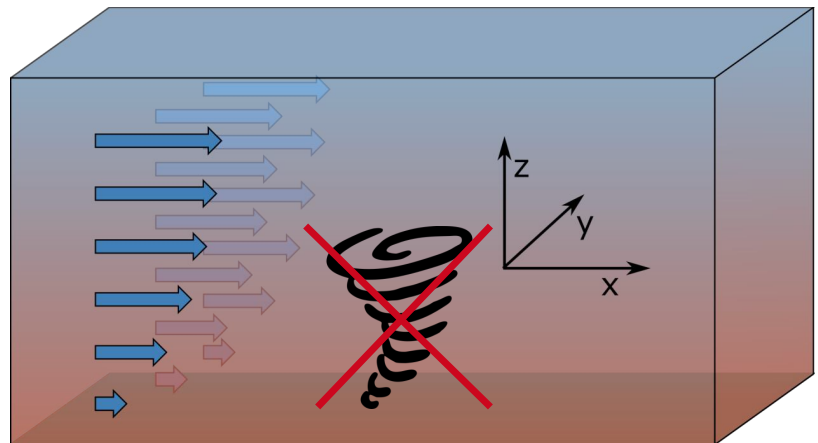


- International Standard Atmosphere (ISA) <sup>[2]</sup>
- Logarithmic wind profile <sup>[3]</sup>
- Measured data
  - Atmospheric soundings

[1] V. E. Ostashev and D. K. Wilson. Acoustics in moving inhomogeneous media. CRC Press, 2015.  
 [2] N. Sissenwine, M. Dubin, and H. Wexler. The US standard atmosphere, 1962. *Journal of Geophysical Research*, 67(9):3627–3630, 1962.  
 [3] M. A. Garcés, R. A. Hansen, and K. G. Lindquist. Traveltimes for infrasonic waves propagating in a stratified atmosphere. *Geophysical Journal International*, 135(1):255–263, 1998.

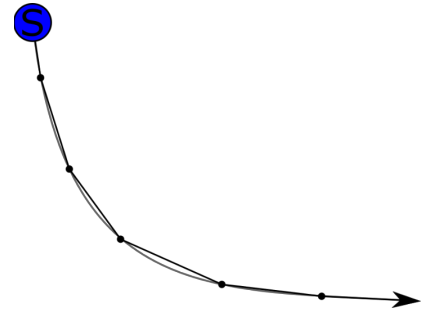
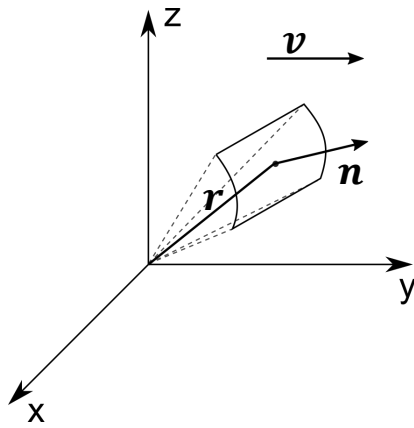
## Additional assumption for ray tracing

- Zeitunabhängigkeit
  - Weather conditions:  $f(x, y, z, t) \rightarrow f(z)$
- Time-averaged values <sup>[1]</sup>
- Turbulence neglected
- Ray equations
  - „High“ frequencies
  - Application: Infrasound <sup>[2]</sup>



[1] V. E. Ostashev and D. K. Wilson. Acoustics in moving inhomogeneous media. CRC Press, 2015.  
 [2] M. A. Garcés, R. A. Hansen, and K. G. Lindquist. Traveltimes for infrasonic waves propagating in a stratified atmosphere. *Geophysical Journal International*, 135(1):255–263, 1998.

- Ray velocity  $\frac{d}{dt} \mathbf{r}(t)$ 
  - $= c \cdot \mathbf{n} + \mathbf{v}$
- Refraction  $\frac{d}{dt} \mathbf{n}(t)$ 
  - $\sim \nabla(c + \mathbf{n} \cdot \mathbf{v})$
- Slowness vector [2]
  - Stratified medium
  - Reduced complexity
- Runge-Kutta
  - Discrete points  $\mathbf{r}_i(t)$

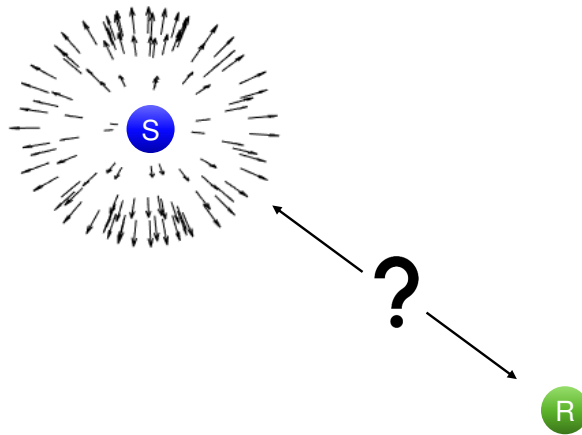


[1] R. B. Lindsay. Mechanical radiation. International series in pure and applied physics. McGraw-Hill, New York, 1960.  
 [2] A. D. Pierce. Acoustics: An introduction to its physical principles and applications. McGraw-Hill New York, 1981.

## Finding eigenrays

### Atmospheric Ray Tracing

- Eigenray [1]
  - Source → Receiver
- Non-deterministic problem
- High source-receiver distance

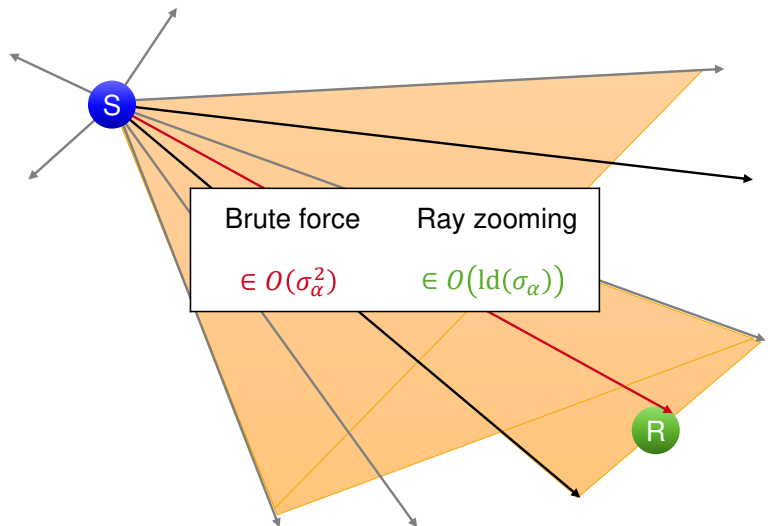
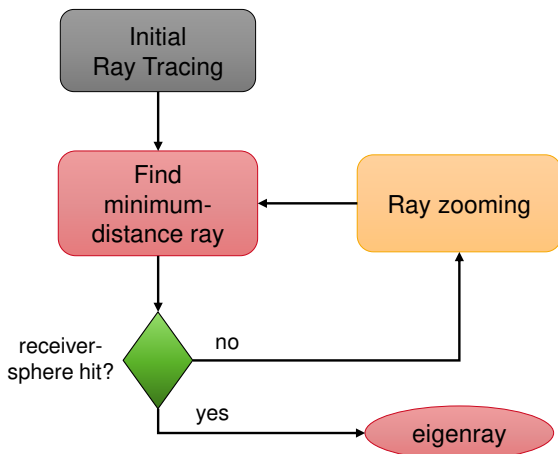


➤ High angular resolution ( $1/\sigma_\alpha \ll 1^\circ$ )

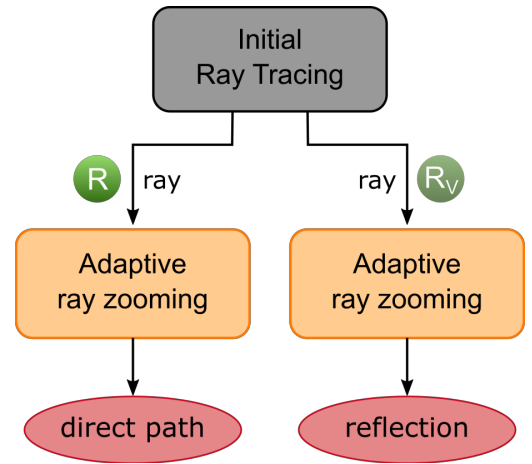
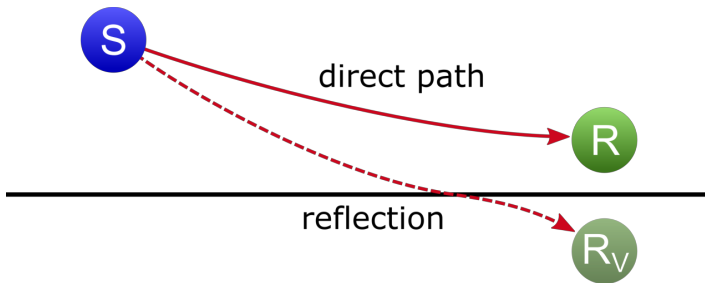
➤ Brute force Real-time  
 •  $\in O(\sigma_\alpha^2)$

[1] V. E. Ostashev and D. K. Wilson. Acoustics in moving inhomogeneous media. CRC Press, 2015.

# Adaptive ray zooming [1, 2]



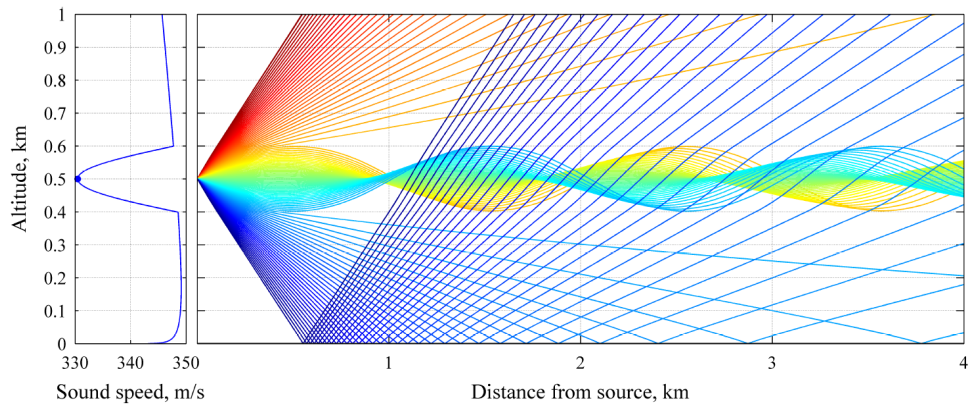
[1] M. Arntzen, S. A. Rizzi, H. G. Visser, and D. G. Simons. Framework for simulating aircraft flyover noise through non-standard atmospheres. *Journal of Aircraft*, 51(3):956–966, 2014.  
 [2] P. Schäfer and M. Vorländer. Atmospheric Ray Tracing: An efficient, open-source framework for finding eigenrays in a stratified, moving medium. *Acta Acustica*, 5, 26, 2021



P. Schäfer and M. Vorländer. Atmospheric Ray Tracing: An efficient, open-source framework for finding eigenrays in a stratified, moving medium. *Acta Acustica*, 5, 26, 2021

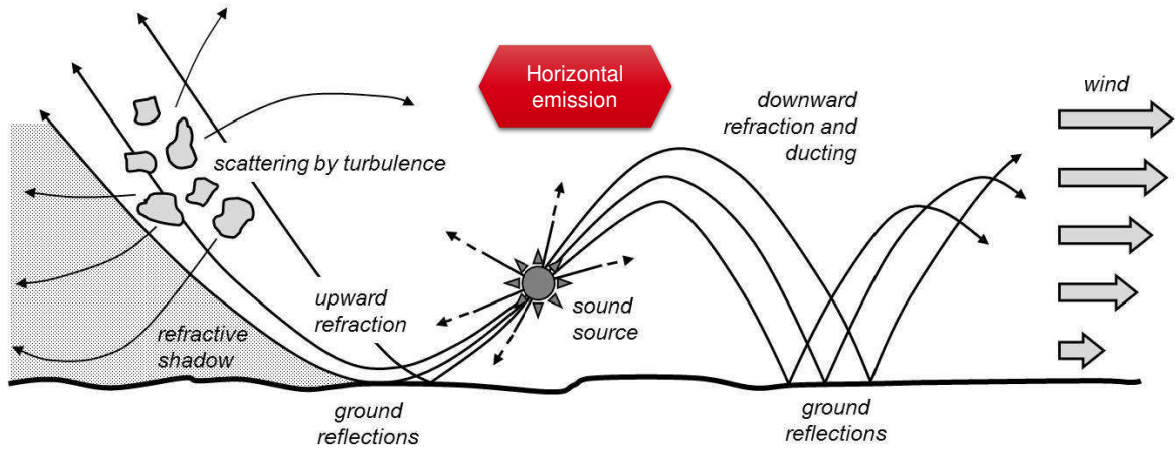
Assumptions

- Rays must not cross each other
  - Exception: Ground reflection
- Turbulence already neglected
- Acoustic ducts
  - Temperature inversion



M. Arntzen, Aircraft noise calculation and synthesis in a non-standard atmosphere, PhD thesis, Delft University of Technology, 2014.

- Receiver can be hit by ray
- Shadow zone

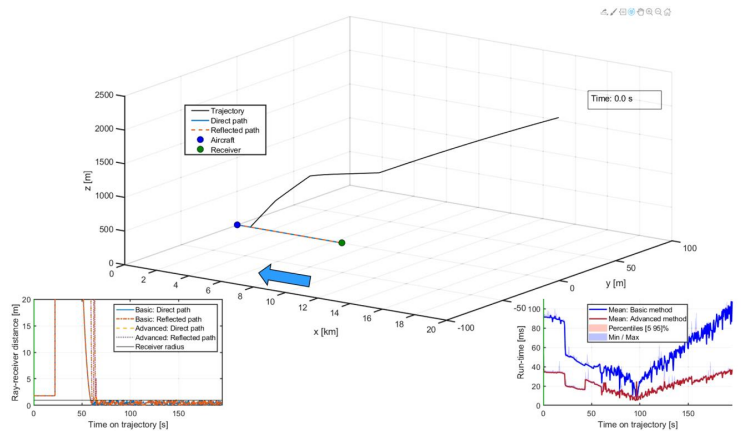


V. E. Ostashev and D. K. Wilson. Acoustics in moving inhomogeneous media. CRC Press, 2015.

## Evaluation

Aircraft flyover scenario

## Video – Performance of adaptive ray zooming approach



P. Schäfer and M. Vorländer. Atmospheric Ray Tracing: An efficient, open-source framework for finding eigenrays in a stratified, moving medium. *Acta Acustica*, 5, 26, 2021

21

Ray Tracing in der Atmosphäre: Gekrümmte Pfade als Basis für die Auralisierung von Fluglärm  
Philipp Schäfer und Michael Vorländer

IHTA Institute for  
Hearing Technology  
and Acoustics

RWTHAACHEN  
UNIVERSITY

## Evaluation

Application

Limitations

Evaluation

- Limitations
  - Emission angle close to horizontal
    - e.g. shadow zone, ducting
  - ✓ **Untypical cases for aircraft auralization**

- Benchmark
  - Computing time  $\approx 20$  ms
  - 10x faster than comparable method [1]

### Future work

- Acceleration of ray zooming method
- Interpolation of simulation results

- Real-time capable?
  - Not yet

Requirements

[1] M. Arntzen, Aircraft noise calculation and synthesis in a non-standard atmosphere, PhD thesis, Delft University of Technology, 2014.

