Körperschall interaktiv - über eine neue Lehrveranstaltung an der TU Berlin

Ennes Sarradj

TU Berlin, Fachgebiet Technische Akustik, 10587 Berlin, Deutschland, Email: ennes.sarradj@tu-berlin.de

Einleitung

Im Curriculum einer vertieften Lehre im Bereich der technischen Akustik sind Inhalte zum Thema Körperschall wegen ihrer Relevanz für viele akustische Fragestellungen vom Erschütterungsschutz über die Lärmminderung an Maschinen bis hin zum Ultraschall in Festkörpern sehr wünschenswert. Im Beitrag wird die 2019 vollständig neu konzipierte Lehrveranstaltung „Körperschall“ an der TU Berlin vorgestellt. Ausgangspunkt war dabei, dass einige Grundlagen zum Thema zwar bereits Bestandteil in anderen Lehrveranstaltungen sind, es aber an einem Angebot für Studierende in Masterstudiengängen fehlt, die sich auch in der zugrunde liegenden Theorie des Körperschalls, den zugehörigen Methoden und deren Anwendung vertiefen wollen. Für die Lehre auf diesem Niveau ist das Thema insofern herausfordernd, weil das Vermitteln von Sachverhalten allein nicht ausreichend ist. Jedoch erfordern schon „einfache“ Herleitungen einen erheblichen mathematischen Aufwand. So besteht die Gefahr, dass nur sehr wenige wesentliche Zusammenhänge herausgearbeitet werden können und der Bezug zur Anwendung verloren geht.

Ausgangspunkt

Das Fachgebiet Technische Akustik an der TU Berlin bietet seine Lehrveranstaltungen (siehe Abb. 1) für Studierende vieler unterschiedlicher Bachelor- und Masterstudiengänge an. Damit soll sowohl eine Ergänzung zu anderen Inhalten (beispielsweise aus dem Bereich Maschinenbau oder Umwelttechnik) als auch eine Vertiefung in solchen Studiengängen möglich sein, bei denen ein Schwerpunkt auf die Akustik gewählt werden kann. Verschiedene Aspekte des Themas Körperschall sind dabei auch in drei verschiedenen Lehrveranstaltungen integriert.

In *Lärmminderung* wird die Biegewelle, ihre Anregung und Abstrahlung sowie die Schalldämmung unter Verzicht auf Herleitungen vorgestellt. In *Technische Akustik für Fortgeschrittene* gibt es einen Überblick über verschiedene Wellenarten des Körperschalls und deren Wellengleichungen sowie ausführliche Herleitungen zur Abstrahlung und zur Schalldämmung. In *Schallmesstechnik* wird die Körperschallmesstechnik sowie die Modalanalyse als Anwendung behandelt. In keiner dieser Lehrveranstaltungen wird jedoch das Thema Körperschall vertieft. Deshalb wurde eine neue Lehrveranstaltung *Körperschall* entwickelt, die eine solche Vertiefung vor allem für Studierende von Masterstudiengängen möglich macht.

Die Zielsetzung ist dabei sowohl vertieftes Verständnis für die Physik des Körperschalls als auch die Vermittlung anwendbarer Grundlagen für Lärmminderung, Ultraschall und andere Bereiche. Dazu ist ein sicherer Umgang mit den zugehörigen mathematischen Modellen nötig. Die Anwendung auf verschiedenste Problemstellungen muss beherrscht werden. Aus diesen Überlegungen folgt, dass eine reine „Faktenvermittlung“ sicher nicht ausreichend ist. Eine Besonderheit beim Thema Körperschall ist auch, dass die Physik nicht sehr anschaulich ist, da Körperschall kaum direkt wahrgenommen und auch nicht einfach beobachtet werden kann. Diese Abstraktheit trifft auf mathematische Modelle, die teils recht umfangreiche Herleitungen erfordern und kompliziert sind. Teilweise können Sachverhalte nur anhand numerischer Lösungen erschlossen werden. Auch die Anwendung erfordert oft langwierige Berechnungen, die eher den Einsatz eines Computers als den von Papier und Bleistift nahelegen.

