

Vergleich der Verfahren A und B zur Messung des Strömungswiderstandes gemäß EN 29053:1993

Tobias Ring¹, Christian Morgenstern², Sabine C. Langer³

¹ Institut für Konstruktionstechnik, 38106 Braunschweig, Deutschland, Email: t.ring@tu-braunschweig.de

² Bertrandt Technologie GmbH, 38524 Sassenburg, Deutschland, Email: Christian.Morgenstern@de.bertrandt.com

³ Institut für Konstruktionstechnik, 38106 Braunschweig, Deutschland, Email: s.langer@tu-braunschweig.de

Einleitung

Poröse Materialien lassen sich von Fluiden durchströmen. Der Widerstand, den das Material der Durchströmung entgegensetzt, ist der Strömungswiderstand. Der Strömungswiderstand hängt von verschiedenen Materialparametern, wie beispielsweise Porosität und Tortuosität, ab und ist für die akustische Charakterisierung poröser Materialien erforderlich. Die Messung des Strömungswiderstandes für Luft ist in der Norm EN 29053:1993 beschrieben. Dabei sind zwei Verfahren zulässig, das Luftgleichstromverfahren (Verfahren A) sowie das Luftwechselstromverfahren (Verfahren B). Es ist jedoch nicht bekannt, in wieweit beide Verfahren identische Ergebnisse liefern und ob die Ergebnisqualität von den zu prüfenden Materialien abhängt. In diesem Beitrag werden daher die Werte des Strömungswiderstandes für verschiedene klassische Materialien und ein generisches Material mit beiden Messverfahren bestimmt und die Ergebnisse gegenüber gestellt.

Beschreibung der Messverfahren

Die Norm EN 29053:1993 lässt zur Messung des Strömungswiderstandes für Luft zwei Messverfahren, das Luftgleichstromverfahren (Verfahren A) und das Luftwechselstromverfahren (Verfahren B) zu. Der Strömungswiderstand R ist definiert als der Quotient aus dem über die Probe abfallenden Druck Δp und dem durch die Probe hindurch tretenden Volumenstrom q , entsprechend Gleichung (1).

$$R = \frac{\Delta p}{q} \quad (1)$$

Durch Multiplikation mit der Probenfläche A ergibt sich der **spezifische Strömungswiderstand** R_s , siehe Gleichung (2). Die Dimension des spezifischen Strömungswiderstandes ist $[\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}]$. Nachfolgend wird stets der spezifische Strömungswiderstand verglichen.

$$R_s = R \cdot A \quad (2)$$

Verfahren A Das Luftgleichstromverfahren arbeitet mit einem zeitlich konstanten Luftvolumenstrom, welcher die Probe durchströmt. Der bei der Durchströmung entstehende Differenzdruck über die Probe wird gemessen. [1]

Verfahren B Bei dem Luftwechselstromverfahren durchströmt der Luftvolumenstrom die Probe harmonisch oszillierend in beide Richtungen. Die Frequenz des Luftwechseldrucks beträgt 2 Hz. Gemessen wird jeweils



Luftgleichstromverfahren



Luftwechselstromverfahren

Abbildung 1: Verwendete Messeinrichtungen

der Effektivwert des Volumenstromes durch und der Differenzdruck über die Probe. Dabei besitzt das Verfahren nur dann Gültigkeit, sofern die harmonische Komprimierung adiabatisch erfolgt. [1]

Verwendete Messeinrichtungen

Für den Vergleich der Verfahren werden eine Messeinrichtung bei der Bertrandt Technologie GmbH in Sassenburg (Verfahren A) sowie das System NOR1517 der Firma Norsonic (Verfahren B) am Institut für Konstruktionstechnik der TU Braunschweig verwendet. Das System zur Messung nach Verfahren A ist eine Eigenentwicklung und arbeitet nach dem in [4] beschriebenen Komparationsverfahren. Dabei wird der Strömungswiderstand der zu prüfenden Probe durch Vergleich mit einem kalibrierten Normal bestimmt. Der verwendbare Probendurchmesser beträgt 44 mm und der messbare Bereich des Volumenstromes beträgt $2,32 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ bis $33,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Die Messeinrichtung für das Verfahren B lässt standardmäßig die Verwendung von Proben mit einem Durchmesser von 100 mm und einen Volumenstrom von $3,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $39,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ zu. Die Messeinrichtungen für die Verfahren A und B sind in Abbildung 1 abgebildet.

