

# Einfluss der Dämpfung auf die Messung der dynamischen Steifigkeit von Fußbodenunterlagen

Martin Schmelzer<sup>1</sup>, Volker Wittstock<sup>2</sup>

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany*

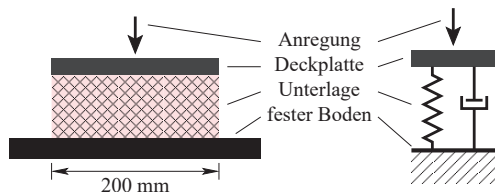
<sup>1</sup>Email: martin.schmelzer@ptb.de, <sup>2</sup>Email: volker.wittstock@ptb.de

## Einleitung

Fußböden mit schwimmendem Estrich werden oft eingesetzt, um die Tritt- und Luftschallübertragung in Gebäuden zu reduzieren. Die Unterlage unter dem schwimmenden Estrich wirkt wie eine Feder, welche die Schwingungen des schwimmenden Estrichs von der Rohdecke entkoppelt. Dies geschieht maßgeblich bei Frequenzen deutlich oberhalb der Resonanzfrequenz  $f_r$  des Systems, welche, basierend auf einem einfachen Oszillators wie in ISO 12354-2 [1], sehr einfach aus der flächenbezogenen Masse des Estrichs  $m'$  und der flächenbezogenen dynamischen Steifigkeit  $s'$  der Unterlage berechnet werden kann:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (1)$$

Die Messung der dynamischen Steifigkeit  $s'$  ist in den Normen ISO 9052-1 [2] und DIN EN 29052-1 [3] definiert. Abbildung 1 zeigt eine der genormten Messanordnungen. Die interessierende Größe ist die in der Analogie dargestellte Feder.



**Abbildung 1:** Ein schematischer Messaufbau (links) und dessen mechanische Analogie (rechts) aus [2].

Aus einer gemessenen Übertragungsfunktion dieses Systems wird die Resonanzfrequenz  $f_r$  ausgelesen. Die scheinbare Steifigkeit der Messung  $s'_t$  wird dann aus dieser Resonanzfrequenz  $f_r$  und der flächenbezogenen Masse der oberen Deckplatte  $m'_t$  berechnet:

$$s'_t = (2\pi f_r)^2 m'_t \quad (2)$$

Die Normen [2, 3] berechnen daraus die dynamische Steifigkeit  $s'$ . Dafür unterscheiden sie drei Wertebereiche des lateralen Strömungswiderstands  $\sigma$ , welcher gemäß ISO 9053 [4] gemessen wird.

Kraak modellierte die Messsituation in [5] und leitete eine kontinuierliche Formel her, welche  $s'_t$  und  $s'$  miteinander verbindet. Dies wird im folgenden Abschnitt zusammengefasst dargestellt.

In [6] war die Rechnung aus [5] diskutiert worden. Es war für den Fall einer Überarbeitung der Normen [2, 3] vorgeschlagen worden, die drei Wertebereiche jener Normen

durch Kraaks kontinuierliche Formel zu ersetzen. Einige in [6] noch verbliebene Abweichungen zwischen der erwarteten und der berechneten dynamischen Steifigkeit  $s'$  werden hier untersucht.

Über einen Ringversuch zum Messverfahren berichtet [7]. Aus der dort genannten absoluten Standardabweichung dreier Proben kann man im Mittel eine einfache relative Vergleichsstandardabweichung der dynamischen Steifigkeit von etwa 20% errechnen. Diese wird hier eingesetzt.

Die verwendeten Materialparameter, geometrischen Parameter und abgeleiteten Größen nennt Tabelle 1. Eine Abtastung des Parameterraums erfolgt innerhalb der Grenzen von Tabelle 2. Alle Kombinationen der variierten Parameter  $\varepsilon$ ,  $\chi$ ,  $s'_s$  und  $d$  ergeben insgesamt 1568 Parametersätze, jeweils mit Abtastung entlang  $\sigma$ .

## Die Rechnung von Kraak

Kraak modellierte den Messaufbau der Normen [2, 3] in [5] mit quadratischer und kreisförmiger Geometrie.

Kraak nahm an, dass die obere Deckplatte nur vertikale Starrkörperbewegungen ausführt und mit der Kreisfrequenz  $\omega$  und der Auslenkungsamplitude  $\hat{w}_0$  harmonisch angeregt wird.

