

Zur Messung des Strömungswiderstands mit dem Luftwechselstromverfahren

Martin Schmelzer, Volker Wittstock

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Email: martin.schmelzer@ptb.de

Einleitung

Die Norm DIN EN 29053 [1] beschreibt die Messung des Strömungswiderstandes durch zwei Verfahren: mit Luftgleichstrom und mit Luftwechselstrom. Die Norm wird aktuell überarbeitet. Dabei wurde die Streichung des Wechselstromverfahrens diskutiert, weil seine Grundlagen zu wenig dokumentiert sind. Aufgrund seiner vielfachen Nutzung soll es aber erhalten bleiben. Dafür werden hier die Grundlagen, Eigenschaften und Grenzen dieses Verfahrens (erneut) recherchiert und herausgearbeitet.

Der Beitrag zeigt ein einfaches Berechnungsmodell, nutzt den Neubau einer Messapparatur mit variabler Anregungsfrequenz und diskutiert verschiedene Fragestellungen wie z.B. die Adiabasie.

Bisherige Entwicklung

Die Norm [2] beschreibt ein Messverfahren mit Luftgleichstrom.

In [3] wird das Messverfahren mit Luftgleichstrom (einschließlich einer Kurzprüfvariante) beschrieben, diskutiert und beispielhaft angewendet. Darin wird auch auf die Abhängigkeit des Strömungswiderstands von der Strömungsgeschwindigkeit hingewiesen, z.B. durch Ausbildung turbulenter statt laminarer Strömungen.

In [4] wird der Strömungswiderstand kurzer, runder Kanäle bestimmt, die sich z.B. zur Kalibrierung eignen.

In [5] wird - ausgehend von der Notwendigkeit kleiner Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5 mm/s zur Vermeidung turbulenter Strömungen und unter Verwendung von Mikrofonen zur Messung kleinster Schalldrücke - das Messverfahren mit Luftwechselstrom hergeleitet. Ein sinnvoller Bereich von Betriebsfrequenzen um 1 Hz wird errechnet durch eine Abschätzung zur Vernachlässigung der Massenträgheit gegenüber der Dämpfung.

In [6] wird der Messaufbau in verschiedener Weise modifiziert. Dadurch kann der Strömungswiderstand z.B. nicht nur senkrecht sondern auch parallel zur Probenebene oder ohne Ausschneiden von Proben aus einem Materialstück gemessen werden. Außerdem wird eine neue Bauform für das Luftwechselstromverfahren vorgeschlagen.

In [7] werden die Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichungen in einem Ringversuch ermittelt.

In [8] wird das Wechselstromverfahren statt mit einem motorbetriebenen Kolben bei 2 Hz nun mit einem Lautsprecher bei deutlich höheren Frequenzen durchgeführt.

In [9] werden Messungen nach dem Gleichstrom- und dem Wechselstromverfahren einander gegenübergestellt.

Bei diversen Standardmaterialien zeigen sich im Rahmen der Vergleichsstandardabweichung aus [7] keine signifikanten Abweichungen. Bei einem Material, das per 3D-Druck bewusst mit einem richtungsabhängigen Strömungswiderstand konstruiert war, traten wie erwartet Unterschiede auf. Dabei liefert das Wechselstromverfahren etwa den Mittelwert des Gleichstromverfahrens mit beiden Durchströmungsrichtungen.

Messaufbau

Der Messaufbau des Wechselstromverfahrens ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Dabei wird durch einen

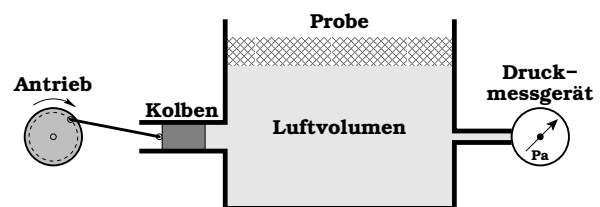


Abbildung 1: Schema des Messaufbaus

Kolben ein Wechseldruck in einem Gefäß erzeugt. Dieser Wechseldruck liegt auf einer Seite der eingebauten Probe an, der statische Luftdruck auf der anderen Seite. Durch diese Druckdifferenz kommt es in der Probe zu einer den Druck ausgleichenden Luftströmung. Der Wechseldruck im Gefäß wird per Mikrofon gemessen.