Klassische Materialien

Für die Untersuchung stehen fünf Materialien zur Verfügung, ein *Melaminharzschäum*, verschiedene *Dekormaterialien*, zwei Typen *Vliese* sowie *poröses Aluminium*. Tabelle 1 führt alle Materialien, die verwendeten Kurzbezeichnungen und die flächenbezogene Masse auf. Die angegebene Flächenmasse ist der Mittelwert über alle zur Verfügung stehenden Proben je Material. Aus allen Materialien mit Ausnahme des Aluminiums werden je neun Proben entnommen. Für das poröse Aluminium stehen vier Proben zur Verfügung. Der Melaminharzschäum liegt in verschiedenen Dicken, von 5 mm bis 30 mm in 5 mm-Schritten vor. Die Gruppe der Vliese umfasst vier Polyesterliese (PES) mit verschiedenen Dicken

und Flächenmassen sowie ein Mischfaservlies (MFV). Die Dicke beträgt hier 20 mm bis 30 mm. Die Dekore sind teppichartige Materialien mit einem in der Vertikalen dichteren Aufbau unten und einem durchlässigen Flor darüber mit einer Gesamtdicke zwischen 3,5 mm und 6,0 mm. Das poröse Aluminium besteht aus einer Matrix aus hochreinem Aluminium durchsetzt mit Poren unterschiedlicher Größe. Dabei wird das Material mit der größten Porengröße als grob, das Material mit der mittleren Porengröße als mittel und das Material mit der kleinsten Porengröße als fein bezeichnet.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Materialien

Material	Parameter	
	Bezeichnung	Flächenmasse
Melaminharzschaum (Dicke d)	d = 5 mm	33,1 g/m ²
	d = 10 mm	64,1 g/m ²
	d = 15 mm	84,5 g/m ²
	d = 20 mm	118,9 g/m ²
	d = 25 mm	150,8 g/m ²
	d = 30 mm	164,6 g/m ²
Vliese	PES 800-25	808,2 g/m ²
	PES 800-30	866,4 g/m ²
	PES 1800-30	1716,9 g/m ²
	PES 2000-17	2147,2 g/m ²
	PES 2000-25	2014,5 g/m ²
	MFV 1400-20	1402,5 g/m ²
Dekor	900-3,5	866,4 g/m ²
	1200-3,5	1175,0 g/m ²
	1650-4,5	1574,7 g/m ²
	1450-6	1400,3 g/m ²
poröses Aluminium	grob	23667,7 g/m ²
	mittel	23771,3 g/m ²
	fein	25105,8 g/m ²

In Abbildung 2 sind beispielhaft Probenkörper aus Melaminharzschaum (d = 25 mm), porösem Aluminium (grob), Dekor (1450-6), Mischfaservlies (MFV 1400-20) sowie Polyestervlies (PES 1800-30) gezeigt (von oben im Uhrzeigersinn).