22

Ray Tracing in der Atmosphäre: Gekrümmte Pfade als Basis für die Auralisierung von Fluglärm  
Philipp Schäfer und Michael Vorländer

IHTA Institute for  
Hearing Technology  
and Acoustics

RWTHAACHEN  
UNIVERSITY



# Auralization

Aircraft flyover



Auralization – Aircraft flyover  
with changing wind direction

# Conclusion

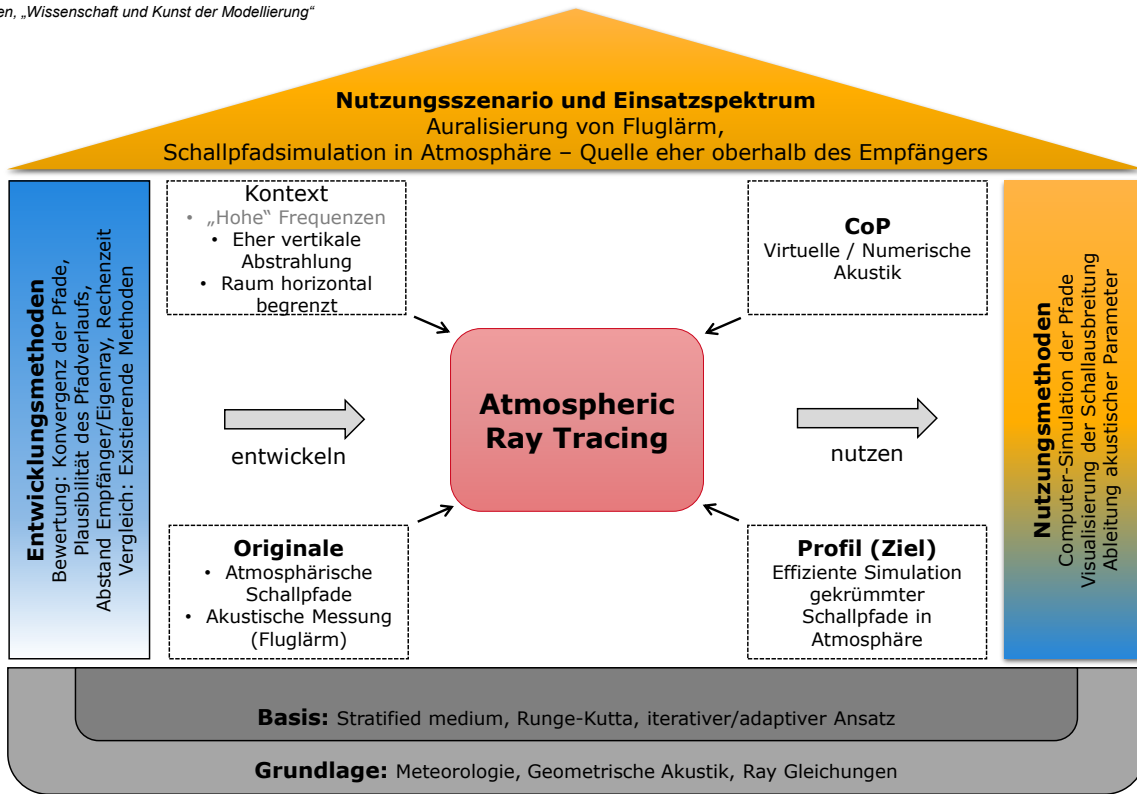
---

## Summary

- Atmospheric Ray Tracing
  - Open source
  - Sound paths
  - Inhomogeneous atmosphere
  
- Aircraft noise auralization
  - Finding eigenrays
  
- ARTMatlab
  - Sound path simulation / visualization
  - Acoustic parameters



[ART website](#)



# 10. Fraktionale Ableitungen in der Modellierung für die Strukturodynamik

*Jörg Bienert*

TH Ingolstadt, Professur für Akustik und Technische Mechanik

In der Maschinenakustik erfolgt die Schallabstrahlung meist über die Oberflächen (z. B. Gehäuse) von Maschinen. Neben der Anregung spielt dabei die Strukturodynamik eine wesentliche Rolle. Die Oberflächenschnelle wird durch das Resonanzverhalten bestimmt und die Spitzenamplituden hängen hauptsächlich von der Dämpfung ab. Die Dämpfungsmodellierung ist also essenziell. Ausgehend vom ungedämpften System wird in der Regel geschwindigkeitsproportionale, lineare Dämpfung angesetzt. Vielfach wird dies noch vereinfacht, um mit reellen Eigenvektoren auszukommen. Das reicht oft bei schwach gedämpften Systemen aus, ist aber bei stark gedämpften Strukturen unzureichend. Um die Anpassung an die Realität in Form von Versuchsdaten zu verbessern, geht der Ansatz der fraktionalen Ableitungen über die allgemeine geschwindigkeitsproportionale Dämpfung hinaus. Die Dämpfung wird über eine  $(n/m)$ -te Ableitung statt der 1. Ableitung formuliert. Der zusätzlich gewonnene, freie Parameter verbessert die Anpassung an das Experiment. In dem Vortrag werden die mathematischen Ansätze der fraktionalen Ableitung erklärt und die Auswirkung am 1-FHG-System aufgezeigt. Die Verallgemeinerung auf Mehrfreiheitsgradsysteme schließt sich an. Der Ausblick auf eine Umsetzung in der Systemidentifikation rundet das Thema ab.



Technische Hochschule  
Ingolstadt  
Fakultät für Maschinenbau

# Fraktionale Ableitungen in der Modellierung für die Strukturdynamik

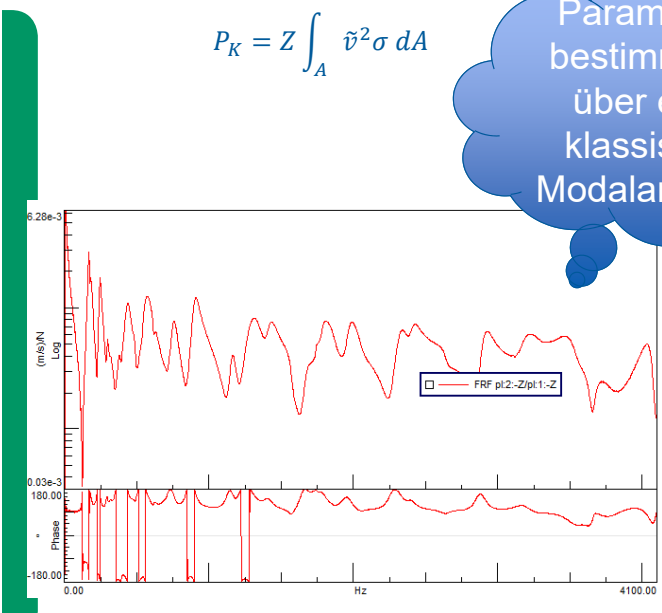
Prof. Jörg Bienert

25.10.2021

*Maschinenakustische Gleichung*  
abhängig von der Strukturdynamik der gedämpften  
Struktur

$$P_K = Z \int_A \tilde{v}^2 \sigma dA$$

Parameter-  
bestimmung  
über eine  
klassische  
Modalanalyse



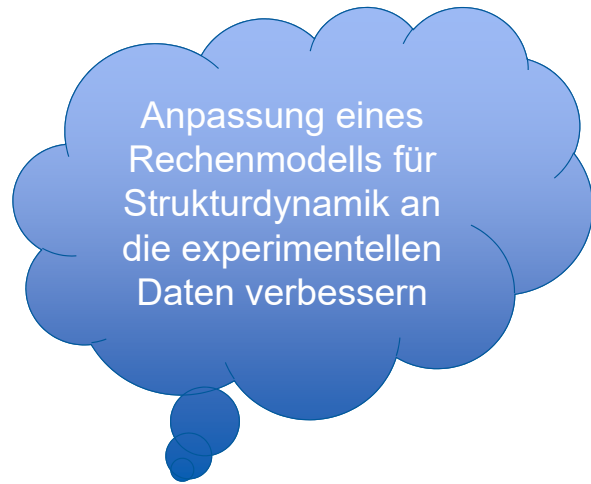
## Ziel

für die Verwendung der Fraktionalen Ableitungen



Idealerweise:

- linear,
- einfache Erweiterung,
- höhere Qualität beim Fitting zum Experiment,
- physikalisch begründbar



## Gliederung



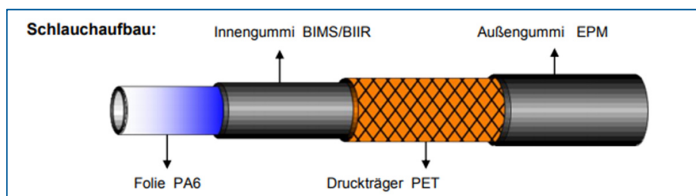
1. Systeme in der Strukturdynamik und Problemstellung bei stark gedämpften Systemen
2. Mathematische Grundlagen
3. Rheologische Modelle
4. Ein- und Mehr-FHG-Systeme
5. Balkenschwingungen mit fraktionalem Dämpfungsmodell -> Materialparameter
6. Erreichtes und Ausblick

Lineare Strukturdynamische Modelle (alle Gleichungen ggf mit Erregerterm auf der rechten Seite)

- ungedämpft  $M \ddot{x} + Kx = 0$
- Dämpfung mit Bequemlichkeitshypothese für reelle Eigenvektoren  $M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = 0$   
 $C = \alpha M + \beta K$
- Dämpfung mit Cauchy/O'Kelly Bedingung: für reelle Eigenvektoren  $M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = 0$   
 $C M^{-1} K = K M^{-1} C$
- Beliebige lineare Dämpfung  $M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = 0$  führt zu komplexen EV
- Nichtlineare Dämpfung  $M \ddot{x} + \int_{-\infty}^t G(t, \tau) \dot{x} d\tau + Kx = 0$
- mit schiefsymmetrischen Matrizen  $M \ddot{x} + (C + G)\dot{x} + (K + N)x = 0$   
mit  $G = -G^T$  und  $N = -N^T$  resultiert in Rechts- und Links\_EWP und kComplexen EV
- mit periodisch Zeitvarianten Matrizen  $M(\Omega_p)\ddot{x} + (C + G(\Omega_p))\dot{x} + K(\Omega_p)x = 0$   
resultiert in periodischen Eigenvektoren; Hypereigenwertproblem nach Hill

## Problem bei stark gedämpften Strukturen

Bei stark gedämpften Strukturen lassen sich die Messergebnisse in Form von Übertragungsfunktionen oft nicht mit dem üblichen Rechenmodell abbilden.



Quelle: ContiTech MGW GmbH Kältemittelschlauch DN 08 H3 [14]

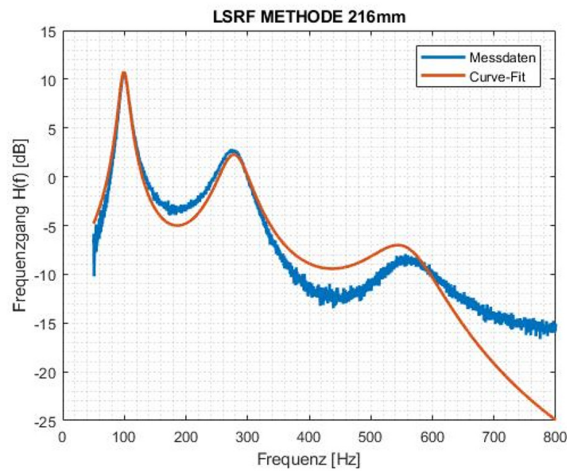
## Wie löst man diese Art von stark gedämpften Strukturen?



grundsätzlicher Ansatz: lineare Dämpfung

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = 0$$

aber vielfach reicht das Modell nicht um eine Anpassung an die Realität / Experiment zu erreichen.

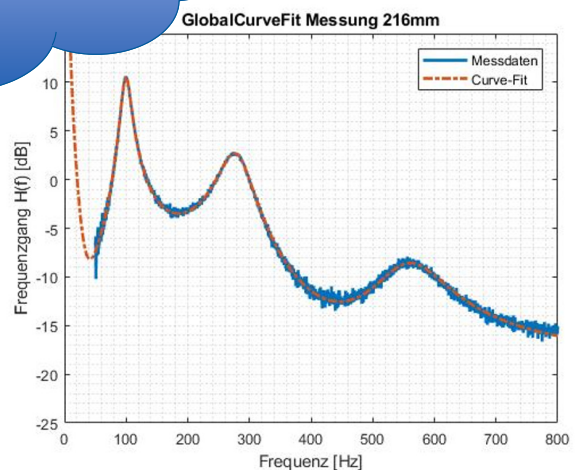
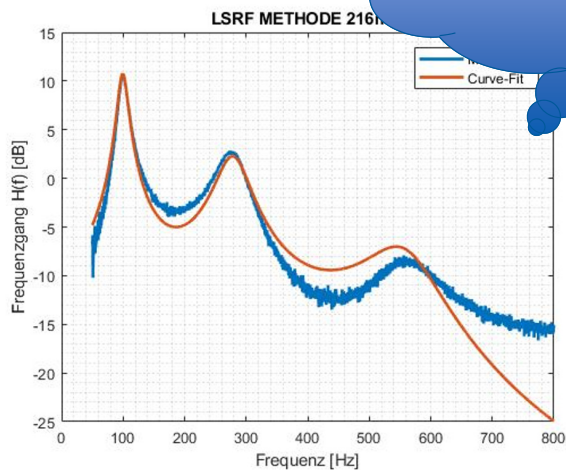


## Wie löst man diese Art von stark gedämpften Strukturen?



grundsätzlicher Ansatz: lineare Dämpfung

Verbesserung durch mehr Parameter – fraktionale Formulierung der Dämpfung





# Mathematische Grundlagen

## 1. Was ist fraktionale Infinitesimalrechnung?



Was ist fraktionale Infinitesimalrechnung?

- Allseits bekannt sind die Ableitungen  $\frac{d}{dt}f(t), \frac{d^2}{dt^2}f(t), \dots, \frac{d^n}{dt^n}f(t)$
- oder Integrale der Form  $F(t) = \int_{t_0}^t f(\tau)d\tau$

→ Fraktionale Infinitesimalrechnung beschäftigt sich mit der Frage ob es eine sinnvolle Definition für nicht ganzzahlige Ableitungsgrade gibt? Außerdem werden die Begriffe der Differentiation und Integration verallgemeinert.

→ Konkret: Was würde beispielsweise  $\frac{d^{\frac{7}{10}}}{dt^{\frac{7}{10}}}f(t)$  bzw.  $\frac{d^\alpha}{dt^\alpha}f(t)$  bedeuten und wie würde man diese Ableitung berechnen?