Bei der hier verwendeten Messapparatur (siehe Abbildung 2) ist die Anregungsfrequenz im Bereich von etwa 0,05 Hz bis etwa 6,3 Hz variierbar. Die Messung der Frequenz erfolgt durch Lokalisierung des Maximums im Spektrum - zunächst in Terzen, später in feiner auflösender FFT-Analyse. Der zugehörige Schalldruck(pegel) wird als Messwert verwendet.



Abbildung 2: Die Messapparatur; später wurden ein anderes Mikrofon und andere Analysatoren verwendet.

Die Apparatur besitzt eine quadratische Probenöffnung, um würfelförmige Proben jeweils in allen drei Achsen messen zu können. Dies ist wichtig für verschiedene Anwendungen, bei denen der Luftstrom nicht senkrecht sondern parallel zur Werkstoffebene vorliegt.

Die Maße der Probenöffnung wurden passend zur Messung der dynamischen Steifigkeit gemäß [10] gewählt, damit entsprechende Messungen an denselben Proben durchgeführt werden können.

Modellierung

Die Änderung $\dot{V}(t)$ des Luftvolumens im Gefäß ergibt sich durch die Summe aller Verschiebungen der Systemgrenzen. Diese entstehen durch die Kolbenbewegung und durch die Luftströmung durch die Probe:

$$\dot{V}(t) = A_K \dot{s}(t) + A_P v_P(t). \quad (1)$$

Darin sind A_K und A_P die Querschnittsflächen von Kolben und Probe, sowie $\dot{s}(t)$ und $v_P(t)$ die Verschiebegeschwindigkeiten dieser Flächen - letztere entspricht der Strömungsgeschwindigkeit. Dieser Ansatz enthält die vereinfachende Annahme, dass sich die Systemgrenze des Luftvolumens in der Proben-Öffnung bewegt. Ein zukünftiges Modell soll den Materie- und Energie-Austausch an der dann stationären Grenzfläche beinhalten.

Die gemäß [1] "lineare Strömungsgeschwindigkeit" $v_P(t)$ errechnet man über die Differenz zwischen Innendruck $p(t)$ und statischem Außendruck p_0 und über den spezifischen Strömungswiderstand $R_{s,P}$ der Probe:

$$v_P(t) = \frac{p(t) - p_0}{R_{s,P}}. \quad (2)$$

Dieser Ansatz stellt ein makroskopisches Modell der durchströmten Probe dar. Es beschreibt nicht den graduellen Druckausgleich im Inneren der Probe und berücksichtigt keine eventuelle Abhängigkeit des Strömungswiderstands von der Strömungsgeschwindigkeit.

Man substituiert $V(t) = \tilde{V}(p(t))$ und setzt als Zusammenhang $\tilde{V}(p)$ die Zustandsgleichung des idealen Gases für adiabatische Zustandsänderungen mit dem Adiabatenexponent $\kappa = 1,4$ (für Luft) ein:

$$p \cdot \tilde{V}^\kappa(p) = const. \quad (3)$$

Dies und (2) setzt man in (1) ein und erhält die folgende Differentialgleichung 1. Ordnung:

$$-\frac{\tilde{V}(p(t))}{\kappa p(t)} \dot{p}(t) = A_K \dot{s}(t) + \frac{A_P}{R_{s,P}} (p(t) - p_0). \quad (4)$$

Als Näherung wird diese DGL um den Arbeitspunkt des stationären Luftdrucks p_0 mit dem zugehörigen Luftvolumen $V_0 := \tilde{V}(p_0)$ linearisiert:

$$-\frac{V_0}{\kappa p_0} \dot{p}(t) = A_K \dot{s}(t) + \frac{A_P}{R_{s,P}} p(t). \quad (5)$$

Dies ist nun eine DGL 1. Ordnung mit konstanten Koeffizienten und wird mit den üblichen Verfahren gelöst. Als Anregung $s(t)$ wird ein harmonisches Signal angesetzt:

$$s(t) = \hat{s} \cos \Omega t \quad (6)$$

mit der Amplitude \hat{s} , der Kreisfrequenz $\Omega = 2\pi f$ und der Frequenz f . Dieser harmonische Ansatz ist angesichts der Bewegungserzeugung per Pleulstange eine Näherung.