Abbildung 2: Übersicht der untersuchten Materialien

Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Messungen des Strömungswiderstandes für alle Materialien dargestellt. Die Messung des Strömungswiderstandes erfolgt zunächst im Verfahren B, da das Messsystem Probengrößen von 100 mm Durchmesser erfordert. Anschließend werden aus den Proben kleinere Proben mit einem Durchmesser von 44 mm entnommen und die Messung im Verfahren A durchgeführt. Abbildung 3 zeigt die Mittelwerte des Strömungswiderstandes in Abhängigkeit der Flächenmasse, aufgeteilt nach den Messverfahren A und B. Gut zu erkennen ist der große Wertebereich des Strömungswiderstandes aller getesteten Materialien. Eine deutliche Abweichung der Messwerte zwischen beiden Verfahren lässt sich aus dieser Darstellung nicht ableiten. Die Messwerte des Verfahren B liegen dabei für fast alle der für diesen Beitrag verwendeten Materialien geringfügig niedriger als die mit Verfahren A ermittelten Werte.

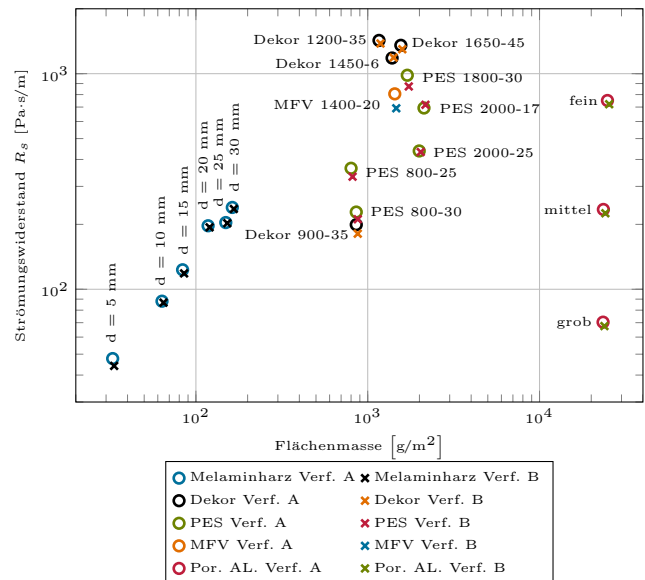


Abbildung 3: Übersicht des Strömungswiderstandes aller Materialien in Abhängigkeit der Flächenmasse

In Abbildung 4 werden die Abweichungen der Messwerte zwischen beiden Messverfahren für jedes Material separat ausgewertet. Die Berechnung der Abweichungen erfolgt durch Subtraktion der Messwerte beider Verfahren und Bildung der relativen Abweichung mittels des jeweils größeren Wertes entsprechend Gleichung (3).

$$Abw. [\%] = \frac{R_{s\text{Verf. A}} - R_{s\text{Verf. B}}}{\max([R_{s\text{Verf. A}}; R_{s\text{Verf. B}}])} \cdot 100 \% \quad (3)$$

In allen Diagrammen ist in der Vertikalen die entsprechend Gleichung (3) berechnete prozentuale Abweichung aufgetragen. Die Boxplots stellen die statistischen Eigenschaften der Daten graphisch dar. Dabei bildet die rote Linie den Median der Daten ab, die blaue Box umfasst 50% aller Daten. Die Whisker sind bis zu den äußersten Datenpunkten verlängert und bilden somit die gesamte Spannweite der Daten ab.