Konzept und Inhalte

Auf der Grundlage dieser Überlegungen wurde folgendes Konzept für die Lehrveranstaltung entwickelt. Zunächst werden im Rahmen der Vorlesung die physikalischen Grundlagen erklärt und wichtige Herleitungen und mathematische Modelle entwickelt. Auch wenn die Physik und die Modelle für Ultraschall angewendet werden könnten, werden parallel dazu vor allem Anwendungen mit Schwerpunkt auf die Technische Akustik und Lärmminderung behandelt. Um die zuvor erwähnten Probleme durch mangelnde Anschaulichkeit und aufwändige Herleitungen abzumildern, wird bereits während der Vorlesung auf eine stetige Interaktion der Studierenden mit den Vorlesungsinhalten am Computer gesetzt. Herleitungen, Diagramme, Ergebnisse sollen dabei in direkter Interaktion mit dem Computer gewonnen werden. Neben der Vorlesung wird in einer Übung in kleinen Gruppen die Anwendung des Stoffs in Projektform vertieft. Dabei werden unter Komplexaufgaben gelöst und damit auch die Problemlösungskompetenz gefördert. Die Lösungen liegen dann letztlich in Form von kleinen Computerprogrammen bzw. deren Ergebnissen vor.

Die Auswahl der behandelten Inhalte orientiert sich auch daran, dass bestimmte Themen wie Abstrahlung und Schalldämmung bereits in anderen Lehrveranstaltungen vertieft behandelt wurden. Ausgehend von Bewegungs- und Wellengleichungen werden zunächst Körperschallwellen im unendlich ausgedehnten Medium behandelt, bevor dann Spezialfälle wie Platten und Balken untersucht werden. Dieses Vorgehen ist analog zum Luftschall, wo auch ausgehend von der Wellengleichung zunächst freie Schallfelder und später solche in Kanälen und Räumen behandelt werden. Weitere Themen sind Impedanzen, Körperschalldämmung und -dämpfung sowie endliche Systeme. Abschließend werden diffuse Körperschallfelder und deren Behandlung im Rahmen der Statistischen Energieanalyse vorgestellt. Insgesamt gibt es 13 Lektionen:

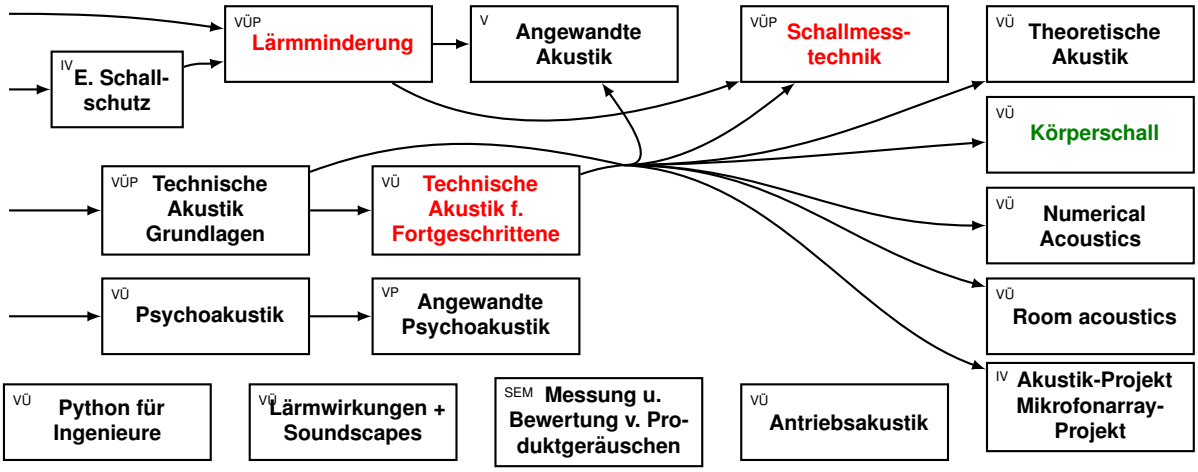


Abbildung 1: Lehrveranstaltungen (Module) am Fachgebiet Technische Akustik der TU Berlin, rot: Aspekte des Themas Körperschall sind integriert, grün: neue Lehrveranstaltung zur Vertiefung des Themas Körperschall

1. Einführung
2. Lineare Systeme
3. Wellengleichungen für Körperschall
4. Reflexion ebener Wellen
5. Plattenwellen
6. Wellen auf Balken
7. Punktimpedanzen
8. Transmission über Plattenstossstellen
9. Dämpfung und Dämpfungsbelege
10. Wellen auf endlichen Balken
11. Wellen auf endlichen Platten
12. Statistische Energieanalyse
13. Anwendung der SEA