# Mathematische Grundlagen

## 2. Grünwald-Letnikov-Definition und Riemann Liouville-Definition der fraktionalen Ableitung



Grünwald-Letnikov-Definition

$$\frac{d}{dt}f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(t) - f(t-h)}{h}$$

$$\frac{d^2}{dt^2}f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(t) - 2f(t-h) + f(t-2h)}{h^2}$$

$$\frac{d^n}{dt^n}f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=1}^n (-1)^k \binom{n}{k} f(t-kh)}{h^n}$$

Riemann-Liouville-Definition

$$I_1 f(t) = \int_{t_0}^t f(\tau) d\tau$$

$$I_2 f(t) = \int_{t_0}^t \int_{t_0}^{\tau_1} f(\tau_2) d\tau_2 d\tau_1$$

$$I_n f(t) = \int_a^t \int_a^{\tau_1} \dots \int_a^{\tau_{n-1}} f(\tau_n) d\tau_n \dots d\tau_2 d\tau_1$$

$${}_a^I I^n f(t) = \frac{1}{(n-1)!} \int_a^t (t-\tau)^{n-1} f(\tau) d\tau$$

Gamma-Funktion

$$\int_0^\infty t^{n-1} e^{-t} dt = \Gamma(n) = (n-1)!$$

$${}_a^I D^p f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=1}^n (-1)^k \binom{p}{k} f(t-kh)}{h^p}$$

$${}_a^I D^p f(t) = \frac{1}{\Gamma(m-p+1)} \frac{d^{m+1}}{dt^{m+1}} \int_a^t (t-\tau)^{m-p} f(\tau) d\tau$$

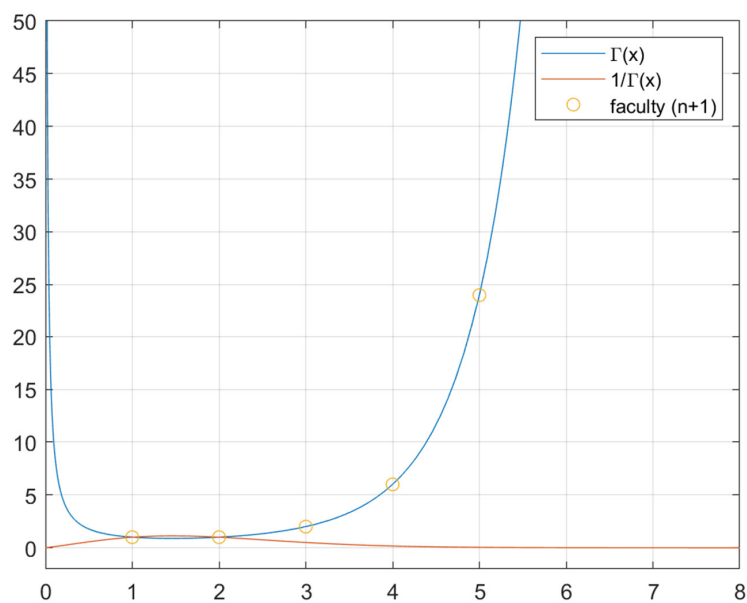
Die Abbildung  $\Gamma : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$  mit

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$$

$$\Gamma(x+1) = \int_0^\infty e^{-t} t^x dt = [-e^{-t} t^x]_{t=0}^\infty + x \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt = x\Gamma(x).$$

$$\Gamma(n+1) = n! \text{ für } n \in \mathbb{N}, \quad \binom{a}{b} = \frac{a!}{b!(a-b)!} = \frac{\Gamma(a+1)}{\Gamma(b+1)\Gamma(a-b+1)}$$

## Gammafunktion





Damerau S.7

Riemann-Liouville Definition

$${}_a D_x^p f(x) = \frac{d^p f}{dx^p} \stackrel{\text{frakt.}}{=} \frac{1}{\Gamma(k-p)} \frac{d^k}{dx^k} \int_a^x (x-\xi)^{k-p-1} f(\xi) d\xi, \quad p \in \mathbb{R}^+, k \in \mathbb{N}, k-1 \leq p < k$$

z.B.  $k=1; p=0,7$   
 $0 < 0,7 < 1$

*Variable*

Caputo Definition

$${}_a^C D_x^p f(x) = \frac{1}{\Gamma(k-p)} \int_a^x \frac{f^{(k)}(\xi)}{(x-\xi)^{p-k+1}} d\xi, \quad k-1 < p < k, k \in \mathbb{N}$$

Beispiele für frakt. Ableitungen

aus [2] R. Herrmann



	ganzzahlig	fraktional
e-Funktion	$\frac{d^n}{dx^n} e^{kx} = k^n e^{kx}$	$\frac{d^\alpha}{dx^\alpha} e^{kx} = k^\alpha e^{kx}$
Sinus	$\frac{d^n}{dx^n} \sin(kx) = k^n \sin(kx + n \frac{\pi}{2})$	$\frac{d^\alpha}{dx^\alpha} \sin(kx) = k^\alpha \sin(kx + \alpha \frac{\pi}{2})$
Potenz	$\frac{d^n}{dx^n} x^k = \frac{k!}{(k-n)!} x^{k-n}$	$\frac{d^\alpha}{dx^\alpha} x^k = \frac{\Gamma(1+k)}{\Gamma(1+k-\alpha)} x^{k-\alpha}$

# Rheologische Modelle

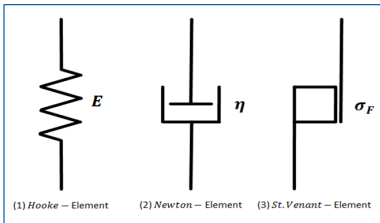
## 1. Was sind rheologische Modelle?



### Rheologische Modelle

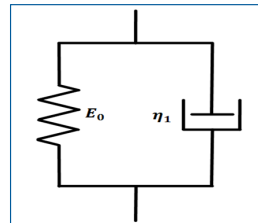
- Werden aus Standardelementen aufgebaut und in Netzwerkstruktur angeordnet
- Dienen der Erarbeitung einer Konstitutivgleichung (z.B.  $\sigma = E\varepsilon$ )

### Rheologische Standardelemente



- Ideale Feder (1)
- Idealer Dämpfer (2)
- (Ideale Reibung (3))

### Rheologisches Modell: Kelvin-Voigt



- Parallelschaltung von Feder und Dämpfer
- Konstitutivgleichungen
  - $\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}$  im Zeitbereich
  - $\sigma = (E + i\Omega\eta)\varepsilon$  im Frequenzbereich
- Materialmodell der Viskoelastizität
  - Realteil: Steifigkeit
  - Imaginärteil: Dämpfung

# Rheologische Modelle

## Verallgemeinerte rheologische Modelle – Das n-Parameter-Modell



### N-Parameter-Modell

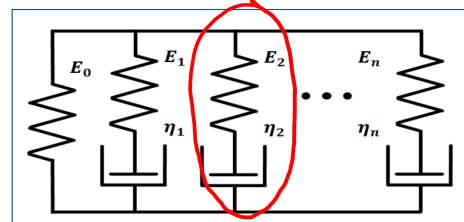
- Parallelschaltung einer Feder mit n-Maxwell-Elementen
- 2n+1 freie Parameter zur Beschreibung der Materialeigenschaften
- Parametrisierung bspw. über Curve-Fitting Verfahren

Konstitutivgleichung:  $\sigma = \left[ \left( E_0 + \sum_{n=1}^N \frac{E_n T_n \Omega^2}{1 + (T_n \Omega)^2} \right) + i \cdot \left( \sum_{n=1}^N \frac{E_n T_n \Omega}{1 + (T_n \Omega)^2} \right) \right] \varepsilon; T_n = \frac{\eta_n}{E_n}$

### Problematik:

- Real- und Imaginärteil werden durch die gleichen Parameter beschrieben
- Steigender Rechenaufwand für jeden weiteren Summenterm (z.B. in FE Berechnung)
- Curve-Fitting Algorithmus wird instabil mit steigender Anzahl von Parametern
- Annäherung des realen Materialverhaltens ähnelt einer Taylorentwicklung
- In der Praxis recht unhandlich und unpraktikabel

### Maxwell

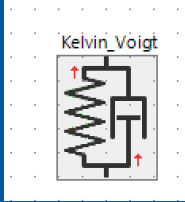


## Beispiel zur Herleitung der Konstitutivgleichung

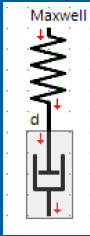
Feder + 1 Maxwell Element



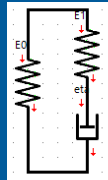
**Kelvin-Voigt**



**Maxwell**



**3-Parameter**



$$\sigma = E \epsilon + \eta \dot{\epsilon}$$

$$\sigma + \frac{\eta}{E_1} \dot{\sigma} = E_0 \epsilon + \eta \frac{E_0 + E_1}{E_1} \dot{\epsilon}$$

im Frequenzbereich

$$\sigma + \frac{i\Omega \eta}{E_1} \sigma = E_0 \epsilon + i\Omega \eta \frac{E_0 + E_1}{E_1} \epsilon$$

$$\sigma = \frac{E_0 + i\Omega \eta \frac{E_0 + E_1}{E_1}}{1 + \frac{i\Omega \eta}{E_1}} \epsilon$$

$$= E_0 + \frac{i\Omega \eta / E_1}{1 + i\Omega \eta / E_1} \epsilon$$

$$\sigma = \left( E_0 + \frac{E_1 \left( \frac{\eta}{E_1} \Omega \right)^2}{1 + E_1 \left( \frac{\eta}{E_1} \Omega \right)^2} + i \Omega \frac{E_1 \left( \frac{\eta}{E_1} \Omega \right)}{1 + E_1 \left( \frac{\eta}{E_1} \Omega \right)^2} \right) \epsilon$$

Einführung Relaxationszeit  $T_1 = \frac{\eta}{E_1} \left[ \frac{1}{s} \right]$

$$\sigma = \left( E_0 + \frac{E_1 (T_1 \Omega)^2}{1 + E_1 (T_1 \Omega)^2} + i \Omega \frac{E_1 (T_1 \Omega)}{1 + E_1 (T_1 \Omega)^2} \right) \epsilon$$

Technische Hochschule Ingolstadt | Jörg Bienert

17

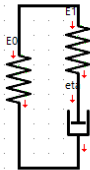
## Beispiel zur Herleitung der Konstitutivgleichung

Feder + 1 Maxwell Element



3-Parameter

Trennen Real-/Imaginärteil



$$\sigma = \left( E_0 + \frac{E_1 \left( \frac{\eta}{E_1} \Omega \right)^2}{1 + E_1 \left( \frac{\eta}{E_1} \Omega \right)^2} + i \Omega \frac{E_1 \left( \frac{\eta}{E_1} \Omega \right)}{1 + E_1 \left( \frac{\eta}{E_1} \Omega \right)^2} \right) \epsilon$$

Einführung Relaxationszeit  $T_1 = \frac{\eta}{E_1} \left[ \frac{1}{s} \right]$

$$\sigma = \left( E_0 + \frac{E_1 (T_1 \Omega)^2}{1 + E_1 (T_1 \Omega)^2} + i \Omega \frac{E_1 (T_1 \Omega)}{1 + E_1 (T_1 \Omega)^2} \right) \epsilon$$

Technische Hochschule Ingolstadt | Jörg Bienert

18

## Beispiel zur Herleitung der Konstitutivgleichung

Feder + 1 Maxwell Element



### 3-Parameter

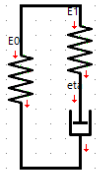
Fraktionale Verallgemeinerung

$$\left( \sum_n p_n (i\Omega)^\alpha \right) \sigma = \left( \sum_n q_n (i\Omega)^\beta \right) \epsilon$$

für das 3 Parameter-Modell ergibt sich unter  $\alpha = \beta$ .

$$E^*(\Omega) = \frac{E_0 + T_1 (E_0 + E_1) (i\Omega)^\alpha}{1 + T_1 (i\Omega)^\alpha}$$

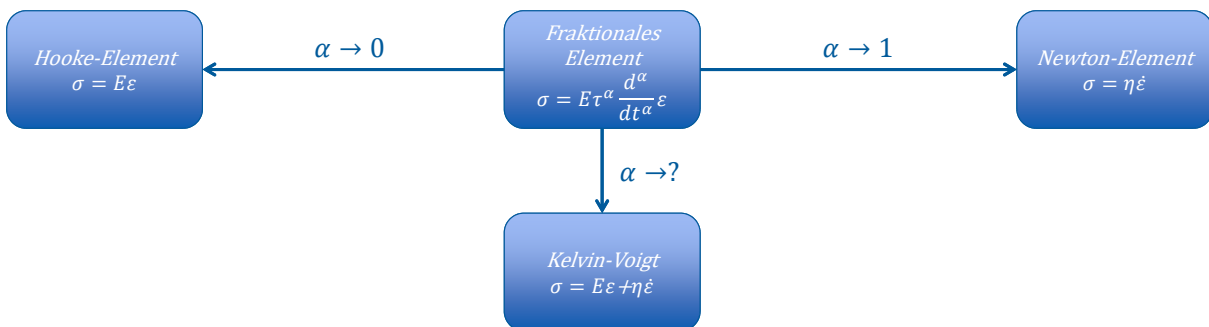
Messdaten werden über die Optimierung von  $E_0, E_1, T_1, \alpha$  für die Anpassung an das Modell verwendet.



19

## Rheologische Modelle

Parallelen zwischen fraktionalen Elementen und fraktalen Netzwerkstrukturen



- Entgegen der Intuition stellt das fraktionale Element mehr dar als eine parametrische Zwischenform wie das Kelvin-Voigt-Modell
- Unendliche Leiterstrukturen und fraktale Sierpinski Netzwerke konvergieren gegen ein fraktionales Modell

## Fouriertransformation für frakt. Ableitungen

... das erleichtert Vieles – insbesondere bei DGLn



$$\mathfrak{F} \left\{ \frac{d^n f(x)}{dx^n} \right\} = (i\omega)^n \mathfrak{F} \{ f(x) \}$$

aus der Produktregel:  $(uv)' = u'v + uv' \Rightarrow [uv] = \int u'v dx + \int uv' dx$

erweiterbar auf  $(i\omega)^\alpha$

$$\mathfrak{F} \{ f'(t) \} = i\omega \mathfrak{F} \{ f(t) \}$$

Ableitung  $f'(t)$   
Integralen des Fourier-T  $e^{-i\omega t}$

$$[f(t)e^{-i\omega t}] \xrightarrow{\rightarrow 0} = \underbrace{\int f'(t) e^{-i\omega t} dt}_{\mathfrak{F} \{ f'(t) \}} - i\omega \underbrace{\int f(t) e^{-i\omega t} dt}_{\mathfrak{F} \{ f(t) \}}$$

- hieraus ergeben sich die weitläufigsten Vereinfachungen und Anwendungen in der Strukturdynamik

## 1-FHG Schwinger mit fraktionalen Ableitungen

DGL und FRF

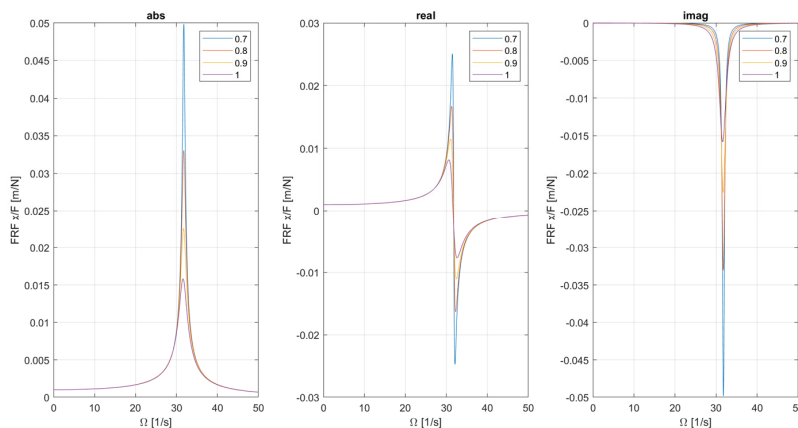
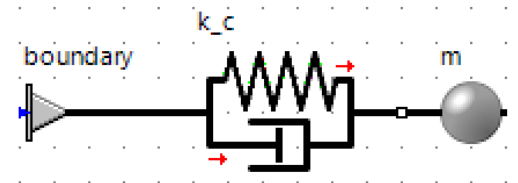