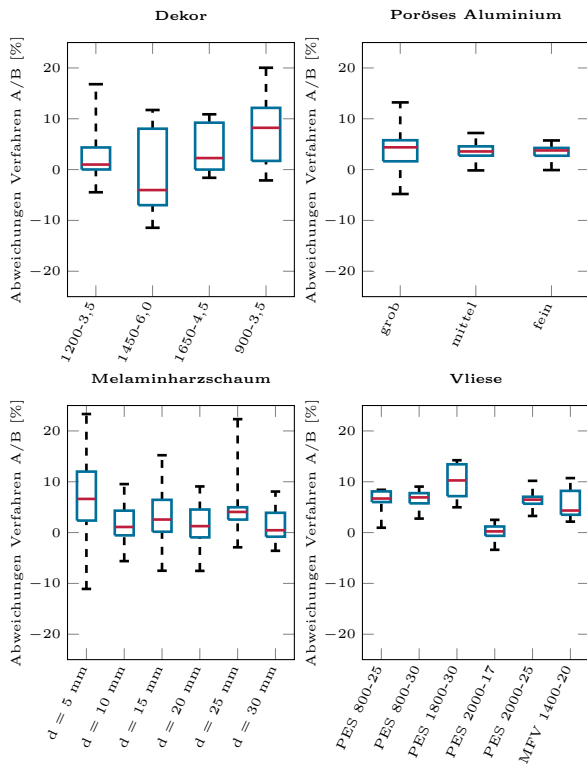


Abbildung 4: Statistische Auswertung der Abweichungen zwischen den Verfahren

Die in Abbildung 3 zu erkennende Tendenz, dass die Messwerte aus Verfahren A oberhalb denen von Verfahren B liegen, zeigt sich auch in Abbildung 4. Die Berechnung der Abweichung entsprechend Gleichung (3) führt für diese Verhältnisse zu positiven Werten der Abweichung. Insgesamt liegt die Abweichung über alle Materialien bei etwa +5%. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Streuung aller Daten für das poröse Aluminium am kleinsten ist. Auch die Vliese weisen eine recht geringe Streuung auf, während der Melaminharzschaum sowie die Dekormaterialien größere Streuungen zeigen. Dies ist möglicherweise durch die verwendeten Probengrößen und Materialeigenschaften zu erklären. Das Messsystem für Verfahren A verwendet Proben mit 44 mm Durchmesser, das Verfahren B verwendet Proben mit 100 mm Durchmesser. Durch Materialinhomogenität kann bereits der wahre Wert des Strömungswiderstandes über die Probenfläche variieren. Für die Messung mit Verfahren A wurden kleine Proben aus den großen, für Verfahren B verwendeten Proben entnommen. Daher kann bereits der wahre Wert des Strömungswiderstandes bei beiden Verfahren abweichen. Weiterhin verwenden die verwendeten Messeinrichtungen unterschiedliche Volumenströme zur Ermittlung des Strömungswiderstandes. Nach [1, 3] ist in diesem Fall die Inter- / Extrapolation des Strömungswiderstandes für eine Strömungsgeschwindigkeit von $u = 0,5 \text{ mm/s}$ innerhalb der Probe erforderlich. Eine Inter- / Extrapolation erfordert jedoch die Messung bei mindestens zwei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten, was bei der vorliegenden Untersuchung aufgrund der verwendeten Messeinrichtungen nicht umgesetzt werden kann.

Unsicherheit der Untersuchung

In [3] wird ein Ringversuch zur Messung des Strömungswiderstandes beschrieben, welcher im Jahr 2000 unter Teilnahme von zehn europäischen Laboratorien durchgeführt wurde. Das erklärte Ziel war die Bestimmung der Vergleichs- und Wiederholstandardabweichungen der Messverfahren. Die Vergleichsstandardabweichung ist dabei die Standardabweichung zwischen verschiedenen Laboratorien. Demgegenüber ist die Wiederholstandardabweichung die Standardabweichung innerhalb eines Labors [2]. Jedem Labor wurde dazu eine Probe des Materials BASOTECT der Firma BASF zugesendet. Das Material wurde als Plattenmaterial bereit gestellt, die Unsicherheit durch die Probenherstellung und die Unsicherheit durch Materialstreuung ist somit Teil der ermittelten Vergleichsstandardabweichung. Insgesamt wurde während des Ringversuches eine Vergleichsstandardabweichung von bis zu 16,5% ermittelt. Demgegenüber ist nach [3] die Wiederholstandardabweichung mit im Mittel 2,8% (eine Probe) bzw. 5,6% (fünf Proben) deutlich geringer. Für die in diesem Beitrag vorgestellte Untersuchung ist, aufgrund des Vergleichs zwischen zwei Laboratorien, die Vergleichsstandardabweichung als Charakterisierungsgröße für die Messunsicherheit heranzuziehen. Als Ergebnis der hier vorgestellten Untersuchung ist somit festzustellen, dass die Messverfahren A und B im Rahmen des in [3] angegebenen Unsicherheitsbudgets von 16,5% keine voneinander abweichenden Messergebnisse liefern.