Für den Betrag des Wechseldrucks im Gefäß erhält man:

$$\hat{p} = \frac{A_K \hat{s} \Omega}{\sqrt{\left[\frac{V_0 \Omega}{p_0 \kappa}\right]^2 + \left[\frac{A_P}{R_{s,P}}\right]^2}}. \quad (7)$$

Dann kann die Apparatur kalibriert werden, indem man das Gefäß anstelle einer Probe mit einer undurchlässigen Scheibe abgedeckt ($R_{s,P} \rightarrow \infty$). Dann erhält man aus (7) den Druck beim Kalibriervorgang, vgl. [1]:

$$\hat{p}_{\text{Kal}} = \frac{A_K \hat{s} \kappa p_0}{V_0}. \quad (8)$$

Ggf. kann man noch per Faktor $1/\sqrt{2}$ auf den Effektivwert umrechnen. Diese Gleichung findet sich als Gleichung (6) in [6]. Beim nachfolgenden Messvorgang mit Probe wird die Amplitude \hat{p}_{Mess} des Wechseldrucks um den statischen Luftdruck p_0 gemessen, in (7) eingesetzt und nach der gesuchten Größe $R_{s,P}$ aufgelöst:

$$R_{s,P} = A_P \cdot \frac{\kappa p_0}{V_0 \Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{\hat{p}_{\text{Kal}}}{\hat{p}_{\text{Mess}}}\right]^2 - 1}}. \quad (9)$$

Gilt $\hat{p}_{\text{Kal}} \gg \hat{p}_{\text{Mess}}$ (d.h. das Prüfmaterial ist nicht annähernd so dicht wie der ideale Verschluss per Platte), dann kann man die Eins unter der Wurzel vernachlässigen und erhält als Näherung wie in [1]:

$$R_{s,P} \approx A_P \cdot \frac{\kappa p_0}{V_0 \Omega} \cdot \frac{\hat{p}_{\text{Mess}}}{\hat{p}_{\text{Kal}}} \quad (10)$$

oder durch Einsetzen von \hat{p}_{Kal} aus (8):

$$R_{s,P} \approx A_P \cdot \frac{\hat{p}_{\text{Mess}}}{A_K \Omega \hat{s}}, \quad (11)$$

wobei der Nenner des Bruchs den Volumenstrom des Kolbens darstellt. Ggf. muss man in (11) noch per Faktor $\sqrt{2}$ vom Effektivwert wieder rückrechnen.

Ändern sich zwischen den Messungen von \hat{p}_{Kal} und \hat{p}_{Mess} Systemparameter, so ist statt (9) folgende Gleichung zu verwenden:

$$R_{s,P} = A_P \cdot \frac{\kappa p_{0,\text{Kal}}}{V_{0,\text{Kal}} \Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{\hat{p}_{\text{Kal}}}{\hat{p}_{\text{Mess}}}\right]^2 \varphi_s^2 - \frac{\varphi_{V_0}^2}{\varphi_{p_0}^2}}}. \quad (12)$$

mit den Koeffizienten der jeweiligen Größen bei Messung bzw. Kalibrierung:

$$\varphi_s = \frac{\hat{s}_{\text{Mess}}}{\hat{s}_{\text{Kal}}}, \quad \varphi_{p_0} = \frac{p_{0,\text{Mess}}}{p_{0,\text{Kal}}}, \quad \varphi_{V_0} = \frac{V_{0,\text{Mess}}}{V_{0,\text{Kal}}}. \quad (13)$$

Diskussion und Validierung

Bei den Kalibrierungsmessungen mit dichtem Verschluss fällt auf, dass der Druck \hat{p}_{Kal} zu niedrigen Frequenzen einen deutlichen Abfall zeigt, was er gemäß (8) eigentlich nicht tun sollte. Mögliche Ursachen dieses Effekts könnten sein:

Frequenzgang des Mikrophons: Dies wird ausgeschlossen, weil das verwendete Tieffrequenz-Mikrofon des Typs B&K 4193 mit Adapter UC 0211 laut Herstellerangabe einen glatten Frequenzgang bis hinunter zu 0,1 Hz besitzt.