Umsetzung

Ein wesentliches Element bei der Umsetzung des Konzepts sind die verwendeten Lehrmaterialien. Die übliche Form eines Vorlesungsskriptes erlaubt jedoch nur sehr begrenzt eine direkte Interaktion bzw. muss diese Interaktion durch die lernende Person vollständig selbst organisiert werden. Einen Ausweg bietet ein Vorlesungsskript, das interaktive Elemente mit einbaut oder sogar vollständig interaktiv ist. Ein solches vollständig interaktives Vorlesungsskript lässt sich mit Hilfe von Jupyter-Notebooks realisieren. Jupyter ist ein Projekt [1], das quelloffene Software für interaktive wissenschaftliche Berechnungen und Datenauswertungen bereitstellt. Zentral ist dabei das Jupyter-Notebook, ein elektronisches Dokumentformat, das Text, mathematische Formeln und Abbildungen mit ausführbarem Programmcode, Visualisierungen und interaktiven Steuerelementen einer grafischen Benutzeroberfläche verbindet. Text und Formeln können über eine simple Markdown-Formatierung gestaltet werden, während für den Programmcode verschiedene Programmiersprachen verfügbar sind (insbesondere JUlia, PYThon und R, aus denen sich das Projektacronym zusammensetzt). Die Notebooks können also wie ein interaktives Buch eingesetzt werden, welches nicht nur interaktive Element enthält, sondern vom Nutzer vollständig bearbeitet werden kann.

Durch den Einsatz von Jupyter-Notebooks an Stelle des Vorlesungsskripts wird es möglich, neben den erklärenden Texten auch Berechnungen und Herleitungen bereitzustellen, in die beim Lernen direkt eingegriffen werden kann. Darüber hinaus können Sachverhalte auch als interaktiv veränderbare Abbildungen und Diagramme oder sogar als interaktiv veränderbare Animationen begreifbar gemacht werden. Mit Bezug auf die erwähnten Besonderheiten beim Thema Körperschall bringt das insbesondere folgende Vorteile mit sich:

- Für langwierige und komplizierte Herleitungen können alle Schritte, die im Grunde nur aus längst bekannten und geübten mathematischen Umformoperationen bestehen, durch computergestützte Formelmanipulation ersetzt werden (Abb. 2). So ist bei der Behandlung der Herleitungen die Konzentration auf die wesentlichen Überlegungen möglich.
- Notwendige numerische Berechnungen können „live“ umgesetzt werden (Abb. 3). Das demonstriert zum einen unmittelbar die praktische Umsetzung einer solchen Berechnung (der Quellcode ist einsehbar) und zum anderen ist das wesentlich überzeugender als die bloße Angabe von Ergebnissen aus der Literatur.
- Verschiedene Diagramme, Abbildungen und Animationen werden interaktiv gesteuert (Abb. 4). Damit werden gerade kompliziertere Zusammenhänge viel besser sichtbar und erlebbar als das mit einfachen Abbildungen der Fall wäre.
- Da alle Teile des Notebooks bearbeitet werden können, kann der Text um einige Anmerkungen ergänzt werden und der Eingriff in den Quellcode erlaubt auf einfache Art und Weise eigene „Was wäre wenn?“- Rechenexperimente.

In den Notebooks wird als Programmiersprache Python [2] verwendet. Diese Programmiersprache ist sehr leicht zu erlernen, an Hochschulen und in der Industrie weit verbreitet und wird von vielen Studierenden bereits gut beherrscht. Für numerische Berechnungen, Formelmanipulation, grafische Darstellungen werden verschiedene Python-Pakete aus dem SciPy-Ökosystem [3] verwendet. Sämtliche eingesetzte Software ist für alle gängigen Betriebssysteme frei verfügbar und einfach zu installieren. Ebenfalls möglich ist eine Nutzung in der Cloud, so dass von jedem Webbrowser aus gearbeitet werden kann. Das Vorlesungsskript und jeglicher Quellcode darin ist ebenfalls unter freien Lizenzen (CC 4.0, MIT) verfügbar [4].