- Differenzialgleichung

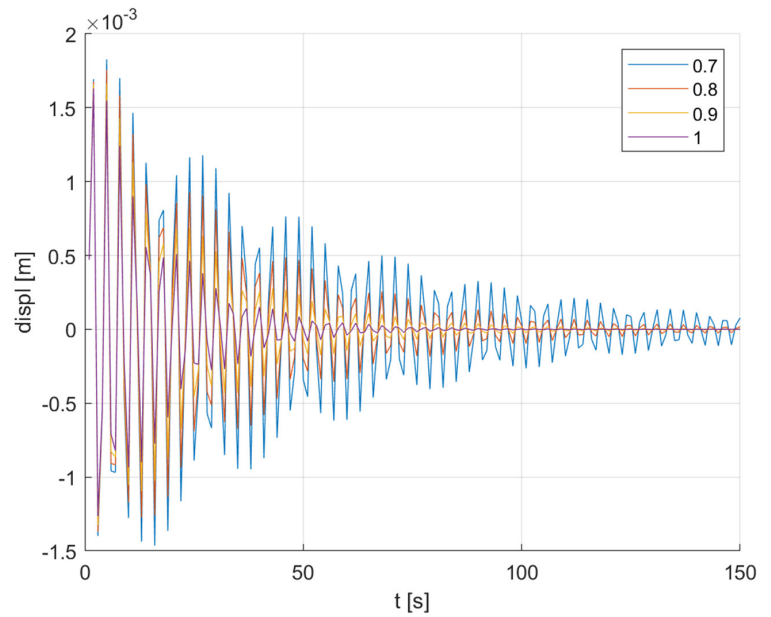
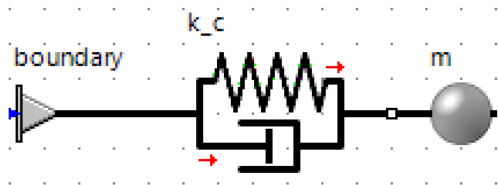
$$m \frac{\partial^2}{\partial t^2} x + c \frac{\partial^\alpha}{\partial t^\alpha} x + k x = F(t)$$

- im Frequenzbereich

$$((i\Omega)^2 m + c (i\Omega)^\alpha + k) X(\Omega) = F(\Omega)$$



Impulsantwort im Zeitbereich

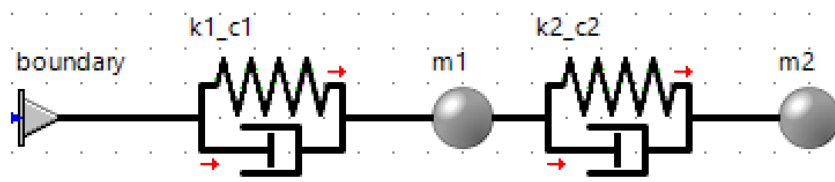


MFHG Schwinger mit fraktionalen Ableitungen

DGL und FRF

denkbare Alternativen  
 $C_1 \frac{d}{dt} x + C_2 \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} x$

- Differenzialgleichung  $M \frac{\partial^2}{\partial t^2} x + C \frac{\partial^\alpha}{\partial t^\alpha} x + K x = F(t)$
- im Frequenzbereich  $((i \Omega)^2 M + (i \Omega)^\alpha C + K) X(\Omega) = F(\Omega)$
- als Übertragungsfunktion  $H(\Omega) = ((i \Omega)^2 M + (i \Omega)^\alpha C + K)^{-1}$





## MFHG Schwinger mit fraktionalen Ableitungen

### modale Darstellung

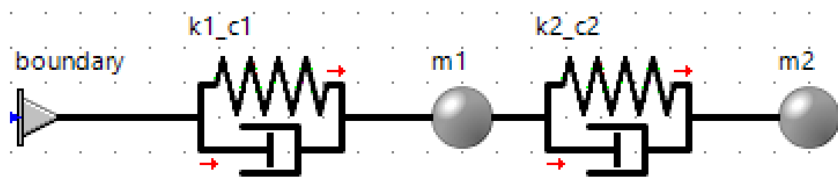
- Differenzialgleichung  $\mathbf{M} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{x} + \mathbf{C} \frac{\partial^\alpha}{\partial t^\alpha} \mathbf{x} + \mathbf{K} \mathbf{x} = \mathbf{F}(t)$
- im Frequenzbereich  $((i \Omega)^2 \mathbf{M} + (i \Omega)^\alpha \mathbf{C} + \mathbf{K}) \mathbf{X}(\Omega) = \mathbf{F}(\Omega)$
- als Übertragungsfunktion  $\mathbf{H}(\Omega) = ((i \Omega)^2 \mathbf{M} + (i \Omega)^\alpha \mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1}$
- für die Entkopplung der Matrizen reichen dieselben Bedingungen aus wie beim System mit reiner, viskoser

Dämpfung  $((i \Omega)^2 \underbrace{\mathbf{Y}^T \mathbf{M} \mathbf{Y}}_{diag} + (i \Omega)^\alpha \underbrace{\mathbf{Y}^T \mathbf{C} \mathbf{Y}}_{diag} + \underbrace{\mathbf{Y}^T \mathbf{K} \mathbf{Y}}_{diag}) \mathbf{Q}(\Omega) = \mathbf{Y}^T \mathbf{F}(\Omega)$  mit  $\mathbf{X} = \mathbf{Y} \mathbf{Q}$

## Beispiel 2-FHG Schwinger mit fraktionalen Ableitungen

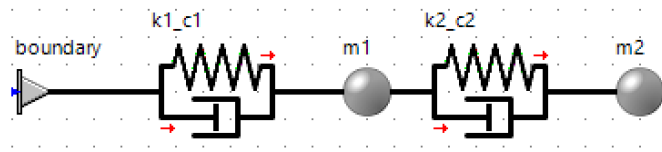
### DGL und FRF

- Differenzialgleichung  $\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \frac{\partial^\alpha}{\partial t^\alpha} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \mathbf{x} = \mathbf{F}(t)$
- im Frequenzbereich  $((i \Omega)^2 \mathbf{M} + (i \Omega)^\alpha \mathbf{C} + \mathbf{K}) \mathbf{X}(\Omega) = \mathbf{F}(\Omega)$

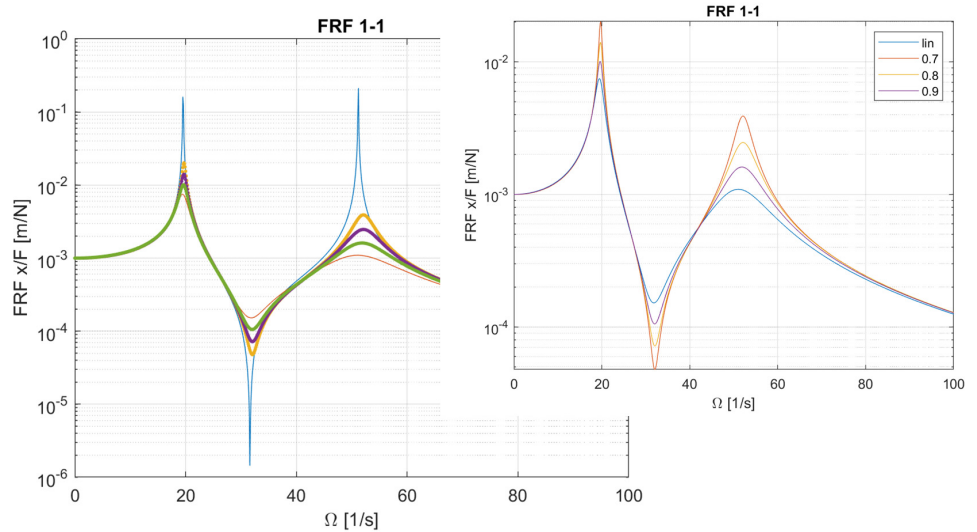


## Beispiel 2-FHG Schwinger mit fraktionalen Ableitungen

DGL und FRF



modale Darstellung



## Balkenschwingungen mit fraktionalem Materialmodell

### 1. Implementierung von Materialmodellen in die Schwingungsdifferentialgleichung



Schwingungsdifferentialgleichung eines Balkens:

$$EIw'''' + EI k_s \dot{w}'''' + \mu \dot{w} = f(t) \text{ mit Kelvin-Voigt Materialmodell } \sigma = E(\varepsilon + k_s \dot{\varepsilon})$$

Erweiterung der PDGL auf beliebige Materialmodelle

Annahme eines beliebigen Materialmodells:

$$D_\sigma^n \sigma = D_\varepsilon^n \varepsilon \text{ mit } D_\sigma^n = \left( \sum_{n=0}^N p_n \frac{d^{\alpha_n}}{dt^{\alpha_n}} \right) \alpha_n \in \mathbb{R} \text{ und } D_\varepsilon^n = \left( \sum_{n=0}^M q_n \frac{d^{\beta_n}}{dt^{\beta_n}} \right) \beta_n \in \mathbb{R}$$

Ergibt die PDGL:

$$EI D_\varepsilon^n w''''(x, t) + \mu D_\sigma^n \dot{w} = D_\sigma^n f(t)$$

Fouriertransformation der PDGL:

$$E(\Omega) I W''''(x, \Omega) - \mu \Omega^2 W(x, \Omega) = F(\Omega) \text{ mit } E(\Omega) = E \frac{D_\varepsilon^n(\Omega)}{D_\sigma^n(\Omega)}$$

→ Fraktionale Ableitungsgrade werden wie ganzzahlige durch Fouriertransformation in Faktoren  $(i\Omega)^\alpha$  transformiert

→ Frequenzabhängiger E-Modul aus dem Materialmodell geht direkt in die PDGL ein

## Balkenschwingungen mit fraktionalem Materialmodell

### 2. Modaltransformation und Lösung im Frequenzbereich

Gegeben ist die homogene PDGL des Balkens:  $EIw'''' + \mu\ddot{w} = 0$

Produktansatz nach Bernoulli:  $w(x, t) = \varphi(x) \cdot q(t) \rightarrow EI\varphi''''q + \mu\varphi\ddot{q} = 0$

→ Separation nach Orts- und Zeitfunktionen liefert DGL für Ortsfunktionen  $\varphi_j(x)$

→ Formulierung von Massen- und Steifigkeits-Orthogonalitätsrelationen ermöglicht die Einführung modaler Massen und Steifigkeiten

Modale Massen:  $m_j = \int_0^L \mu \varphi_j(x)^2 dx; j = 1.. \infty$

Modale Steifigkeit:  $s_j = \int_0^L EI [\varphi_j(x)'']^2 dx; j = 1.. \infty$

Generalisierte Anregung:  $r_j = \int_0^L \varphi_j(x) f(x, t) dx$

Damit geht die PDGL  $EIw'''' + \mu\ddot{w} = f(x, t)$  durch Modaltransformation über in:  $m_j \ddot{q}_j + s_j q_j = r_j f(t) \quad j = 1.. \infty$

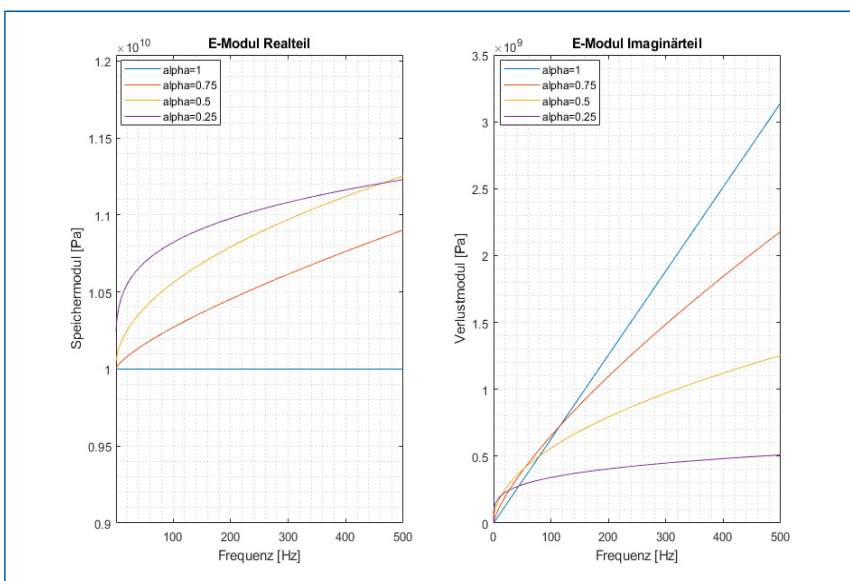
Dieses Verfahren ist auch gültig für die PDGL des Balkens mit beliebigen Materialgesetzen:  $m_j D_\sigma^n \ddot{q}_j + s_j D_\varepsilon^n q_j = r_j D_\sigma^n f(t) \quad \forall j = 1 \dots \infty$

Die Lösung des Systems erfolgt dann im Frequenzbereich durch modale Superposition und liefert die Übertragungsfunktion:

$$H(\Omega) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\varphi_j r_j}{\int_0^L E^*(\Omega) I [\varphi_j'']^2 dx - m_j \Omega^2} = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\varphi_j r_j}{s_j^*(\Omega) - m_j \Omega^2}$$

## Balkenschwingungen mit fraktionalem Materialmodell

### 3. Vergleich der Materialmodelle



Geometrie des Balkens:

$$L = 200\text{mm}, b = h = 20\text{mm}$$

Materialgesetz:

$$\sigma = E_0 \varepsilon + E_1 \tau^\alpha \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} \varepsilon$$

Materialparameter:

$$E_0 = 10000\text{MPa}$$

$$E_1 = 0.1 \cdot E_0$$

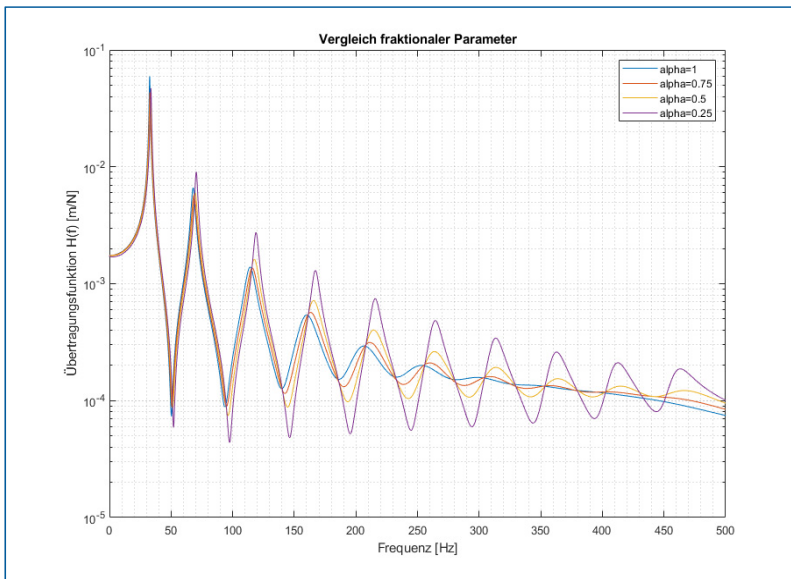
$$\tau = 0.001$$

Verglichene Ableitungsordnungen:

$$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0.75, \alpha_3 = 0.5, \alpha_4 = 0.25$$