Kraak rechnete mit isothermen Zustandsänderungen. Hier werden hingegen adiabatische Zustandsänderungen angesetzt, weil in den Messungen gemäß [8] Resonanzfrequenzen von ca. 70 Hz erwartet werden.

Für die komplexe Amplitude  $\hat{p}$  des Schalldrucks im Inneren der Unterlage erhielt Kraak die folgende DGL mit dem Laplace-Operator  $\Delta$ :

$$\Delta \hat{p} - i\alpha^2 \hat{p} = -\frac{i\omega\sigma}{d} \hat{w}_0 \quad (3)$$

Bei Kreisgeometrie mit Radialkoordinate  $r$  liefert dies die Bessel-DGL nullter Ordnung. Mit den Randbedingungen  $\hat{p}'(0) = 0$  (Symmetrie) und  $\hat{p}(R) = 0$  (offener Außenrand) erhält man eine Lösung mit der Bessel Funktion  $J_0$ :

$$\hat{p}(r) = \frac{\kappa p_0}{d\varepsilon} \hat{w}_0 \left[ 1 - \frac{J_0(\sqrt{-i}\alpha r)}{J_0(\sqrt{-i}\alpha R)} \right] \quad (4)$$

Kraak berechnete den Mittelwert  $\langle \hat{p} \rangle$  des Schalldrucks über der Fläche der Deckplatte und bezog ihn auf die Auslenkungsamplitude der Anregung  $\hat{w}_0$ . So erhält man eine flächenbezogene komplexe dynamische Steifigkeit  $s'_c$  der strömenden Luft im Inneren der Unterlage:

$$s'_c = \frac{\langle \hat{p} \rangle}{\hat{w}_0} = \frac{\kappa p_0}{d\varepsilon} \left[ 1 - \frac{2}{z} \frac{J_1(z)}{J_0(z)} \right]_{z=\sqrt{-i}(\alpha R)} \quad (5)$$

**Tabelle 1:** Grundlegende Größen und ihre Zahlenwerte; gestrichelte Größen wie z.B.  $s'_s$  sind flächenbezogene Größen

| Größe                                           | Symbol        | Wert                                                  | Einheit               |
|-------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>Obere Deckplatte aus Stahl</b>               |               |                                                       |                       |
| Massendichte                                    | $\rho$        | $8.0 \times 10^3$                                     | kg/m <sup>3</sup>     |
| Dicke                                           | $h$           | 0.025                                                 | m                     |
| <b>Unterlage aus porösem Material</b>           |               |                                                       |                       |
| Porosität                                       | $\varepsilon$ | 0.50                                                  | 1                     |
| Strukturfaktor                                  | $\chi$        | 1.0                                                   | 1                     |
| lateraler Strömungswiderstand                   | $\sigma$      | $1.0 \times 10^4$                                     | Pa · s/m <sup>2</sup> |
| Gefügesteifigkeit                               | $s'_s$        | $1.0 \times 10^6$                                     | Pa/m                  |
| Dicke                                           | $d$           | 0.020                                                 | m                     |
| <b>Luft innerhalb der Unterlage</b>             |               |                                                       |                       |
| Massendichte                                    | $\rho_0$      | 1.20                                                  | kg/m <sup>3</sup>     |
| statischer Luftdruck                            | $p_0$         | $1013.25 \times 10^2$                                 | Pa                    |
| Adiabatenexponent                               | $\kappa$      | 1.4                                                   | 1                     |
| <b>Geometrie</b>                                |               |                                                       |                       |
| Außenradius                                     | $R$           | 0.10                                                  | m                     |
| <b>Harmonische Anregung an der Plattenmitte</b> |               |                                                       |                       |
| Kreisfrequenz                                   | $\omega$      | verschieden                                           | 1/s                   |
| Kraftamplitude                                  | $\hat{F}_0$   | verschieden                                           | N                     |
| Auslenkungsamplitude                            | $\hat{w}_0$   | verschieden                                           | m                     |
| <b>Abgeleitete Größen</b>                       |               |                                                       |                       |
| Masse der oberen Deckplatte                     | $m'_t$        | $\rho h$                                              | kg/m <sup>2</sup>     |
| ein Skalierungsfaktor                           | $\alpha$      | $\sqrt{\frac{\omega \varepsilon \sigma}{\kappa p_0}}$ | 1/m                   |
| Steifigkeit der ruhenden Luft in der Unterlage  | $s'_a$        | $\frac{\kappa p_0}{d \varepsilon}$                    | Pa/m                  |
| relative Gefügesteifigkeit                      | $\bar{s}'_s$  | $\frac{s'_s}{s'_a}$                                   | 1                     |
| relative scheinbare Steifigkeit der Messung     | $\bar{s}'_t$  | $\frac{s'_t}{s'_a}$                                   | 1                     |
| imaginäre Einheit                               | $i$           | $\sqrt{-1}$                                           | 1                     |