Generisches Material

Die hier untersuchten Messverfahren unterscheiden sich vor allem in der Art der Durchströmung der Probe. Im Fall des Verfahren A wird die Probe in einer Richtung von einem zeitlich konstanten Luftstrom durchströmt. Bei Verfahren B wird ein zeitlich harmonisch wechselnder Luftstrom erzeugt und die Probe in beiden Richtungen gleichermaßen durchströmt. Die bisher beschriebenen Messergebnisse wurden anhand von klassischen Materialien ermittelt. Diese Materialien zeigen keine signifikante Abhängigkeit des Strömungswiderstandes von der Strömungsrichtung in der Probe. Signifikante Abweichungen zwischen den hier untersuchten Messverfahren sind jedoch dann zu erwarten, wenn der Strömungswiderstand richtungsabhängig ist. Daher wird zusätzlich eine generische Probe untersucht, welche aufgrund ihrer Geometrie ein solches Verhalten zeigt. Zu diesem Zweck wurde eine Probe mit düsenförmigen Bohrungen modelliert und mittels eines 3D-Druckes gefertigt. Abbildung 5 zeigt das CAD-Modell der Probe, Abbildung 6 zeigt die Düsengeometrie sowie die Strömungsrichtung.

Da nur für Verfahren A eine eindeutige Strömungsrichtung angegeben werden kann, wird nachfolgend für Verfahren B die Richtung von der Probenseite, auf welcher der Wecheldruck erzeugt wird zu der dem Umgebungsdruck ausgesetzten Seite als Strömungsrichtung verwendet. Die Messergeb-

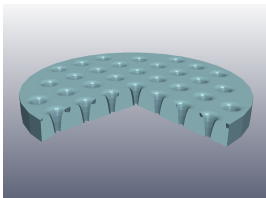


Abbildung 5:
CAD-Modell der generischen Probe

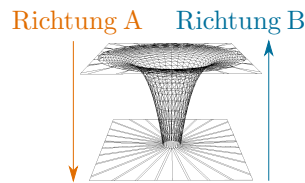


Abbildung 6:
Düsengeometrie und Strömungsrichtung

nisse für die generische Probe sind in Abbildung 7 dargestellt. Aufgrund der Eigenschaften der verwendeten Messeinrichtungen wird für Verfahren A der Strömungswiderstand bei verschiedenen Volumenströmen gemessen, für Verfahren B steht nur ein Volumenstrom zur Messung zur Verfügung.

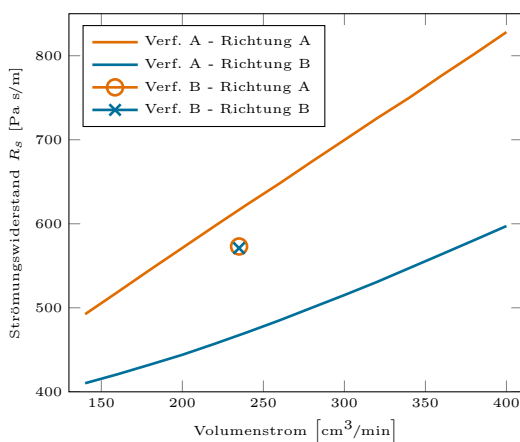


Abbildung 7: Vergleich der richtungsabhängigen Strömungswiderstände beider Verfahren