## Balkenschwingungen mit fraktionalem Materialmodell

### 4. Vergleich der Frequenzgänge



< 50 Hz

- Frequenzgänge beinahe identisch
- In Resonanzstelle KV höher als fraktionale Modelle

>50 Hz

- Eigenfrequenzen verschieben sich nach oben
- Mit sinkendem  $\alpha$  bleiben die Resonanzstellen länger erhalten
- Ab 7. Mode keine Resonanzstelle bei KV mehr erkennbar

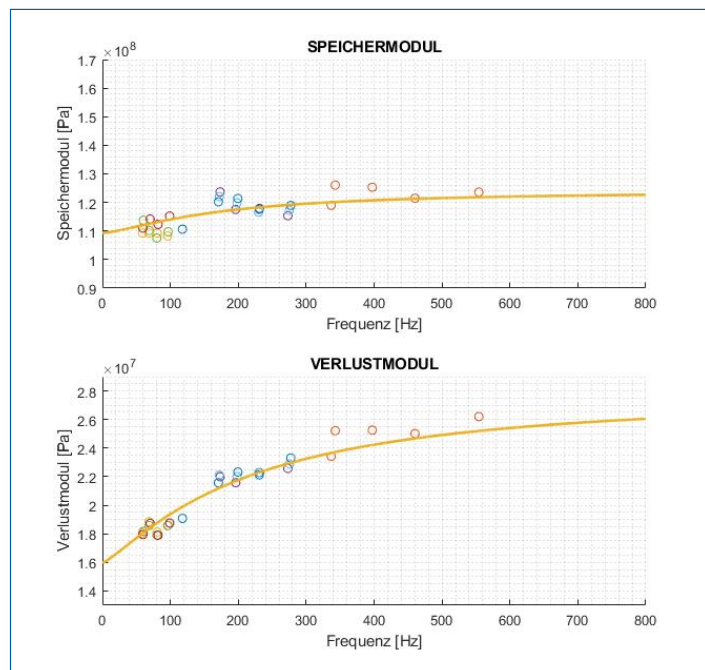
## Balkenschwingungen mit fraktionalem Materialmodell

### 4. Ergebnis der Materialparameter



- verwendetes Materialmodell: 3-Parameter
- Materialparameter  $E_0, E_1, T_1$  und
- Exponent  $\alpha$

1. Höhere Moden werden durch den linear ansteigenden Verlustmodul des Kelvin-Voigt-Modells unterdrückt und klingen in der Impulsantwort sofort ab
2. Die Dämpfung niederfrequenter Moden ist sehr gering, weshalb die Impulsantwort länger erhalten bleibt als bei den fraktionalen Modellen

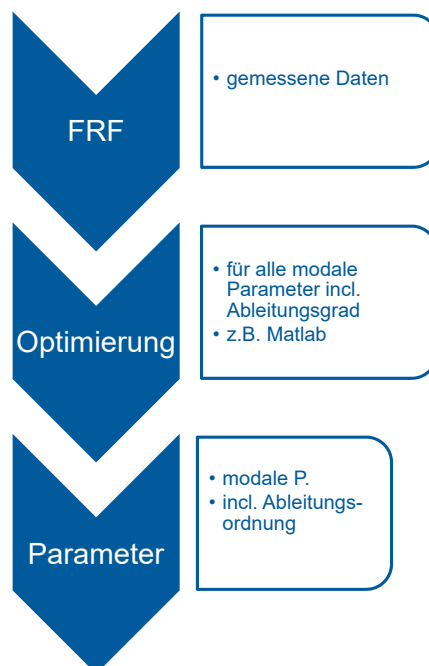


## Bedeutung der Anwendung für verschiedene Materialklassen



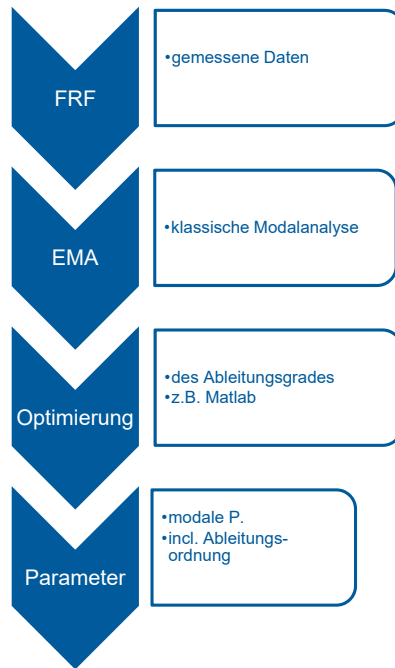
1. Metalle - > wenig Bedarf, da sehr schwach gedämpft
2. Strukturen zusätzlicher Dämpfung, z.B. Bitumenfolien, Bitumen-Alu-Verbundfolien, Silikonauflagen, Gel, Kautschukverbunde
3. Neue Materialien
  - a. 3D Druck /Additive Fertigung
  - b. CFK

## Wege zur Parameteridentifikation bei Fraktionalen Dämpfungsmodellen Anwendungsmethoden



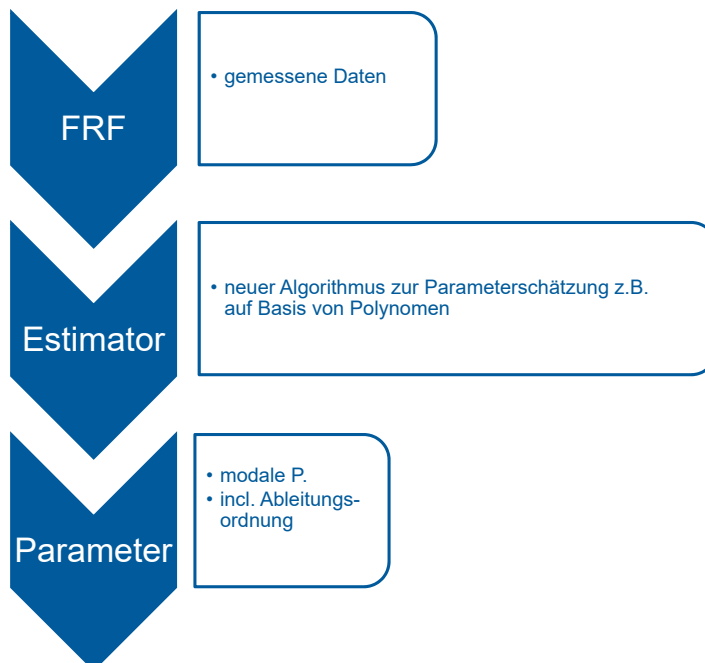
## Wege zur Parameteridentifikation bei Fraktionalen Dämpfungsmodellen

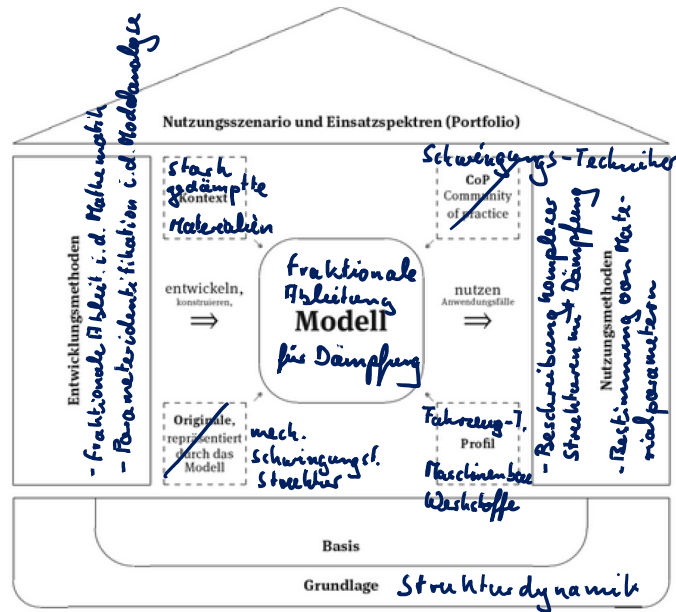
### Anwendungsmethoden



## Wege zur Parameteridentifikation bei Fraktionalen Dämpfungsmodellen

### Anwendungsmethoden





aktueller Stand

- fraktionale Ableitungen in der Dämpfung sind sinnvoll und sind mit rheologischen Modellen verwandt
- Berechnungen im Zeitbereich sind sehr mühsam
- die Überführung der Differentialgleichung in den Frequenzbereich ist ein relativ einfacher Weg
- die Struktur der Übertragungsfunktion bleibt ähnlich;
- die Gesetzmäßigkeit für die reellen Eigenvektoren bleibt gleich; so z.B. für Platten und Balken
- eine Anpassung der Parameter in der fraktionalen Beschreibung mit Optimierungsalgorithmen (z.B. mit Matlab) liefert die gewünschten Ergebnisse
- eine Umsetzung auf bekannte Curve-Fitting Methoden der Strukturodynamik ist ein nächster Schritt
- die Umsetzung auf die Parameteridentifikation bei der Operational Modal Analysis (OMA) ist noch nicht klar

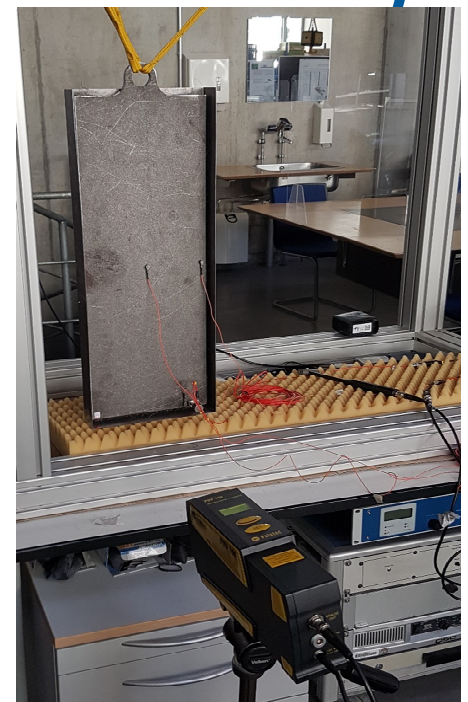
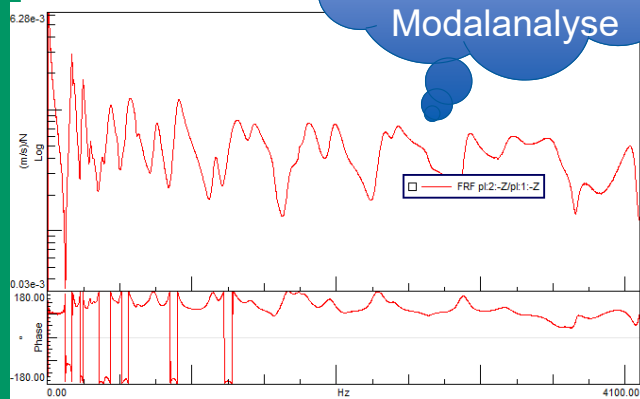
- [1] J. Damerau, „Untersuchung der dynamischen Eigenschaften von Balken mit fraktionalem Stoffgesetz“, Diss., Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2008.
- [2] R. Hilfer, *Applications of fractional calculus in physics*, Singapore [u.a.]: World Scientific, 2000.
- [3] M. D. Ortigueira, *Fractional calculus for scientists and engineers*. Dordrecht [u.a.]: Springer, 2011.
- [4] H. Schiessel, „Mesoscopic Pictures of the Sol-Gel Transition: Ladder Models and Fractal Networks“, *Mesoscopic Pictures of the Sol-Gel Transition: Ladder Models and Fractal Networks*, Bd. 28, Nr. 11, S. 4013–4019, 1995.
- [5] R. Markert, *Strukturdynamik*, 1. Auflage, Shaker Verlag, 2013.
- [6] R. Herrmann, „Fraktionale Infinitesimalrechnung“, 2. Auflage, Books on Demand, Norderstedt, 2014.
- [7] D. Puhst, „Gebrochene Ableitungen und Anwendungen“, Technische Universität Berlin, Apr. 2010.
- [8] Sondipon Adhikari, *Damping Models for Structural Vibration*, PhD, Cambridge, 2000.

### Maschinenakustische Gleichung

abhängig von der Strukturdynamik der gedämpften Struktur

$$P_K = Z \int_A \tilde{v}^2 \sigma$$

Parameterbestimmung über eine klassische Modalanalyse





# 11. Modellierung der Strukturintensität

*Nikolai Kleinfeller, Christian Adams, Tobias Melz*  
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet SAM

## Die Strukturintensität als Modell für den Körperschalltransfer in Maschinenstrukturen

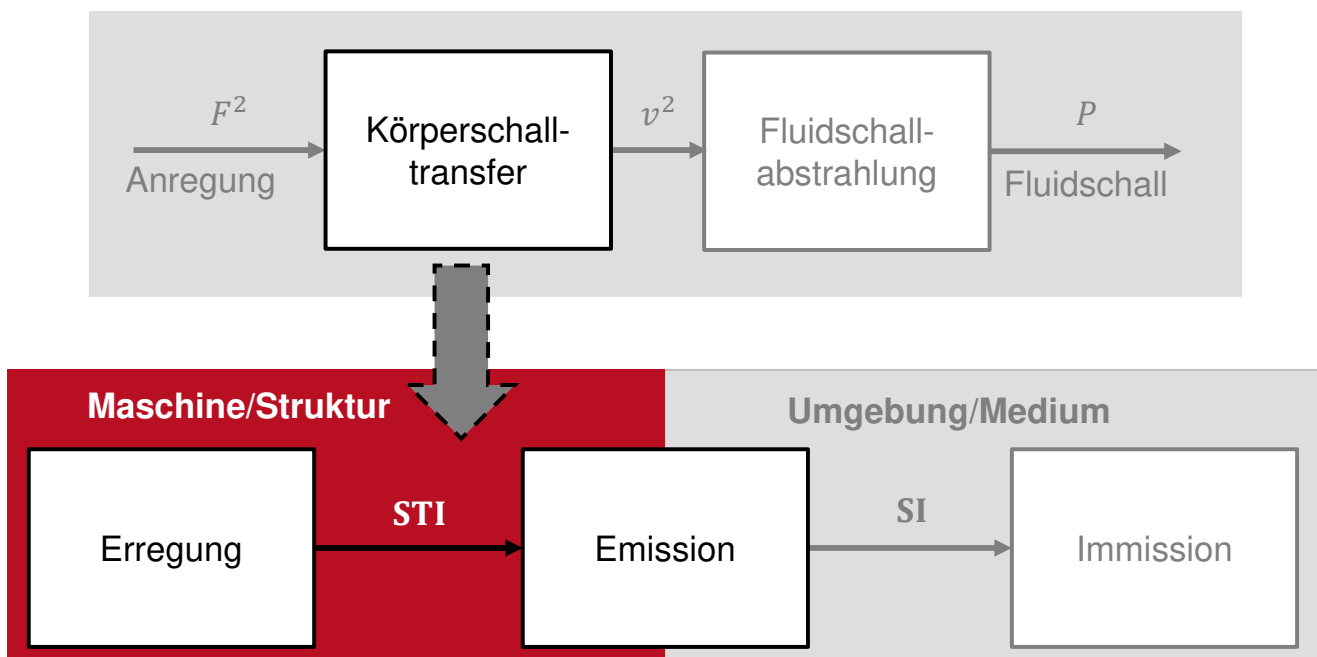
Nikolai Kleinfeller<sup>a</sup>,

Christian Adams<sup>a</sup> und Tobias Melz<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM

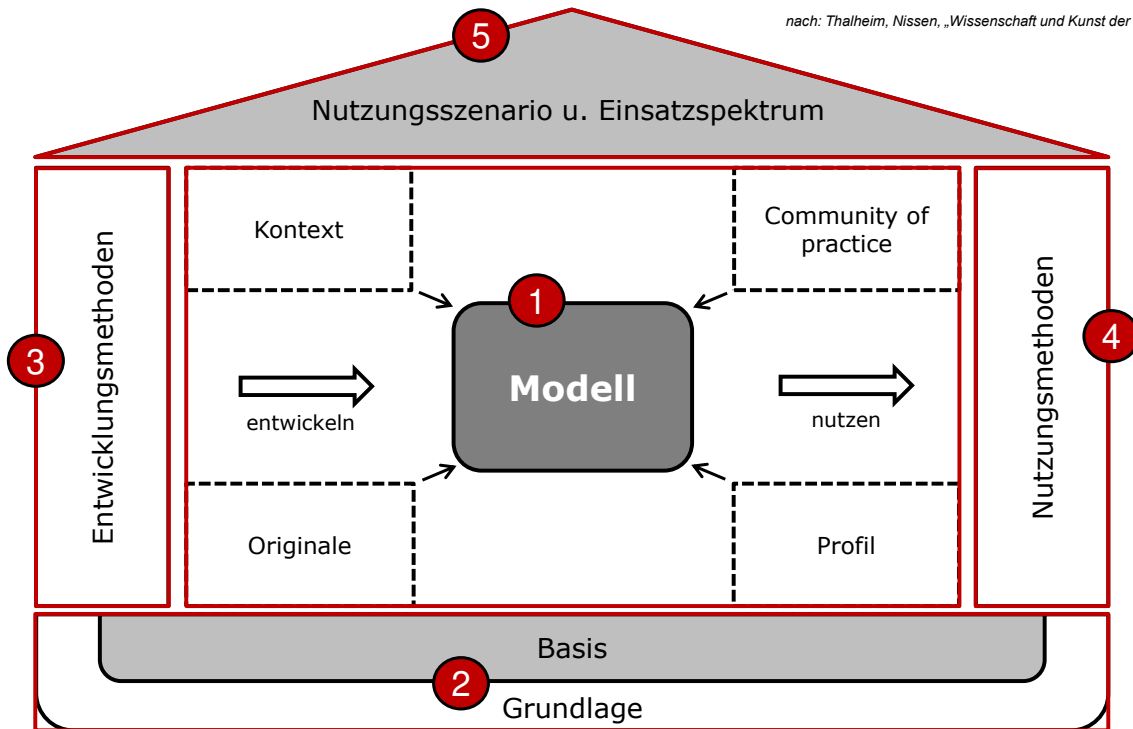
<sup>b</sup> Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

### Motivation

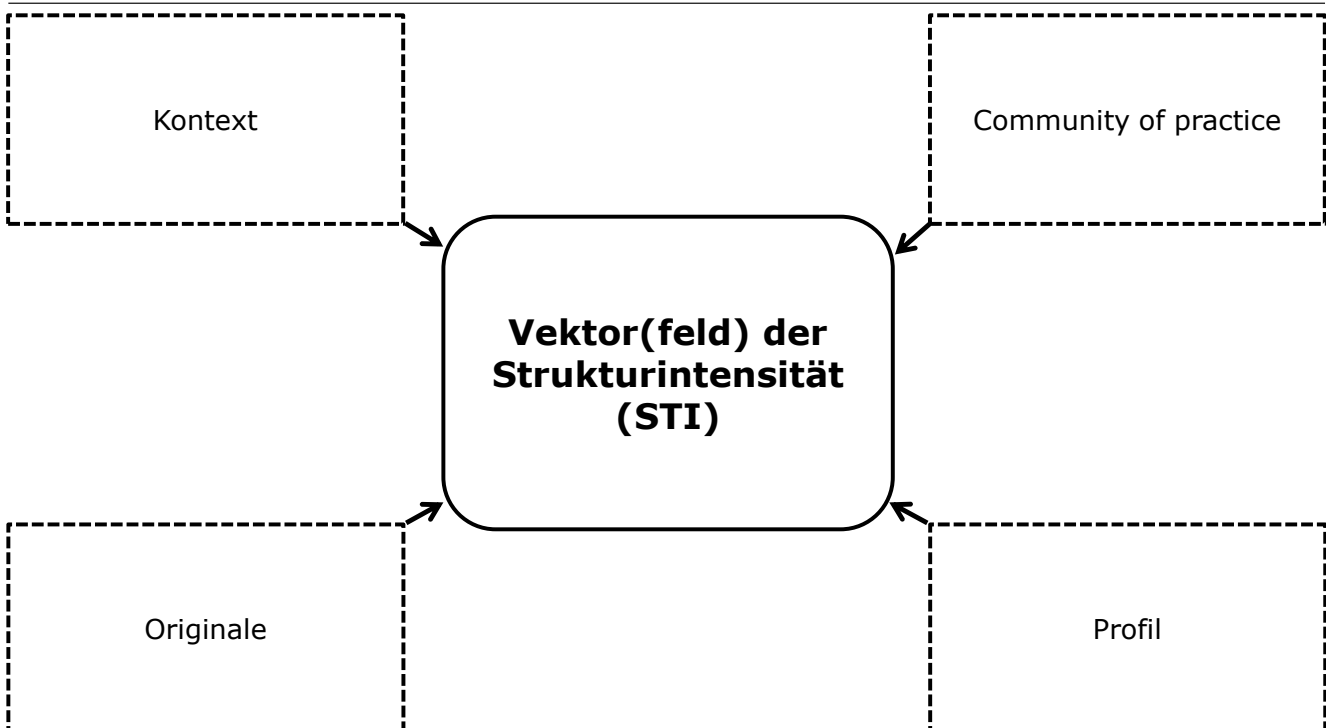


(HERING 2012)

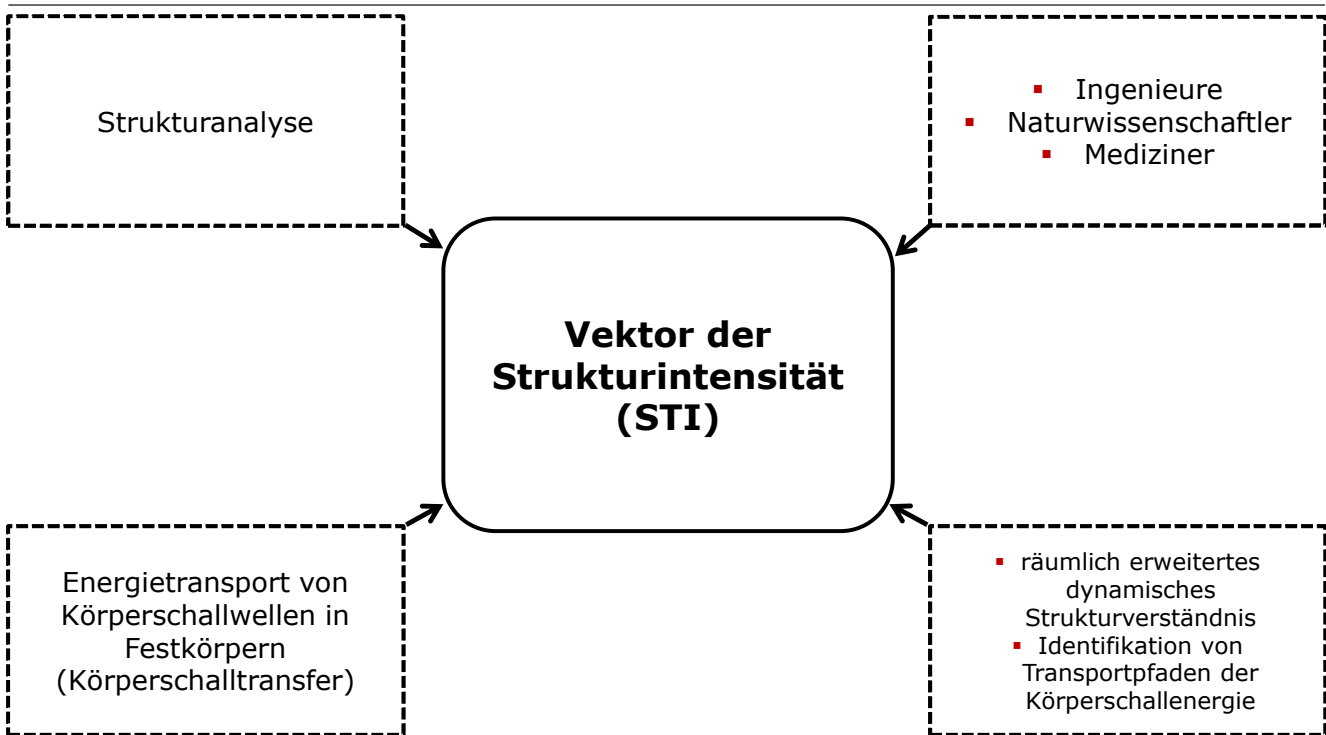
# Gliederung des Vortrags



# Modellhaus – Modell (1)

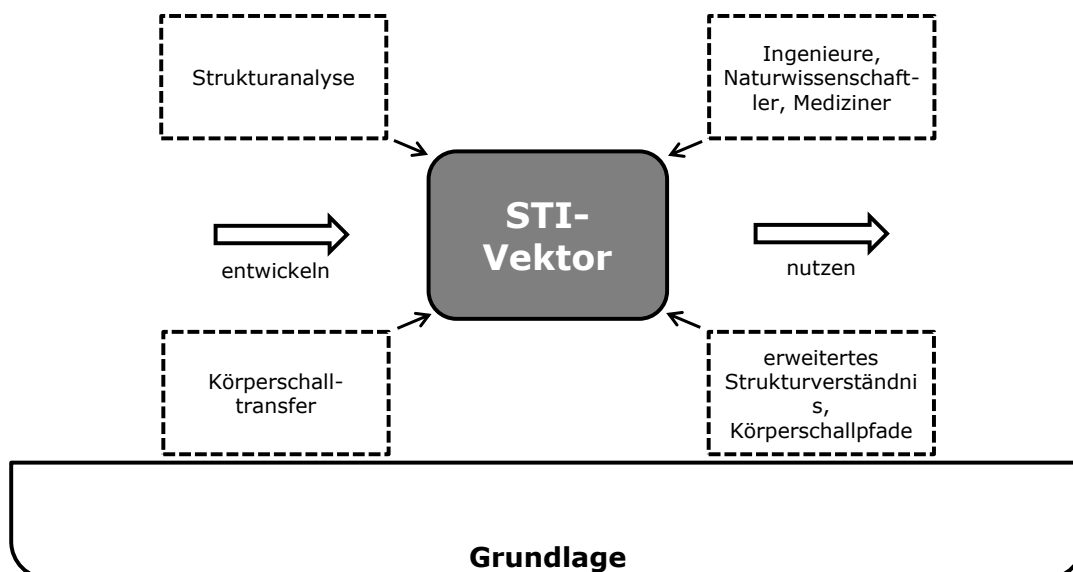


# Modellhaus – Modell (2)



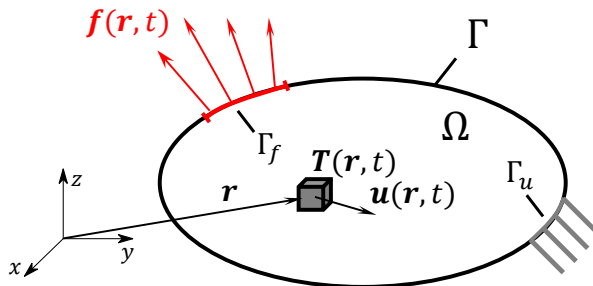
# Modellhaus – Grundlage (1)

nach: Thalheim, Nissen, „Wissenschaft und Kunst der Modellierung“



## Modellhaus – Grundlage (2)

- elastodynamische Grundgleichungen für homogenes, isotropes und dissipatives Kontinuum  $\Omega$  mit Rand  $\Gamma$



(LANGENBERG 2009)

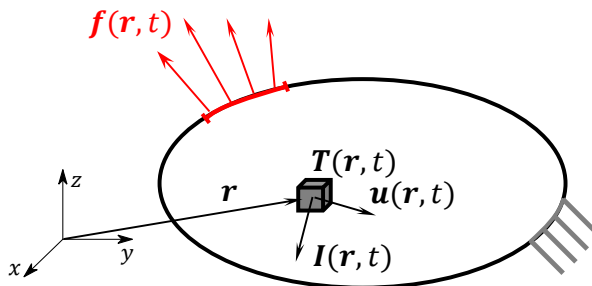
- Rand  $\Gamma_u$  mit Randbedingung
- Rand  $\Gamma_f$  mit Vektor der Kraftdichte  $f(\mathbf{r}, t)$

- Körperschallfeld am Ort  $\mathbf{r}$  beschrieben durch Verschiebungsvektor  $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$  und Spannungstensor  $\mathbf{T}(\mathbf{r}, t)$

## Modellhaus – Grundlage (3)

- Bilanzgleichung (1. HS) für die zeitliche Änderung der Energiedichte

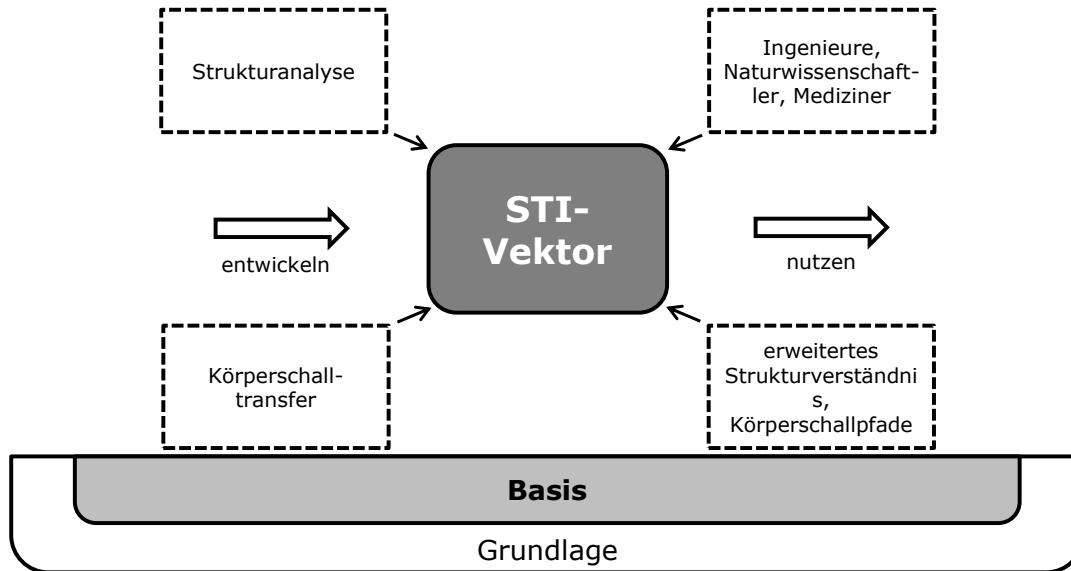
$$\frac{\partial e(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \frac{\partial e_{\text{pot}}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \frac{\partial e_{\text{kin}}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = -\underbrace{\nabla \cdot \left( \mathbf{T}(\mathbf{r}, t) \frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \right)}_{\mathbf{I}(\mathbf{r}, t)} + \frac{\partial e_{\text{zu}}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} - \frac{\partial e_{\text{diss}}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$