Da sich Kraak nur für die Steifigkeit (den Speichermodul) interessierte und nicht für die Dämpfung (den Verlustmodul), bildete er den Realteil dieser Größe:

$$s'_\sigma = \Re[s'_c] \quad (6)$$

Kraak nahm an, dass die Steifigkeit der Messung  $s'_t$  aus der Gefügesteifigkeit  $s'_s$  und der Steifigkeit der strömenden Luft innerhalb dieses Gefüges  $s'_\sigma$  additiv zusammengesetzt ist:

$$s'_t = s'_s + s'_\sigma \quad (7)$$

Die gewünschte dynamische Steifigkeit  $s'$  als abstrakte

**Tabelle 2:** Variationsbereiche der Parameter

| Größe         | Wertebereich  |                   | Einheit               |
|---------------|---------------|-------------------|-----------------------|
| $\varepsilon$ | linear        | 0.25 ... 1.0      | 1                     |
| $\chi$        | logarithmisch | $10^0 \dots 10^3$ | 1                     |
| $s'_s$        | logarithmisch | $10^4 \dots 10^7$ | Pa/m                  |
| $d$           | linear        | 0.005 ... 0.040   | m                     |
| $\sigma$      | variabel      | $10^3 \dots 10^8$ | Pa · s/m <sup>2</sup> |

Größe ist definiert als die Summe aus der Gefügesteifigkeit  $s'_s$  und der Steifigkeit der ruhenden Luft innerhalb dieses Gefüges  $s'_a$ :

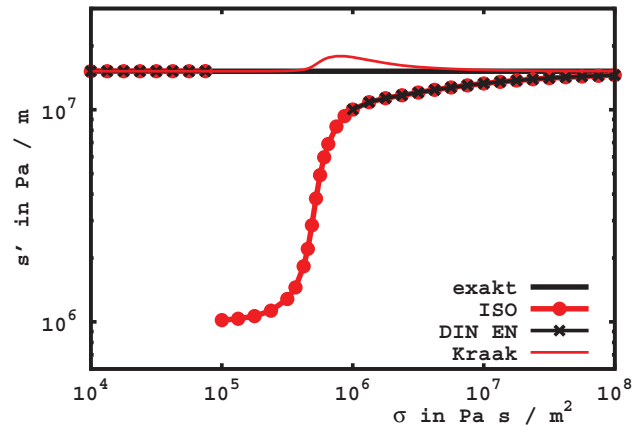
$$s' = s'_s + s'_a \quad (8)$$

Nun konnte Kraak  $s'$  aus (7) und (8) berechnen:

$$s' = s'_t + s'_a - s'_\sigma = s'_t + s'_a \left[ 1 - \frac{s'_\sigma}{s'_a} \right] \quad (9)$$

Kraak untersuchte das Verhältnis  $s'_\sigma / s'_a$  (vgl. [5, 6]) und schlug zwei asymptotische Grenzfälle vor, die vermutlich zu den Auswertebereichen der Normen [2, 3] führten.

Die Situation der Messung wurde in [6] mittels obiger Gleichungen simuliert, die Resonanzfrequenz  $f_r$  extrahiert und die dynamische Steifigkeit  $s'$  aus (2) und (9) berechnet. Der Wert von  $s'$  konnte ebenso per (8) aus den bekannten Eingangsgrößen der Simulation berechnet und mit dem zuvor genannten Wert aus der Simulation verglichen werden. Die Abweichungen zwischen diesen beiden Werten zeigt Abbildung 2 – berechnet für die Werte aus Tabelle 1. Man sieht, dass die Abweichung von Kraaks Korrekturformel (9) klein ist verglichen mit denjenigen Abweichungen aus den Normverfahren. Letztere zeigen Sprünge (ISO) und Definitionslücken (DIN EN).