Anhand der Kurven für Verfahren A zeigt sich, dass der Strömungswiderstand der Probe richtungsabhängig ist, die Messwerte sind in Richtung A für alle Werte des Volumenstromes deutlich größer als in Richtung B. Demgegenüber sind die mit Messverfahren B ermittelten Werte nahezu identisch und somit unabhängig von der Orientierung der Probe relativ zu der gewählten Druckseite. Die Abhängigkeit des Strömungswiderstandes vom Volumenstrom für Verfahren A zeigt weiterhin eine deutliche Nichtlinearität der Probe, der Strömungswiderstand eines linearen Materials wäre unabhängig von dem Volumenstrom. In Tabelle 2 sind die Mittelwerte des Strömungswiderstandes für den mit beiden Verfahren gemessenen Volumenstrom von 235 cm³/min (entspricht 3,9 · 10⁻⁶ m³/s) angegeben. Der Wert für Verfahren A wird dazu aus den Messwerten für 220 cm³/min und 240 cm³/min linear interpoliert.

Die Mittelwerte von Verfahren A mit 542 Pa·s/m sowie Verfahren B mit 572 Pa·s/m unterscheiden sich um 5,2% und können somit im Rahmen der Messunsicherheit als identisch angenommen werden. Demgegenüber ist die Abweichung gemäß Gleichung (3) zwischen den Messwerten in Richtung A und B von Verfahren A mit 22% groß genug um als signifikant angenommen zu werden. Da-

Tabelle 2: Strömungswiderstand der generischen Probe bei einem Volumenstrom von 235 cm³/min

Verfahren	Strömungswiderstand [Pa·s/m]		
	Richtung A	Richtung B	Mittelwert
A	616,6	467,4	542,0
B	573,0	571,0	572,0

her kann gefolgert werden, dass eine Vergleichbarkeit zwischen den Messverfahren A und B nur gewährleistet ist, wenn der Strömungswiderstand richtungsabhängig ermittelt und im Fall von signifikanten Unterschieden zwischen beiden Richtungen als Mittelwert angegeben wird.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird eine Vergleichsuntersuchung zwischen den in der Norm EN 29053:1993 für die Messung des Strömungswiderstandes poröser Materialien zugelassenen Messverfahren Luftgleichstromverfahren (Verfahren A) und Luftwechselstromverfahren (Verfahren B) beschrieben. Wesentlicher Unterschied der Verfahren liegt in der Durchströmung der Probe. Bei Verfahren A wird die Probe gleichförmig in eine Richtung durchströmt, bei Verfahren B wechselt die Strömungsrichtung harmonisch mit einer Frequenz von 2 Hz. Für den Vergleich werden verschiedene poröse Materialien nacheinander mit beiden Messverfahren vermessen. Die Abweichungen beider Verfahren liegen im Rahmen einer Vergleichsstandardabweichung, welche als Messunsicherheit für das Messverfahren im Jahr 2000 durch einen Ringversuch ermittelt wurde und sind somit nicht signifikant.

Neben dem Vergleich der porösen Materialien wird eine generische Probe untersucht, welche einen richtungsabhängigen Strömungswiderstand aufweist. Aufgrund der Eigenschaften der Messverfahren führt diese Probe zu signifikanten Unterschieden in den Messergebnissen beider Verfahren. Dabei liefert Verfahren A die zu erwartenden richtungsabhängigen Werte des Strömungswiderstandes, Verfahren B liefert näherungsweise den Mittelwert zwischen beiden gemessenen Richtungen.

Literatur

- [1] Deutsches Institut für Normung: EN 29053:1993, Materialien für Akustische Anwendungen, Bestimmung des Strömungswiderstandes, 1993
- [2] Deutsches Institut für Normung: ISO 5725-2:1994, Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen, 2002
- [3] Garai, M., Pompoli, F., A European Inter-Laboratory Test of Airflow Resistivity Measurements, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 89, 471 - 478, 2003
- [4] Stinson, M. R., Daigle, G., A., Electronic system for the measurement of flow resistance, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 83, 2422-2428, 1988