(LANGENBERG 2009)

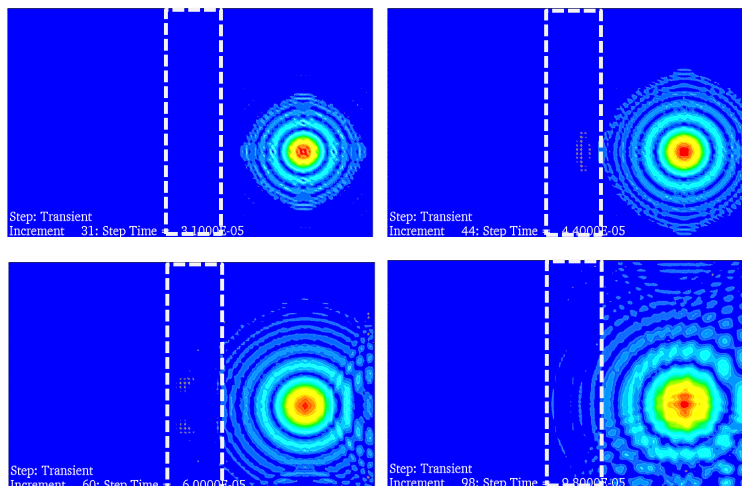
- $\mathbf{I}(\mathbf{r}, t)$  ist der Vektor der Energiestromdichte.
- $\mathbf{I}(\mathbf{r}, t)$  wird in der Akustik als Vektor der Strukturintensität (STI) bezeichnet.

nach: Thalheim, Nissen, „Wissenschaft und Kunst der Modellierung“



- Der Vektor der STI  $I(\mathbf{r}, t)$  im Zeitbereich mit

$$I(\mathbf{r}, t) = T(\mathbf{r}, t) \frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}.$$



(HERING 2012)

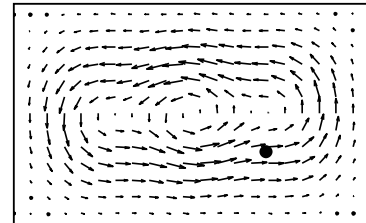
# Modellhaus – Basis (3)

- Analyse reell-zeitharmonischer Körperschallfelder im Frequenzbereich führt zum komplexen Vektor der STI

$$\underline{I}(\mathbf{r}, f) = I^{\Re}(\mathbf{r}, f) + iI^{\Im}(\mathbf{r}, f).$$

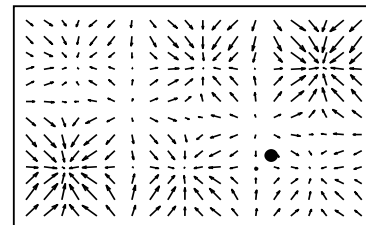
$I^{\Re}$ : aktive STI

- ist die zeitlich gemittelte Energiestromdichte  $\langle I(\mathbf{r}, t) \rangle$
- Analogon zur elektrischen Wirkleistung
- beschreibt die in der Struktur „verbrauchte“ Energie



$I^{\Im}$ : reaktive STI

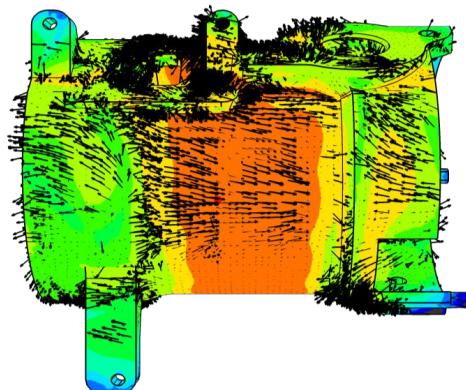
- Analogon zur elektrischen Blindleistung
- physikalisch Bedeutung in der Literatur umstritten (MAYSENHÖLDER 1994)



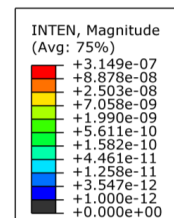
# Modellhaus – Basis (4)

- dreidimensionaler Vektors der STI

$$\underline{I} = (I_x, I_y, I_z)^T \text{ in } \text{Wm}^{-2}$$



$I^{\Re}$  in  $\text{Wm}^{-2}$

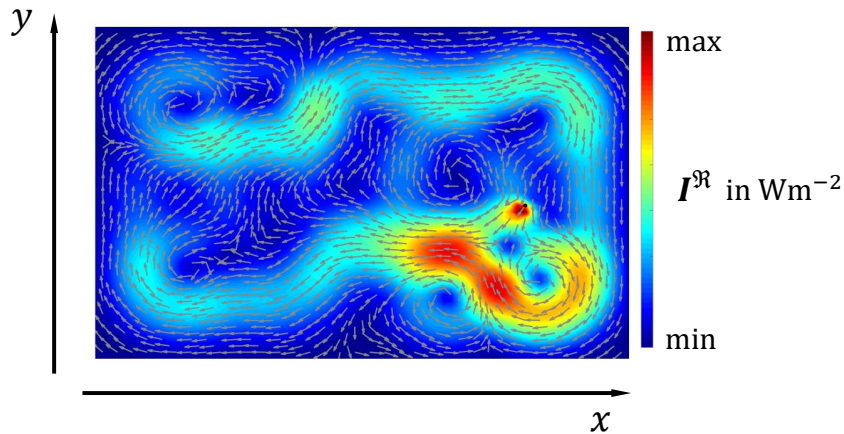


(ADAMS 2015)

# Modellhaus – Basis (5)

- zweidimensionaler Vektors der STI

$$\underline{I}' = (I_x, I_y)^T \quad \text{in Wm}^{-1}$$

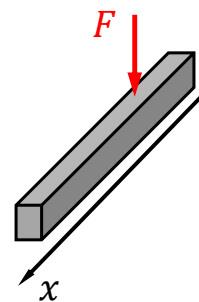
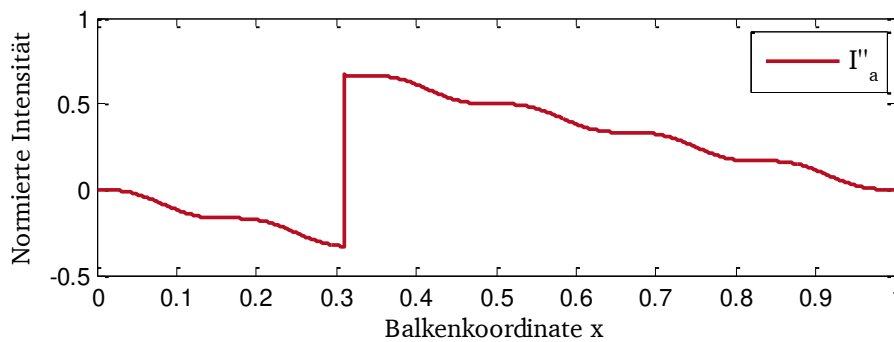


(KLEINFELLER 2018)

# Modellhaus – Basis (6)

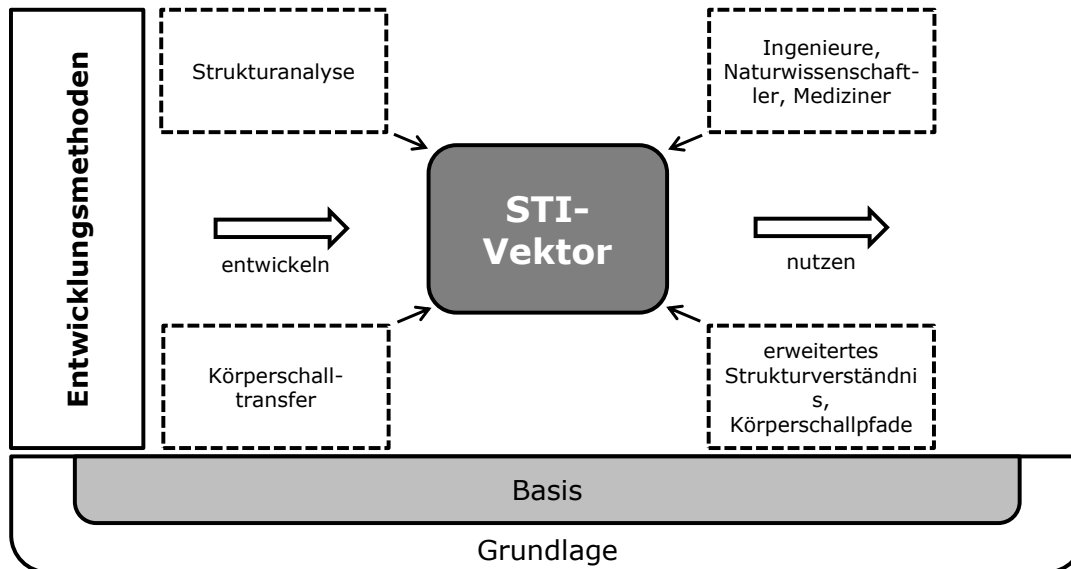
- eindimensionaler Vektors der STI

$$\underline{I}'' = I_x \quad \text{in W}$$



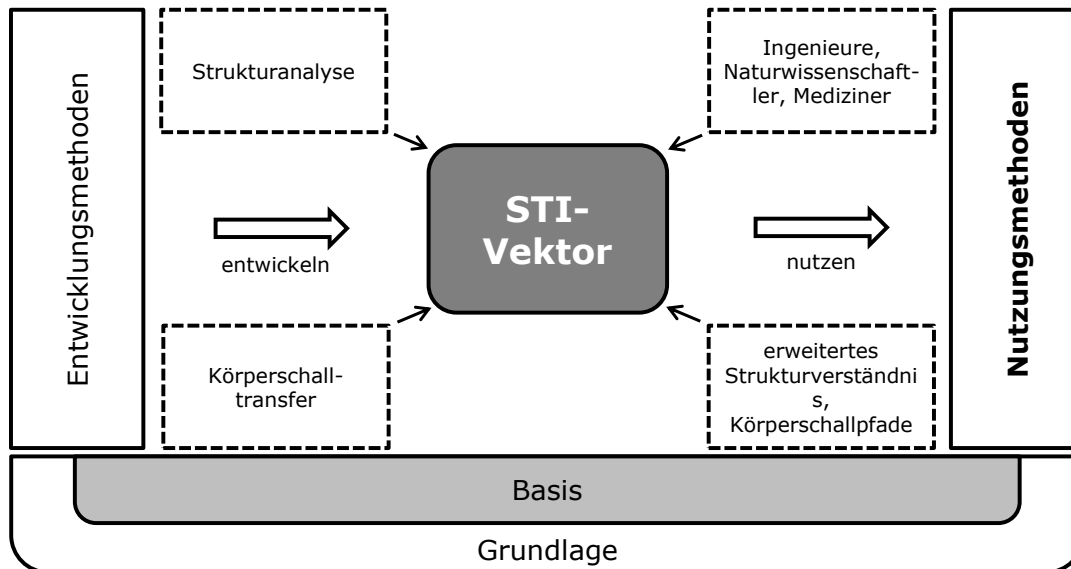
(HERING 2012)





- Der Vektor der STI wird im Postprocessing aus Strukturgrößen (Spannungen, Schnittreaktionen, Verschiebungen) bestimmt.
  - Ermittlung des Vektors der STI basierend auf
    - analytisch ermittelten
    - numerisch ermittelten (z. B. FEM)
    - oder experimentell ermittelten (z. B. B-Aufnehmer, SLDV, DIC)
- ... Strukturgrößen (Daten) des Körperschallfeldes.

nach: Thalheim, Nissen, „Wissenschaft und Kunst der Modellierung“

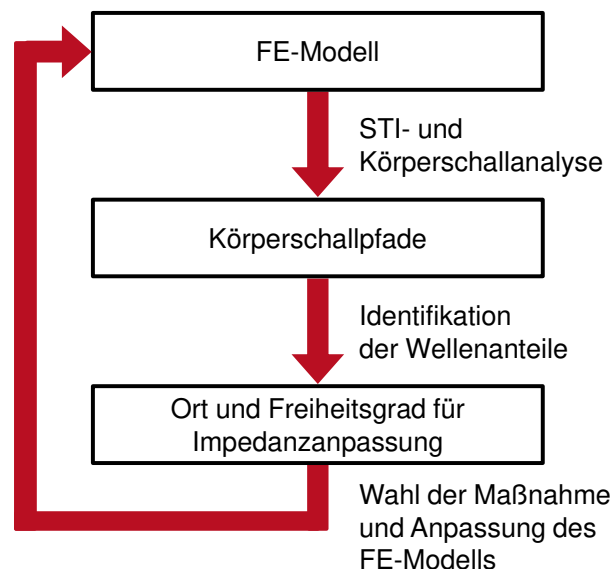


22.10.2021 | Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM | Prof. Dr. Tobias Melz | 17



- erfahrungsbasierte Nutzungsmethoden

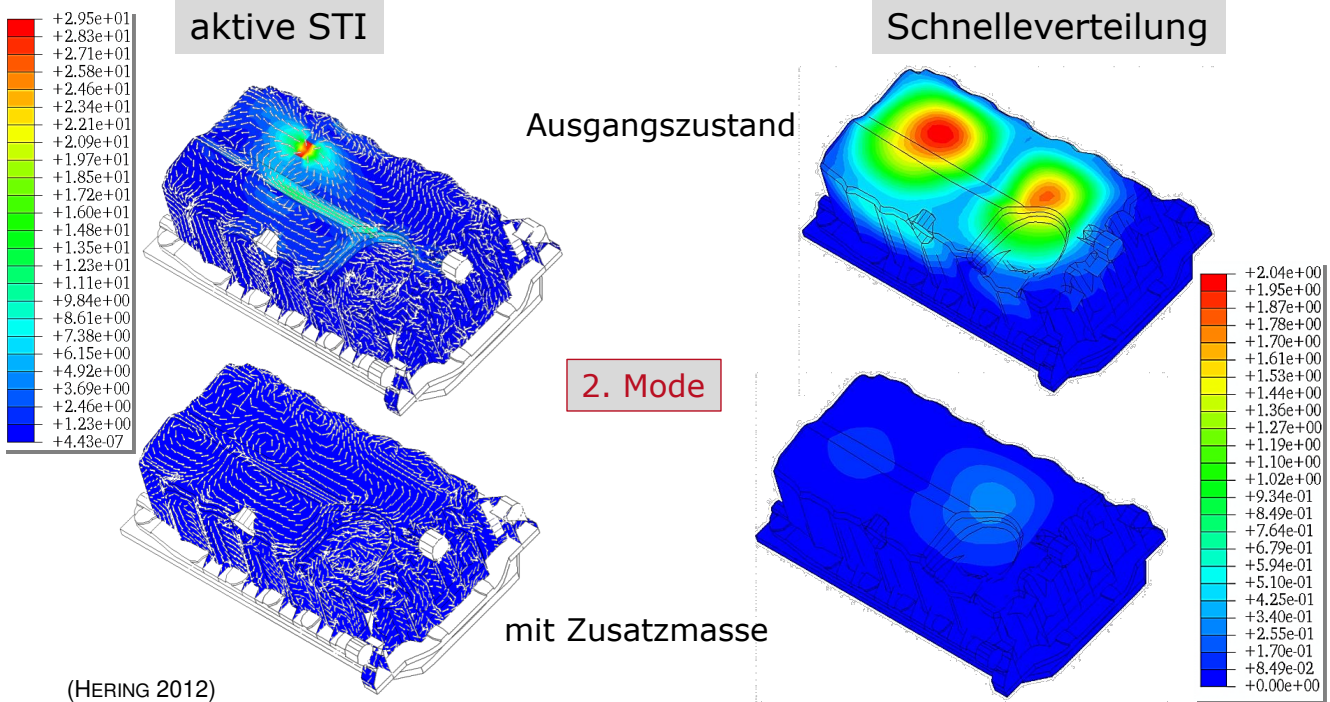
visuelle Datenauswertung und Entscheidungsfindung durch den Ingenieur, Anwender