**Abbildung 2:** dynamische Steifigkeit  $s'$ : der Eingabewert der Simulation aus (8) (**exakt**), die Rechnung gemäß [2] (**ISO**), die Rechnung gemäß der deutschen Präambel in [3] (**DIN EN**) und die Rechnung gemäß (9) (**Kraak**)

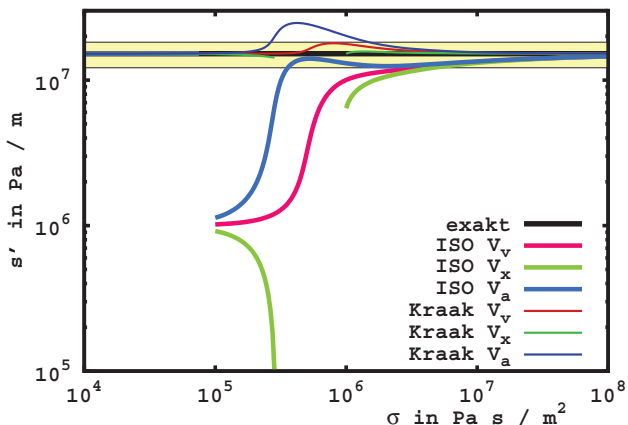
## Wahl der Messgröße

Die Normen [2, 3] legen nicht fest, in welcher Messgröße die Resonanzfrequenz  $f_r$  zu suchen ist. Betrachtet man das Kräftegleichgewicht an der oberen Deckplatte, erhält man z.B. mittels der Anregungsgrößen  $\hat{w}_0$  und  $\hat{F}_0$  die Übertragungsfunktionen  $V_x$ ,  $V_v$  und  $V_a$  für die Auslenkung  $x$ , die Geschwindigkeit  $v$  und die Beschleunigung  $a$ :

$$V_x \stackrel{\text{Def}}{=} \frac{\hat{w}_0}{\hat{F}_0} = \frac{1}{\pi R^2 [-m'_t \omega^2 + s'_s + s'_\sigma]} \quad (10)$$

sowie  $V_v = V_x \cdot (i\omega)$  und  $V_a = V_x \cdot (i\omega)^2$ . Die Wahl einer dieser Größen hat einen signifikanten Einfluss auf die daraus errechnete dynamische Steifigkeit, wie Abbildung 3

zeigt. Darin stammen die roten Kurven (von  $V_v$ ) aus Abbildung 2. Die grünen Kurven (von  $V_x$ ) haben eine Lücke, weil in diesem Bereich keine Resonanz auffindbar ist. Der gelb hinterlegte Bereich markiert die Vergleichsstandardabweichung von 20%, wie sie aus [7] übernommen wurde.



**Abbildung 3:** Flächenbezogene dynamische Steifigkeit  $s'$ : exakter Wert von den Eingabedaten der Simulation (**exakt**) plus dessen Vergleichsstandardabweichung (in gelb); Rechnungen gemäß [2] (ISO) und gemäß (9) (Kraak), jeweils beide für die Transferfunktionen  $V_x$ ,  $V_v$  und  $V_a$

Bei dem der Abbildung 3 zugrunde liegenden Parametersatz aus Tabelle 1 liegt die Auswertung per Kraak-Rechnung (9) von  $V_v$  an der Grenze des gelben Bereichs, die Auswertung von  $V_a$  übersteigt ihn. Die Variation der Parameter gemäß Tabelle 2 wurde durchgeführt.

Dabei überschreitet die Auswertung von  $V_a$  regelmäßig deutlich die Vergleichsstandardabweichung aus dem Ringversuch. Von der Auswertung von  $V_x$  haben über 80% der Datensätze eine Lücke, in denen gar keine Resonanz zur Auswertung gefunden werden kann. Diese beiden Varianten erscheinen daher ungeeignet für eine Auswertung.

Die maximale Abweichung bei der Auswertung von  $V_v$  liegt bei knapp 23% und damit leicht über der erwarteten Vergleichsstandardabweichung aus dem Ringversuch. Der Ringversuch sollte aber vor allem Variationen durch die unterschiedliche Ausführung der Messung abbilden und nicht die "Modellfehler" der Auswertung. Im Hinblick auf die spätere Prognose wären daher die vorliegende Abweichung von 23% und die aus dem Ringversuch erwartete Vergleichsstandardabweichung von 20% zu addieren.

Um die Gesamtunsicherheit möglichst auf die Vergleichsstandardabweichung zu reduzieren, wird im folgenden Abschnitt die Ursache der Abweichungen in der Kraak-Rechnung untersucht.