Frequenzgang des Eingangsfilters: Das Messgerät verfügt am Eingang über einen Hochpass variabler Grenzfrequenz. Abbildung 3 zeigt den Effekt. Da die Va-

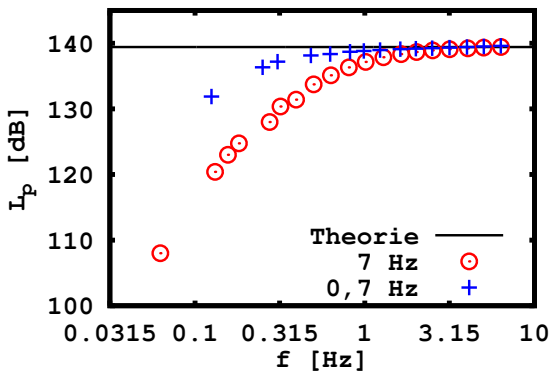


Abbildung 3: Variation des Eingangsfilters (Hochpass) bei geschlossener Probenöffnung. Der Theoriewert folgt aus (8).

riation dieser Grenzfrequenz einen so deutlichen Effekt auf die Messkurve zeigt, wird davon ausgegangen, dass dieser Hochpass den maßgeblichen Effekt liefert. Er wird vom obigen Modell jedoch nicht abgebildet. Es muss also auf die Nutzung der Gleichung (11) verzichtet werden. Stattdessen muss mit den Gleichungen (9), (10) oder (12) gearbeitet werden. Diese enthalten das Verhältnis aus Mess- und Kalibrierdruck bei der jeweiligen Anregungsfrequenz. Die Wirkung des Hochpassfilters ist in beiden Fällen gleich und kürzt sich entsprechend heraus.

Übergang von adiabatisch zu isotherm: Für tiefe Frequenzen könnte ein Wärmeaustausch des Luftvolumens mit der Apparatur möglich werden und wäre in der Modellierung zu berücksichtigen. Anstelle (3) wäre im isothermen Grenzfall mit $p \cdot \bar{V}(p) = \text{const.}$ zu arbeiten. In den nachfolgenden Gleichungen entfielen der Faktor κ , z.B. in (8). Es wäre dann ein um den Faktor $\kappa = 1,4$ kleinerer Kalibrierdruck oder entsprechend ein etwa 3 dB kleinerer Pegel zu erwarten. Betrachtet man den Verlauf in Abbildung 3, so zeigt dieser für große Frequenzen (noch adiabatisch) einen Pegel von etwa 140 dB. Für kleine Frequenzen (schon isotherm) wäre dann ein Pegel von 137 dB zu erwarten, was deutlich unterschritten wird.

Außerdem haben Abschätzungen nach [11] ergeben, dass in dem hier untersuchten Frequenzbereich Änderungen der Zustandsänderung von adiabatisch zu isotherm im

Bereich von etwa 3% liegen und dass etwaige Energieverluste durch Wärmeabflüsse gegenüber der Energiespeicherung vernachlässigt werden können (unter 5%).

Darum wird ein Verlust der Adiabasie nicht als (alleinige) Ursache des gemessenen Kurvenverlaufs angesehen. Inwiefern er ein Teil des sichtbaren Effekts ist, müsste durch eine weitere Verringerung der Grenzfrequenz des Hochpassfilters ermittelt werden.