(HERING 2012)

22.10.2021 | Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM | Prof. Dr. Tobias Melz | 18





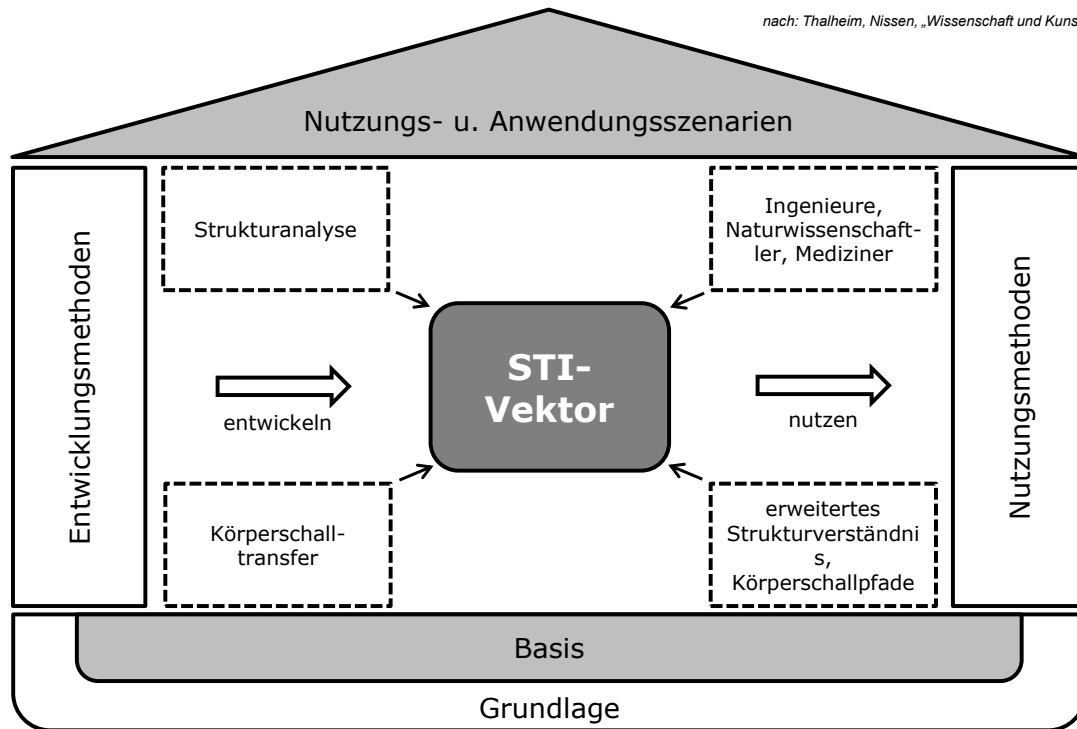
(HERING 2012)

- datenbasierte Nutzungsmethoden
  - STI-basierte Skalare als Grundlage eines Auslegungskriteriums

(SCHAAL 2016)

- Strukturoptimierung basierend auf der STI

(ROTHE 2019)



- Schadensanalyse (Schadensdetektion)

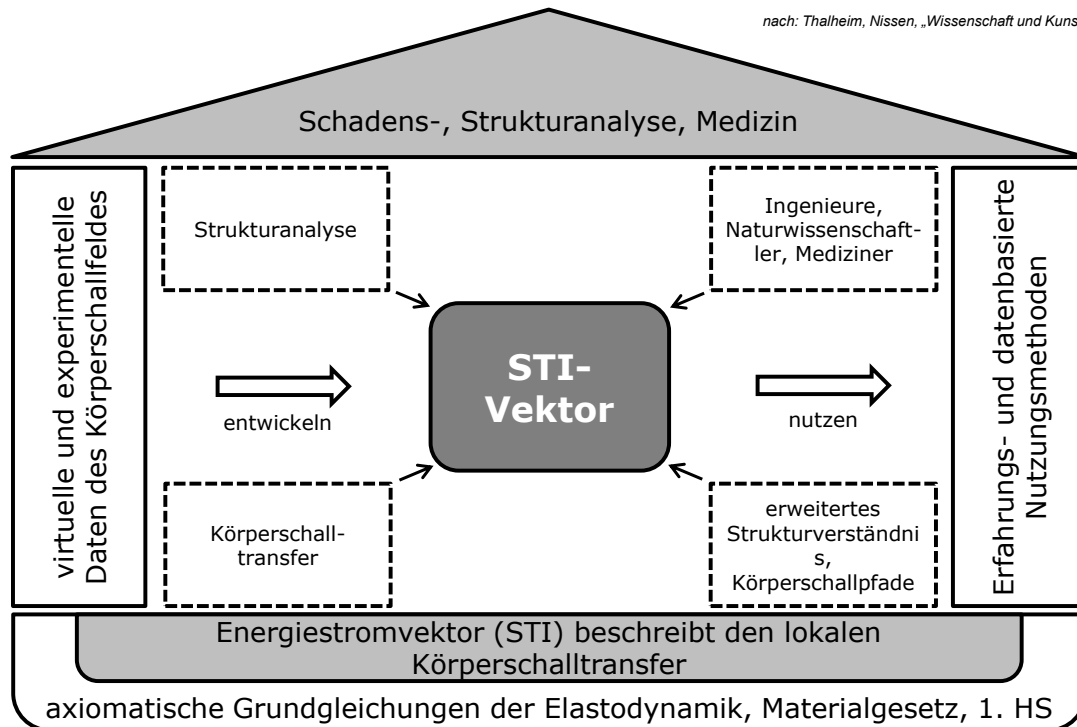
(LEE 2006, LAMBERTI 2013, ROMANO 2013)

- Strukturanalyse

(HIGASHI 2005, SCHOENWALD 2009, BA'BA'A 2018)

- Medizin u. Biophysik

(CUI 2009, LEE 2010, PIRES 2019)



## Literaturverzeichnis (1)

- (KHUN 2004) **Khun, M.S., Lee, H.P., und Lim, S.P. (2004):** Structural intensity in plates with multiple discrete and distributed spring-dashpot systems. In: *Journal of Sound and Vibration*. 276(3-5), S. 627-648.
- (LIU 2006) **Liu, Z., Lee, H. und Lu, C. (2006):** Passive and active interior noise control of box structures using the structural intensity method. In: *Applied Acoustics*. 67 (2), S. 112-134.
- (LANGENBERG 2009) **Langenberg, K.-J., Marklein, R. und Mayer, K. (2009):** Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Materialprüfung mit Ultraschall, Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- (HERING 2012) **Hering, T. (2012):** Strukturintensitätsanalyse als Werkzeug der Maschinenakustik, Dissertation, TU Darmstadt, Darmstadt.
- (MAYSENHÖLDER 1994) **Maysenhölder, W. (1994):** Körperschallenergie: Grundlagen zur Berechnung von Energiedichten und Intensitäten, S. Hirzel Verlag, Stuttgart.
- (ADAMS 2015) **Adams, C., Schall, C., Bös, J. und Melz, T. (2015):** Numerical investigation of the sound power and of the structural intensity of a permanent magnet synchronous machine, Inter-Noise 2015 - 44th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, San Francisco, California, USA, 9-12 August.
- (KLEINFELLER 2018) **Kleinfeller, N., Bös, J. und Melz, T. (2018):** Entwicklung einer robusten Berechnungsmethode zur Bestimmung der Strukturintensität von dünnwandigen, gekrümmten Bauteilen unter Zuhilfenahme virtueller Messdaten. In: Tagungsband, Paper ID 000192, S. 1235-1238, DAGA 2018 - 44. Jahrestagung für Akustik, München, 19.-22. März 2018
- (ROTHE 2019) **Rothe, S. (2019):** Optimization of structure-borne sound propagation using structural intensity, GAMM, Wien.

## Literaturverzeichnis (2)

- (LEE 2006) **Lee, H.P., Lim, S.P., und Khun, M.S. (2006):** Diversion of energy flow near crack tips of a vibrating plate using the structural intensity technique. In: *Journal of Sound and Vibration*. 296(3), S. 602-622.
- (LAMBERTI 2013) **Lamberti, A. und Semperlotti, F. (2013):** Detecting closing delaminations in laminated composite plates using nonlinear structural intensity and time reversal mirrors. In: *Smart Materials and Structures*. 22 (12), S. 125006.
- (ROMANO 2013) **Romano, P. Q., Conlon, S. C. und Smith, E. C. (2013):** Investigation of contact acoustic nonlinearities on metal and composite airframe structures via intensity based health monitoring. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*. 133 (1), S. 186–200.
- (HIGASHI 2005) **Higashi, A. (2005):** A Study on Application of Structural Intensity to Identification of Thickness of Beam. In: *6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, 30 May - 03 June 2005, Brazil*.
- (SCHOENWALD 2009) **Schoenwald, S., Zeitler, B. und Nightingale, T. R. T. (2009):** Investigation of flanking sound transmission in lightweight building structures using a scanning laser vibrometer. In: *Proceedings of Euronoise*, S. 1–10.
- (CUI 2009) **Cui, F., Lee, H. und Zeng, X. (2009):** Impact analysis of shoes using the structural intensity technique. In: *4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering*, S. 2081–2084.
- (LEE 2010) **Lee, H. P. und Wang, F. (2010):** Assessment of head injury of children due to golf ball impact. In: *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 13 (5), S. 523–535.

## Literaturverzeichnis (3)

- (AL BA'BA'A 2018) **Al Ba'ba'a, H., Attarzadeh, M.A., und Nouh, M. (2018):** Experimental Evaluation of Structural intensity in two-dimensional plate-type locally resonant elastic metamaterials. In: *Journal of Applied Mechanics*. 85, S. 041005-1–041005-9.
- (PIRES 2019) **Pires, F. (2019):** Structural intensity assessment and material identification of a human tympanic membrane, Dissertation, Universität Antwerpen, Antwerpen, Belgien.

## **12. Effiziente Bewertung der abgestrahlten Schalleistung von dünnwandigen Bauteilen**

*Matthias Klärner*

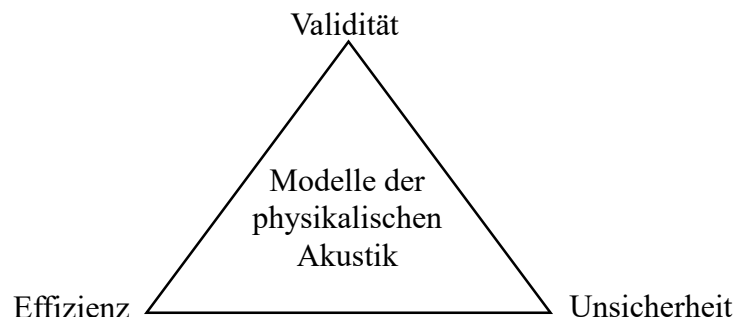
TU Chemnitz, Institut für Strukturleichtbau

# 13. Diskussion und Zusammenfassung

Christian Adams, Joachim Bös, Matthias Klärner, Ivor Nissen

Zusammenfassung:

- Eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle werden in der physikalischen Akustik eingesetzt.
- Ziele der Modellbildung sind geprägt vom Erkenntnisgewinn für eine spezifische Fragestellung der physikalischen Akustik.
- Modelle dienen dem Zweck zunächst zu beschreiben („physikalische“ Zusammenhänge) und abzubilden. Dieser Aspekt wird zunehmend weitergedacht, um Technik zu „gestalten“ („ingenieurmäßige“ Perspektive).
- „Beschreiben/abbilden“ kann heißen, dass Phänomene darstellbar gemacht werden (z. B. Wellenausbreitung), dass Zusammenhänge sichtbar werden (z. B. Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen einer Schallquelle und einer Schallfeldgröße, die von Interesse ist), dass Phänomene hörbar gemacht werden (z. B. durch Auralisation).
- Gerade in der ingenieurmäßigen Sicht auf Modelle zeigen sich einige wesentliche Gemeinsamkeiten in der Modellbildung:
  1. **Effizienz:** Modelle sollen effizient sein und innerhalb gegebener Zeitdauern Ergebnisse mit bestimmter Genauigkeit liefern. Aus Ingenieurssicht muss für die Modellierungsaufgabe ein vernünftiger Kompromiss zwischen Genauigkeit und Zeitdauer gefunden werden.
  2. **Beherrschung von Unsicherheit:** unterschiedliche Modelle eines Originals können voneinander abweichen, da unterschiedliche Annahmen, Vereinfachungen etc. angenommen werden. Demnach sind Modelle unsicher z. B. im Hinblick auf die Prognose akustischer Eigenschaften eines Originals. Das Ergebnis hängt wesentlich vom Modell ab. Für die Modellbildung ist es daher wichtig, die Unsicherheit zu quantifizieren, Abweichungen darzustellen und begründen zu können. Im Hinblick auf Effizienz stellt sich die Frage, wie viel „Unsicherheit“ zulässig/akzeptabel ist bei gegebener Zeitdauer oder wie viel Mehraufwand ist notwendig, um Unsicherheit zu reduzieren und damit zu beherrschen.
  3. **Validierung:** Im Zuge der Quantifizierung von Unsicherheit und Abweichung zwischen Modellen stellt sich für Ingenieure die Frage nach der Validierung. Ein Paradigma dabei ist, dass Modelle, die mit Computern berechnet/gelöst werden, durch (iterative) Anpassung von Parametern an experimentelle Modelle angepasst werden. Da Experimente im Labor teuer und zeitaufwändig sind, besteht der Trend, Modelle verstärkt virtuell mit dem Computer zu erstellen. Dennoch ist die Absicherung von solchen virtuellen Computermodellen mit Experimenten wichtiger denn je, um valide Ergebnisse aus den Computermodellen zu erhalten. Dies trägt auch wesentlich zur Beherrschung von Unsicherheit bei.
- Die drei zuvor genannten Punkte sind also nicht unabhängig voneinander, sondern beeinflussen sich gegenseitig: Effiziente Computermodelle mit geringer Rechenzeit müssen durch Messdaten abgesichert werden, um die Unsicherheit beherrschen zu können:





# Impressum

Verfasser:

Christian Adams, Technische Universität Darmstadt, Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt

Joachim Bös, Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT, Ehrenbergstr. 31  
98693 Ilmenau

Matthias Klärner, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 31/33, 09107  
Chemnitz

Ivor Nissen, Selkenkoppel 72, 24782 Rickert

Druck: siehe Verfasser

1. Auflage, 2022

Für den Inhalt der Einzelbeiträge sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

DOI: