

Zielgrößenbestimmung zur Durchführung einer Sensitivitätsanalyse bei der Absorptionsgradmessung im Kundt'schen Rohr

Sören Wenzel, Antje Grebel, Elena Slomski-Vetter, Joachim Bös, Tobias Melz

Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM, Technische Universität Darmstadt, Magdalenenstr. 4, 64289 Darmstadt, E-Mail: wenzel@sam.tu-darmstadt.de

Einleitung und Vorgehensweise

Der Absorptionsgrad einer Schaumstoffprobe lässt sich auf verschiedene Arten bestimmen, beispielsweise in einem Hallraum oder mit einem Kundt'schen Rohr. Für die Anschaffung eines Hallraumes muss ein Gebäude entweder komplett neu oder umgebaut werden. Das Kundt'sche Rohr hingegen ist deutlich günstiger und kleiner. Deshalb stellt das Kundt'sche Rohr eine um ein Vielfaches günstigere Lösung dar und wird in der Industrie häufig verwendet.

Unsicherheiten bei den Messergebnissen konnten in vorherigen Versuchen von Grebel [1–4] nachgewiesen werden. Parameter der Messungen, auch Faktoren genannt, wie der Durchmesser der Schaumstoffprobe und die Art des Einbaus des Schaumstoffs in den Probenhalter des Kundt'schen Rohres, können zu großen Abweichungen im gemessenen Absorptionsgrad führen, die die Wiederholbarkeit und Genauigkeit beeinträchtigen. Diese sind wichtige Eigenschaften eines Messsystems, die mit der im Folgenden vorgestellten Sensitivitätsanalyse verbessert werden sollen. Im Rahmen der Analyse sollen Absorptionsgradkurven untersucht werden, um Bereiche zu bestimmen, die sich besonders stark von den Faktoren beeinflussen lassen.

Die Vorgehensweise der Sensitivitätsanalyse lässt sich gut mit einer Gliederung einer Datenauswertung beschreiben. Beides ist in Abbildung 1 dargestellt. Im wissenschaftlichen Umfeld wird die Datenauswertung in vier Abschnitte gegliedert. Der erste Abschnitt, die Datenerhebung, beschreibt das Finden und Sammeln von Daten. Die Absorptionsgradkurven wurden von Grebel [1] erhoben und für diesen Beitrag übernommen. Der zweite Abschnitt befasst sich mit der Komprimierung der gesammelten Daten. Diese werden mit einer Regressionsvorschrift zu Regressionskoeffizienten komprimiert. Im dritten Abschnitt sollen Zusammenhänge innerhalb der komprimierten Daten, den Regressionskoeffizienten, gefunden werden. Diese Aufgabe wird von künstlichen neuronalen Netzen übernommen. Der Rahmen in Abbildung 1 um den zweiten und dritten Abschnitt stellt eine Optimierung dar. Hier wird die Komprimierung optimiert, sodass besonders gute Zusammenhänge im dritten Schritt gefunden werden. Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse sind die Trefferquoten der Netze und zugehörigen Vorschriften der Komprimierung. Im vierten Abschnitt werden die gefundenen Zusammenhänge genutzt, um neue Theorien zu validieren und Erkenntnisse zu gewinnen.

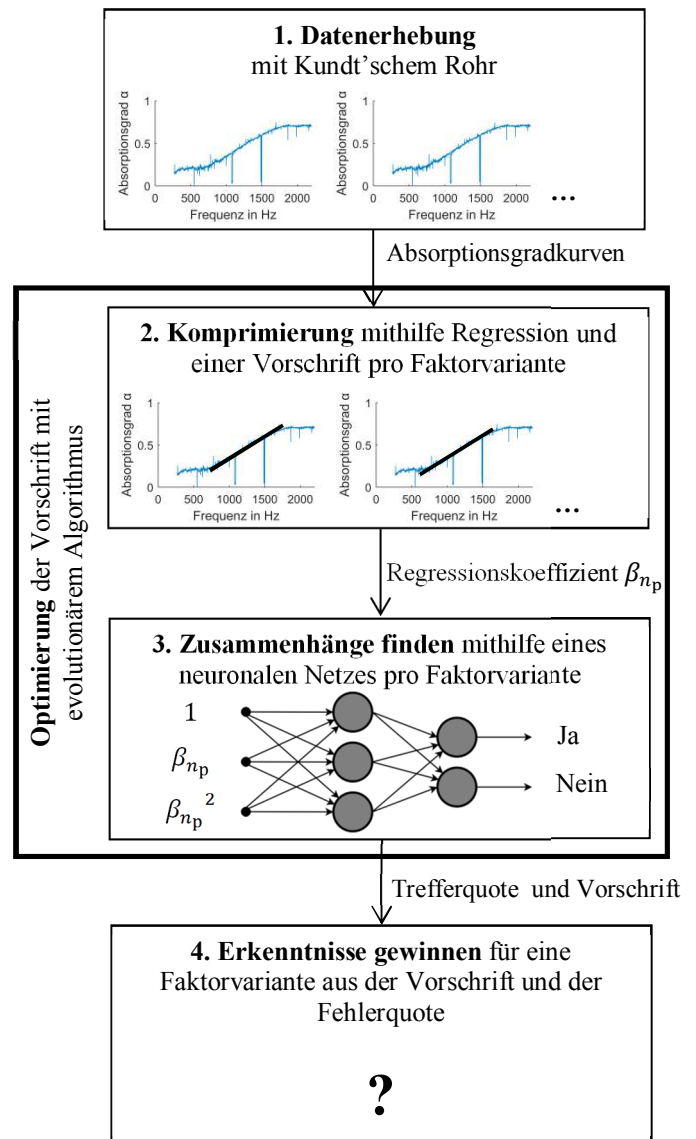


Abbildung 1: Gliederung der Datenauswertung und Vorgehensweise der Sensitivitätsanalyse

Datenerhebung

Für die Datenerhebung wurden zylinderförmige Schaumstoffproben in einem Kundt'schen Rohr vermessen [1]. Die Messungen wurden nach der 2-Mikrofonmethode durchgeführt, die in DIN 10534-2 [5] beschrieben ist. Dabei wird der Absorptionsgrad aus der gemessenen Übertragungsfunktion zwischen den beiden Mikrofonen berechnet. Für diese Untersuchung wurden mehrere Faktoren für die Fertigung der Schaumstoffprobe und der Messung variiert: Fertigungsverfahren, fertige Person, Probendurchmesser, Probenhöhe und Einbaurichtung. Die möglichen Ausprägungen der Fak-

toren, auch Faktorvarianten genannt, sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Faktoren und Faktorvarianten der Messungen

Faktoren	Faktorvarianten
Fertigungsverfahren	Heizdraht (HZD), Rundprobenmesser (MES), SLF*, SLH*, SSF*, SSH*, Wasserstrahlschneider (WSS)
fertigende Person	extern, Person 1, Person 2, Person 3
Probendurchmesser	89 mm, 90 mm, 91 mm
Probenhöhe	30 mm, 40 mm, 50 mm, 80 mm
Einbaurichtung	von oben, von unten

* verschiedene Bandsägeverfahren, siehe Text

Bei den Fertigungsverfahren SLF, SLH, SSF, SSH handelt es sich um Zuschnitte mit der Bandsäge (S), die jeweils langsam (L) oder schnell (S) und mit Führung (F) oder von Hand (H) geschnitten wurden. Das Rundprobenmesser ist ein kreisrundes Messer, ähnlich wie ein Kern- oder Schaumstoffbohrer. Insgesamt wurde ein Vollfaktorversuchsplan angestrebt, allerdings gab es einige Einschränkungen: Die computergesteuerten Verfahren, Heizdraht- und Wasserstrahlschneider, wurden extern und daher nicht von den Personen 1 bis 3 ausgeführt. Die Bandsäge hingegen wurde nur von den Personen 1 bis 3 bedient. Zusätzlich wurde das Rundprobenmesser nur mit einem Durchmesser von 90 mm hergestellt und nur von Person 1 bedient. Deshalb war ein vollfaktorierter Versuchsplan nicht möglich, sondern es wurden mehrere überlappende Vollfaktorversuchspläne mit insgesamt 3096 Versuchen durchgeführt.