Literatur

[1] Project Jupyter, URL:
`https://jupyter.org/`

[2] Python, URL:
`https://www.python.org/`

[3] SciPy, URL:
`https://scipy.org/`

[4] Lecture notes structure borne sound, URL:
`https://github.com/acoular/structure-borne-sound-lecture`

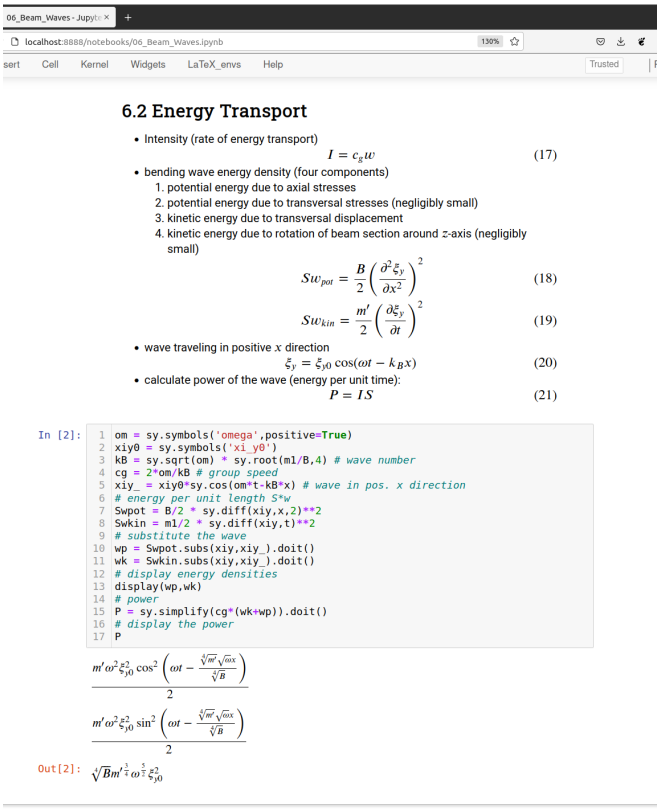


Abbildung 2: Beispiel für computergestützte Formelmanipulation: die in einer Biegewelle transportierte Energie setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen. Für die Herleitung muss die Wellenfunktion mehrfach nach dem Ort und Zeit abgeleitet werden sowie in die Formel zur Berechnung der Intensität eingesetzt werden. Diese mathematischen Schritte werden durch den angegebenen Quellcode vom Computer erledigt. Ergebnis ist die Formel für die Leistung (bei Out[2]:)