Leck: Falls ein Leck (oder mehrere verteilte) in der Apparatur vorliegt, findet ein Druckausgleich mit der Umgebung statt. Dazu ist in (1) ein entsprechender Term $A_L \cdot v_L(t)$ zu addieren. Darin ist A_L die Querschnittsfläche des Lecks und $v_L(t)$ die Verschiebegeschwindigkeit, für die ein Ansatz wie in (2) gemacht wird: $v_L(t) = (p(t) - p_0)/R_{s,L}$ mit dem spezifischen Strömungswiderstand $R_{s,L}$ des Lecks. Anstelle von (7) erhält man:

$$\hat{p} = \frac{A_K \hat{s} \Omega}{\sqrt{\left[\frac{V_0 \Omega}{p_0 \kappa}\right]^2 + \left[\frac{A_P}{R_{s,P}} + \frac{A_L}{R_{s,L}}\right]^2}} \quad (14)$$

Setzt man hierin für die Kalibrierung wieder $R_{s,P} \rightarrow \infty$ ein, dann erhält man nun anstelle von (8):

$$\hat{p}_{\text{Kal}} = \frac{A_K \hat{s} \kappa p_0}{V_0} \cdot \frac{\Omega}{\sqrt{\Omega^2 + \Omega_0^2}} \quad (15)$$

mit der zu bestimmenden Größe $\Omega_0 = \frac{p_0 \kappa}{V_0} \cdot \frac{A_L}{R_{s,L}}$.

Linearisierung der DGL: Der Übergang von (4) zu (5) muss noch auf seinen Einfluss untersucht werden.

Validierung mit Messungen: Nun sollen die hergeleiteten Gleichungen experimentell validiert werden. Exemplarisch wird hier die Variation des Gefäßvolumens V_0 durchgeführt. Aufgrund von Gleichung (8) muss sich der messbare Kalibrierdruck entsprechend verändern. Dies wird in Abbildung 4 dargestellt. Es ist deutlich, dass die

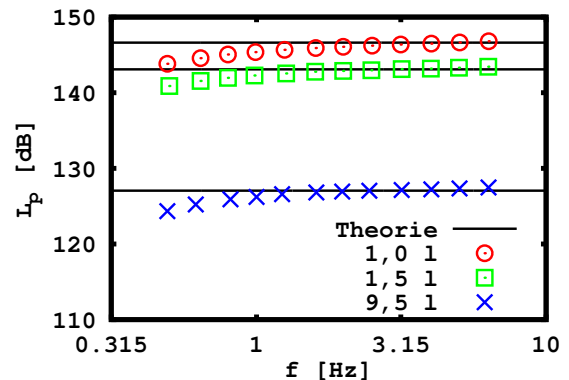


Abbildung 4: Variation des Gefäßvolumens V_0 . Die Theoriewerte folgen jeweils aus (8).

Theoriewerte gemäß (8) gut zu ihren jeweiligen Messwerten passen und dass die Variation von V_0 vom Modell korrekt wiedergegeben wird.

Messungen

Exemplarisch ist in Abbildung 5 die Messung einer würfelförmigen Mineralwollprobe in allen drei Achsen gezeigt. Der gemessene Schalldruckpegel verläuft zwischen

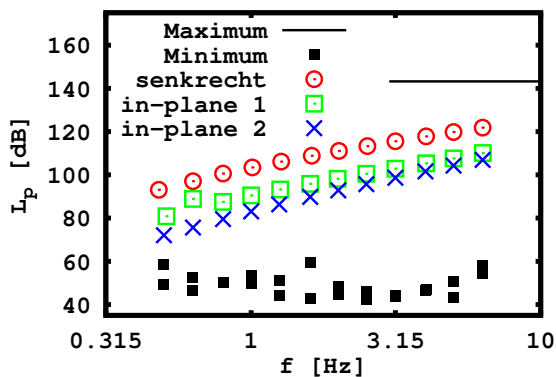


Abbildung 5: Messung von Mineralwolle in drei Raumrichtungen. Der Maximalwert folgt aus (8), die Minimalwerte aus Messungen des Störgeräuschs.

den gezeigten Grenzen des Messverfahrens. Eine Umrechnung auf den spezifischen Strömungswiderstand erfolgt gemäß (12) und liefert die Daten in Abbildung 6. Deutlich