In Abbildung 2 sind die gemittelten Absorptionsgrade getrennt für alle Probendicken dargestellt. Jede Kurve ist daher aus 774 einzelnen Messungen gemittelt. Die Kurven sind nicht geglättet, da sie für die Auswertung ebenfalls nicht geglättet werden. In der Kurve über alle Proben mit 30 mm Probenhöhe ist bei ungefähr 1400 Hz ein deutlicher Einbruch sichtbar. Dieser Einbruch würde durch eine Glättung verloren gehen. Aus der Abbildung wird auch deutlich, dass der Absorptionsgrad stark von der Dicke abhängig ist.

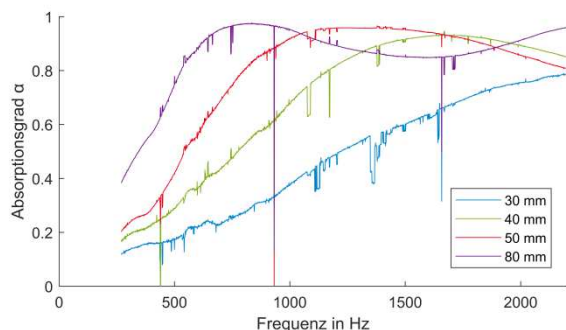


Abbildung 2: Gemittelter Absorptionsgrad für verschiedene Probendicken im Bereich von 269 Hz bis 2191 Hz

Nach DIN 10534-2 [5] werden die obere Grenzfrequenz f_o und die untere Grenzfrequenz f_u mit der Schallgeschwindigkeit c_o , dem Rohrdurchmesser d und der Rohrlänge l wie folgt berechnet:

$$f_o = 0,58 \cdot \frac{c_o}{d} = 2191 \text{ Hz} , \quad (1)$$

$$f_u = 0,75 \cdot \frac{c_o}{l} = 269 \text{ Hz} . \quad (2)$$

Deshalb enthalten die Absorptionsgradkurven Werte zwischen 269 Hz und 2191 Hz mit einer Schrittweite von 1 Hz.

Komprimierung der Daten

Eine Komprimierung beschreibt den Prozess, wesentliche Informationen aus einer Menge von Informationen zu gewinnen. Zu differenzieren ist hier die verlustfreie Komprimierung von der verlustbehafteten Komprimierung. Bei der verlustfreien Komprimierung wird jede Information der Messkurve in die Komprimierung aufgenommen. Dies kann dazu führen, dass manche Kurven nicht komprimierbar sind. Daher wird auf die verlustbehaftete Komprimierung zurückgegriffen. So kann immer gleich stark komprimiert werden, sodass immer dieselbe Menge an Informationen verbleibt.

In dieser Arbeit werden die Absorptionsgradkurven mithilfe einer Regression komprimiert. Dafür wird ein Intervall der Kurve mit einer Polynomfunktion nach dem Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate nach Gauß angenähert. So wird der quadratische Fehler der resultierenden Regressionsfunktion minimal und die Komprimierung wird analytisch berechnet und damit deterministisch bestimmt. Im Abschnitt „Optimierung“ wird erläutert, wie die Parameter der Komprimierung für jede Faktorvariante ausgewählt werden.

Die Polynomfunktion h_{n_p} und die Vorschrift s für die Regressionen sind mit der höchsten Potenz der Polynomfunktion n_p , der Frequenz f und den Regressionskoeffizienten β_i innerhalb der unteren Grenze g_u und oberen Grenze g_o wie folgt definiert:

$$h_{n_p}(f) = \sum_{i=0}^{n_p} \beta_i f^i ; f \in [g_u, g_o] , \quad (3)$$

$$s = \{g_u, g_o, n_p\} . \quad (4)$$

Die so berechneten Regressionskoeffizienten β_{n_p} aller Absorptionsgradkurven werden für den nächsten Schritt verwendet, also werden alle β_i mit $i \neq n_p$ verworfen. Jede Vorschrift s einer Regression ist durch untere Grenze g_u , obere Grenze g_o und Grad des Polynoms n_p eindeutig bestimmt und enthält somit alle Parameter, um eine Komprimierung ebenfalls eindeutig zu bestimmen. Da nur der Regressionskoeffizient β_{n_p} des höchsten Polynoms als Ergebnis der Komprimierung verwendet wird, ergibt die Komprimierung beispielsweise bei $n_p = 0$ den arithmetischen Mittelwert innerhalb des Intervalls. Bei $n_p = 1$ ergibt sich die gemittelte Steigung. Ebenso können durch die Komprimierung auch quadratische, kubische oder höherwertigere Anteile der Messkurven bestimmt werden. In Abbildung 3 sind verschiedene angewandte Komprimierungen dargestellt.

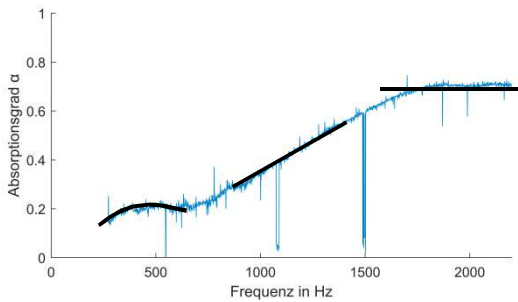


Abbildung 3: Drei Beispiele für jeweils eine gültige Komprimierung der Kurve mit Regression nach Gleichung (3) v.l.n.r.: h_3, h_1, h_0 .

Zusammenhänge finden

In diesem Beitrag sollen Zusammenhänge zwischen den Regressionskoeffizienten β_{n_p} und den Faktorvarianten gefunden werden. Dafür werden künstliche neuronale Netze verwendet, die die Netze aus Neuronen im Gehirn nachbilden sollen. Sie sind ein definiertes Konstrukt aus gewichteten Summen und Sigmoidfunktionen, die den gesamten Zahlenraum auf den Bereich zwischen -1 und 1 abbilden. Damit die Netze wie gewünscht auf Eingaben reagieren, werden die Gewichte der Summen mittels einer Optimierung festgelegt. Dieser Vorgang wird Trainieren genannt.

Da das Netz zum Großteil aus Summen besteht, können nichtlineare Funktionen nur aufwendig angenähert werden. Wird die Eingabe aus dem konstanten Wert 1 , dem Regressionskoeffizienten β_{n_p} und dem Quadrat des Regressionskoeffizienten der Absorptionsgradkurve $\beta_{n_p}^2$ zusammengesetzt, dann können nichtlineare Funktionen leichter angenähert werden und nichtlineare Zusammenhänge leichter gefunden werden.

Die Ausgabe des Netzes enthält die Aussage, ob die untersuchte Faktorvariante zur Absorptionsgradmessung angelegt wurde. Bei dieser Klassifikation werden alle Regressionskoeffizienten β_{n_p} , die mit einer Vorschrift s erstellt werden, zum Finden von Zusammenhängen herangezogen. Das Netz ordnet nun die Koeffizienten der Faktorvariante zu, die untersucht wird. Als Ergebnis wird festgehalten, wie viele Koeffizienten einer Faktorvariante klassifiziert werden konnten. Dieser Zusammenhang wird Trefferquote genannt. So kann qualitativ festgestellt werden, wie sehr die übergebenen Regressionskoeffizienten β_{n_p} mit den Faktorvarianten zusammenhängen.

Es werden 60% der Daten zum Trainieren der Netze verwendet. Weitere 20% werden verwendet, um das beste Netz auszusuchen und die restlichen 20% werden verwendet, um die Fähigkeiten des Netzes zu testen. Das Netz wird somit nicht mit den gleichen Daten getestet, mit denen es trainiert wird. Durch diese Vorgehensweise ist sichergestellt, dass das Netz allgemeine Aussagen erlernt, anstatt auswendig zu lernen.

Optimierung

Für alle Faktorvarianten wird eine Vorschrift s gesucht, mit der die Regressionskoeffizienten β_{n_p} erstellt werden. Mit den Regressionskoeffizienten β_{n_p} soll eine möglichst hohe Trefferquote der neuronalen Netze erzielt werden. Dies ist ein Problem, das in diesem Beitrag mit einem evolutionären Algorithmus gelöst wird. Dieser startet mit 200 zufälligen Vorschriften in die erste sogenannte Generation. Für die darauf folgenden Generationen werden die Vorschriften mit den höchsten Trefferquoten und einigen zufälligen Vorschriften kombiniert und mutiert. Es entsteht nach einigen Generationen eine besonders gute Vorschrift, die eine besonders hohe Trefferquote hat.

Für den Fall, dass die Trefferquote bei einer Faktorvariante nicht 100% ist, wird noch eine weitere Vorschrift gesucht. Das neuronale Netz wird dann mit einem konstanten Wert und pro Vorschrift mit einem Regressionskoeffizienten und dem Quadrat des Koeffizienten gestartet. Allerdings muss für jede zusätzliche Vorschrift eine Verbesserung der Trefferquote erfolgen, sonst wird nicht nach einer weiteren Vorschrift gesucht.

Ergebnisse

Mit der vorgestellten Analyse können Abhängigkeiten für alle Faktorvarianten der Faktoren Probendurchmesser, Einbaurichtung, Fertigungsverfahren und fertigende Person nachgewiesen werden. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dargestellt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Trefferquoten des neuronalen Netzes nach Optimierung		Anzahl der Vorschriften	
Faktor	Faktorvariante	eine	beliebig viele
Durchmesser in mm	89	75 %	92 %
	90	71 %	74 %
	91	73 %	85 %
	alle	73 %	83 %
Einbaurichtung	oben	100 %	100 %
	unten	100 %	100 %
	alle	100 %	100 %
Fertigungsverfahren	Heizdraht	96,6 %	97,4 %
	Rundprobennmesser	99,5 %	99,5 %
	SLF	85 %	85 %
	SLH	83 %	85 %
	SSF	84 %	84 %
	SSH	83 %	84 %
	Wasserstrahl	95 %	95 %
fertigende Person	alle	85 %	86 %
	extern	92 %	95 %
	Person 1	86 %	98 %
	Person 2	94 %	99,8 %
	Person 3	90 %	100 %
	alle	90 %	99 %

Bei der Klassifikation des Durchmessers werden aus bis zu sechs Vorschriften Regressionskoeffizienten gebildet, somit mehr als bei allen anderen Faktoren. Der Faktor Einbaurichtung lässt sich anhand eines kleinen Bereiches der Kurven eindeutig identifizieren. Das wird auch in [1, 2] beschrieben. Bei den Fertigungsverfahren können deutliche Abhängigkeiten beobachtet werden. Beispielsweise lassen sich Proben, die mit einem Schaumstoffbohrer zugeschnitten werden, mit einer Trefferquote von 99,5 % identifizieren. Die Vorschrift dafür ist in Abbildung 4 dargestellt.

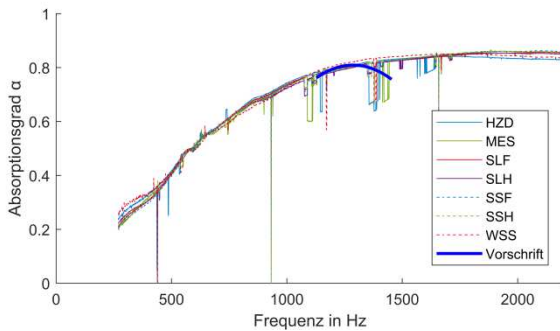


Abbildung 4: Gemittelter Absorptionsgrad für verschiedene Fertigungsverfahren mit dargestellter Komprimierungsvorschrift für Rundprobenmesser mit 99,5 % Trefferquote

Auffällig ist auch, dass sich die Fertigungsverfahren, außer den Bandsägeverfahren, gut unterscheiden lassen. Dies könnte daran liegen, dass die Bandsägeverfahren sich nicht stark voneinander unterscheiden, da alle Proben an derselben Bandsäge gefertigt wurden. Im Gegensatz dazu können die computergesteuerten Verfahren des Heizdrahtschneidens und Wasserstrahlenschneidens gut unterschieden werden.