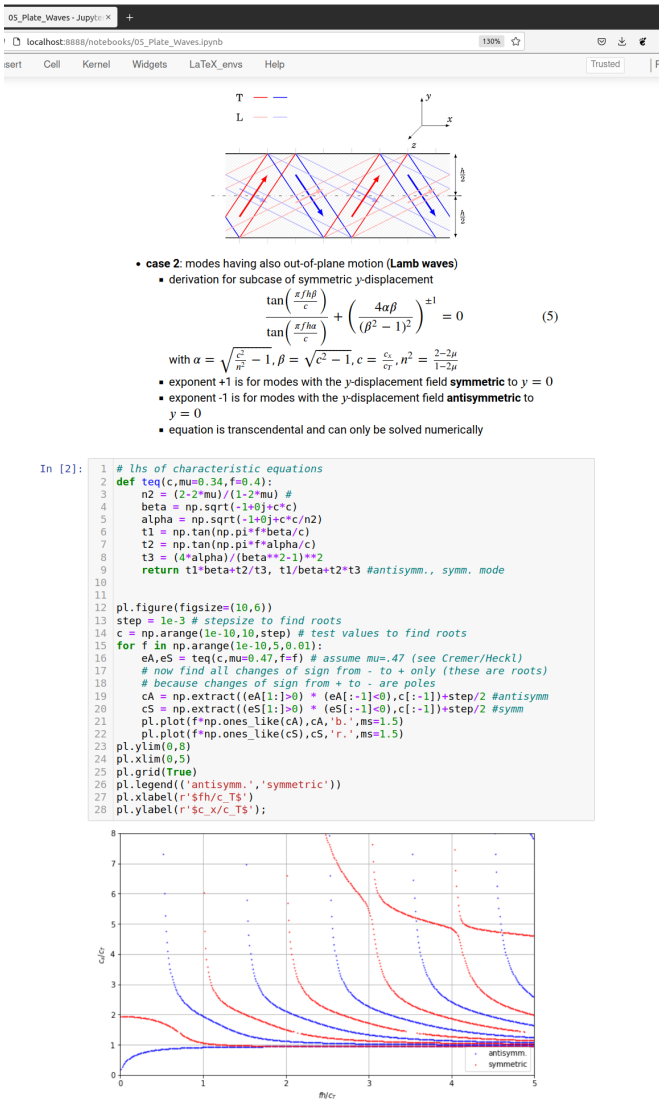
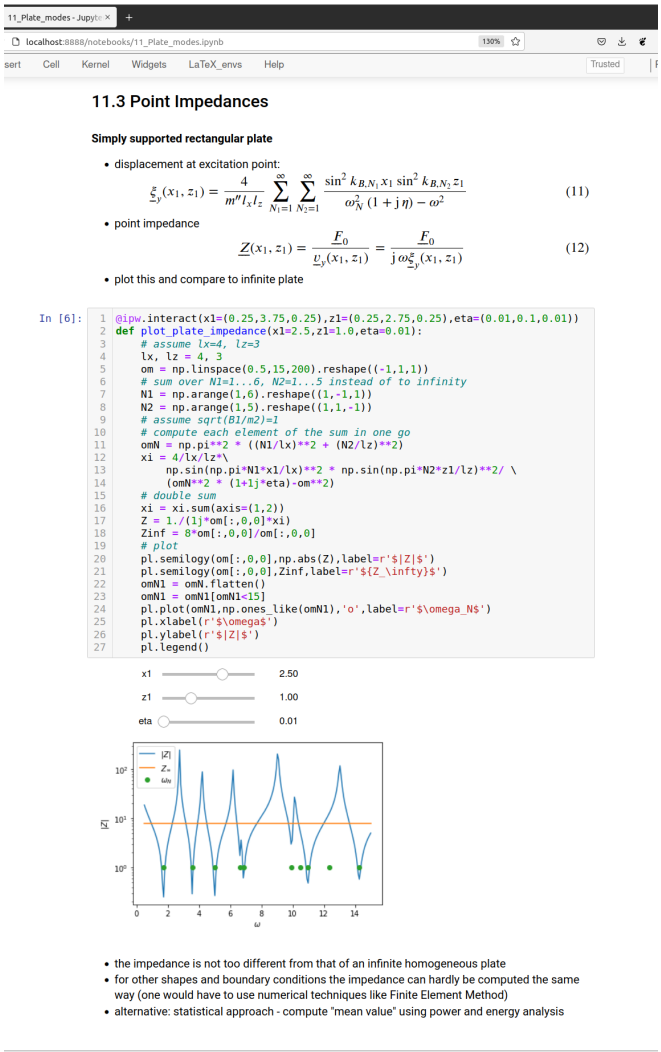


Abbildung 3: Beispiel für numerische Berechnung: Auf Platten auftretende Lamb-Wellen sind bestimmte Moden in einem Wellenleiter, die sich aus Longitudinal- und Transversalwellen zusammensetzten, die jeweils an den freien Oberflächen reflektiert werden. Die sich aus diesen Überlegungen ergebende charakteristische Gleichung (5), mit der sich die Phasengeschwindigkeiten der einzelnen Wellen ermitteln lassen, ist transzendent. Der Quellcode zeigt die (näherungsweise) numerische Berechnung der Ergebnisse und die erzeugt die zugehörige grafische Darstellung (Dispersionsdiagramm).



- the impedance is not too different from that of an infinite homogeneous plate
- for other shapes and boundary conditions the impedance can hardly be computed the same way (one would have to use numerical techniques like Finite Element Method)
- alternative: statistical approach - compute "mean value" using power and energy analysis

Abbildung 4: Beispiel für ein interaktives Diagramm: Für eine rechteckige Platte lässt sich die Punktimpedanz für jeden Ort durch eine Summe über die Moden berechnen, (11) und (12). Diese Prozedur wird vom Quellcode umgesetzt, wobei die Koordinaten für die Punktimpedanz x_1 und z_1 sowie der Verlustfaktor interaktiv über die Schieberegler verändert werden können. Die sich ergebenden Frequenzverläufe der Punktimpedanz werden mit der für die unendliche Platte verglichen. So lässt sich herausfinden, dass zwar Punktimpedanzen unterschiedlich sind, sich im Mittel aber ein zur unendlichen Platte ähnlicher Wert ergibt.