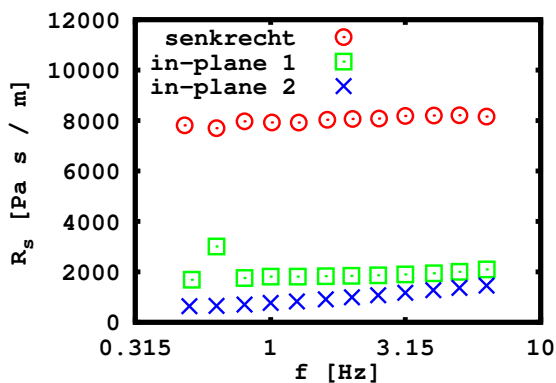


Abbildung 6: Messung von Mineralwolle in drei Raumrichtungen, umgerechnet auf spezifischen Strömungswiderstand

ist die Abhängigkeit von der Strömungsrichtung zu erkennen. Ob die erkennbare Frequenzabhängigkeit der Daten eine Eigenschaft der Probe oder des Messverfahrens ist, muss die weitere Analyse noch klären.

Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellte einfache Theorie bestätigt die in der Norm [1] angegebenen Gleichungen. Dennoch ist die Theorie an diversen Stellen noch verbesserbar und soll zukünftig entsprechend weiterentwickelt werden.

Verschiedene Effekte wie Frequenzgänge des Mikrophons, der Filter und der thermodynamischen Zustandsänderungen, sowie Lecks in der Apparatur können die Messungen beeinflussen. Manche dieser Effekte können durch Kalibrierungsmessungen kompensiert werden.

Manche andere Effekte müssen noch weitergehend untersucht werden.

Insgesamt hat sich das Luftwechselstromverfahren bewährt und sollte in der Norm [1] erhalten bleiben.

Literatur

- [1] DIN EN 29053 Akustik – Materialien für akustische Anwendungen: Bestimmung des Strömungswiderstandes, 1993 (enthält die deutsche Fassung von ISO 9053 (1991))
- [2] ASTM C 522 – Standard Test Method for Airflow Resistance of Acoustical Materials, 2016
- [3] Richard L. Brown and Richard H. Bolt: “The Measurement of Flow Resistance of Porous Acoustic Materials”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **13** (1942), pp. 337-344
- [4] W. Kraak: “Der dynamische Strömungsstandwert (Strömungswiderstand) kreisförmiger, kurzer Kanäle”, *Hochfrequenztechn. und Elektroak.*, **65** (1956), S. 46-49
- [5] W. Wöhle und K. Weber: “Eine Messmethode für niedrige Strömungsstandwerte (Strömungswiderstände)”, *Hochfrequenztechn. und Elektroak.*, **68** (1959), S. 158-162
- [6] G. Venzke, R. Behr und H. Deicke: “Erweiterte Möglichkeiten zur Messung des Strömungswiderstandes von porösen Schichten”, *Acustica*, **26** (1972), S. 141-146
- [7] Massimo Garai and Francesco Pompoli: “A European Inter-Laboratory Test of Airflow Resistivity Measurements”, *Acta Acustica united with Acustica*, **89** (2003), pp. 471-478
- [8] Rafaele Dragonetti, Carmine Ianniello and Rosario A. Romano: “Measurement of the resistivity of porous materials with an alternating air-flow method”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **129** (2011), pp. 753-764
- [9] Tobias Ring, Christian Morgenstern und Sabine C. Langer: “Vergleich der Verfahren A und B zur Messung des Strömungswiderstandes gemäß EN 29053:1993”, *Fortschritte der Akustik - DAGA 2017*, (2017), S. 236–238
- [10] DIN EN 29052 Akustik – Bestimmung der dynamischen Steifigkeit: Teil 1 – Materialien, die unter schwimmenden Estrichen in Wohngebäuden verlegt werden, 1992 (enthält die deutsche Fassung von ISO 9052-1 (1989))
- [11] Arno Lenk, Günther Pfeiffer und Roland Werthschützky: “Elektromechanische Systeme - mechanische und akustische Netzwerke, deren Wechselwirkungen und Anwendungen”, Springer, Berlin, 2001