Bei Proben, die von Person 2 gefertigt werden, lässt sich eine Vorschrift für 94 % der Proben feststellen. Diese besagt, dass die gemittelte Steigung des niedrigen Frequenzbereichs zur Erkennung benötigt wird. Abbildung 5 zeigt die Vorschrift.

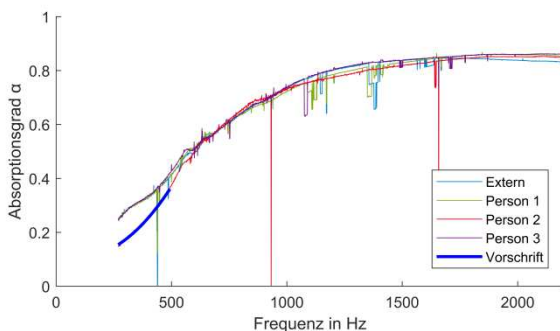


Abbildung 5: Gemittelter Absorptionsgrad für verschiedene fertige Personen mit dargestellter Komprimierungsvorschrift für Person 2 mit 94 % Trefferquote

Die Faktorvarianten der Probendicke können alle mit einer Vorschrift genau bestimmt werden. Diese beinhalten alle $n_p = 0$ und damit das arithmetische Mittel. Außer bei den

Faktoren der Probendicke wurde kein arithmetisches Mittel für die Unterscheidung der Faktorvarianten verwendet. Die in [1] aufgestellte Beobachtung, dass die Probendicke alle Messungen dominiert und damit die Auswertung bezüglich sonstiger Einflussparameter erschwert, kann bestätigt werden.

Fazit und Ausblick

Mit der vorgestellten Sensitivitätsanalyse können Abhängigkeiten für alle Faktorvarianten nachgewiesen werden. Ebenfalls kann für alle Faktoren durch einen Algorithmus ein Bereich objektiv ausgewählt werden, der stark durch die Faktorvariante beeinflusst wird. Die Zusammenhänge können schließlich auch mit Hilfe der Vorschrift quantifiziert werden. Auf den ersten Blick scheint die Lösung nicht reproduzierbar zu sein, weil der evolutionäre Algorithmus mit Zufallszahlen arbeitet. Allerdings zeigt sich durch das mehrmalige Ausführen der Analyse, dass die Unterschiede nur marginal sind.

Kritisch zu betrachten ist der hohe Rechenaufwand, den das Verfahren benötigt. Dieser Nachteil könnte sich durch Optimierung des Programmcodes und durch Verbesserung der IT in naher Zukunft als weniger relevant herausstellen.

Ebenfalls sollte die Sensitivitätsanalyse auch an anderen Messdaten durchgeführt werden, um eventuelle Schwachpunkte auszubessern und die Sensitivitätsanalyse weiterzuentwickeln.

Schließlich wurde gezeigt, dass die Wiederholbarkeit von Messungen mit dem Kundt'schen Rohr durch striktes Einhalten von Faktoren gesteigert werden kann.

Literatur

- [1] Grebel, A.; Bös, J.; Melz, T.: Messunsicherheit im Kundtschen Rohr, DAGA 2017, 6.–9. März 2017, Kiel. S. 438–441.
- [2] Grebel, A.; Hanselka, H.; Bös, J.: Observations on absorption measurements in impedance tubes, AIA-DAGA 2013, 18.–21. März 2013, Meran, Italien. S. 1761–1763.
- [3] Grebel, A.; Ochs, S.; Bös, J.; Melz, T.: Planung und Durchführung einer Sensitivitätsanalyse am Kundtschen Rohr, DAGA 2014, 10.–13. März 2014, Oldenburg. S. 640–641.
- [4] Grebel, A.; Bös, J.; Melz, T.: Schaumstoffe im Kundtschen Rohr – Modelle und Einflussparameter, DAGA 2015, 16.–19. März 2015, Nürnberg. S. 209–212.
- [5] DIN EN 10543-2 „Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren, Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion“, 2001.