### Berücksichtigung der Dämpfung

Reale Messungen und deren Simulationen sind dämpfungsbehaftet, hervorgerufen durch die Luftströmung im Inneren der Unterlage mit dem Strömungswiderstand  $\sigma$ . Im Gegensatz dazu hatte Kraak die Dämpfung

vernachlässigt, als er in (6) nur den Realteil des komplexen Moduls  $s'_c$  berücksichtigte und dessen Imaginärteil verwarf. Hier soll nun der vollständige komplexe Modul  $s'_c$  aus (5) verwendet und damit auch die Dämpfung berücksichtigt werden. In den Übertragungsfunktionen wie (10) tritt also anstelle von  $s'_\sigma$  nun  $s'_c$  auf.

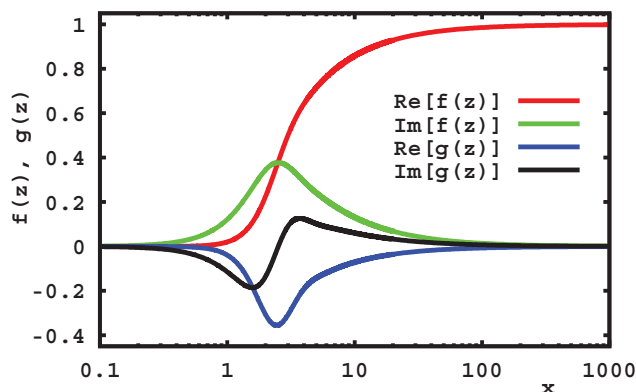
Die Resonanzen liegen an denjenigen Stellen, wo der Betrag der jeweiligen Übertragungsfunktion ein Extremum hat:  $0 = \frac{d|V_{\dots}|}{d\omega}$ . Dabei treten die Real- und Imaginärteile  $\Re[s'_c]$  und  $\Im[s'_c]$  des komplexen Moduls (5) und deren Ableitung nach  $\omega$  auf:  $\frac{d}{d\omega}\Re[s'_c] = \Re[\frac{ds'_c}{d\omega}]$  und  $\frac{d}{d\omega}\Im[s'_c] = \Im[\frac{ds'_c}{d\omega}]$  mit:

$$\frac{ds'_c}{d\omega} = -\frac{s'_a}{\omega} \left[ 1 - \frac{2}{z} \frac{J_1(z)}{J_0(z)} + \frac{J_1^2(z)}{J_0^2(z)} \right]_{z=\sqrt{-1}(\alpha R)} \quad (11)$$

Zur Abkürzung von (5) und (11) werden folgende Hilfsfunktionen  $f$  und  $g$  definiert. Ihre Kurven sind in Abbildung 4 gezeigt.

$$f(z) \stackrel{\text{Def}}{=} 1 - \frac{2}{z} \frac{J_1(z)}{J_0(z)} \quad (12)$$

$$g(z) \stackrel{\text{Def}}{=} 1 - \frac{2}{z} \frac{J_1(z)}{J_0(z)} + \frac{J_1^2(z)}{J_0^2(z)} \quad (13)$$



**Abbildung 4:** Die Funktionen  $f(z)$  aus (12) und  $g(z)$  aus (13), jeweils Real- und Imaginärteile (**Re** und **Im**), mit  $z = \sqrt{-1}x$  und  $x = \alpha R$ ; die rote Kurve findet sich als das Verhältnis  $s'_\sigma / s'_a$  auch in [5, 6]

Diese Funktionen  $f$  und  $g$  gelten für die hier berechnete Kreisgeometrie. Für Quadratgeometrie findet man  $f$  in [5, 6]. Aus deren Ableitung erhält man entsprechend  $g$ .

Die Resonanzbedingung  $0 = \frac{d|V_{\dots}|}{d\omega}$  kann nun nach  $s'_s$  aufgelöst werden. Weil dann Resonanz vorliegt, kann der Term  $m'_t \omega^2$  gemäß (2) durch  $s'_t$  ersetzt werden. Schließlich folgt  $s'$  aus (8):

$$s' = s'_a [s'_s + 1] \quad \text{mit } s'_s \text{ aus Tabelle 3} \quad (14)$$

Die Wurzelfunktion in den Ausdrücken der Tabelle 3 erfordert einige Vorsicht: Ein positiver Radikant muss sichergestellt werden, weil sonst physikalisch unsinnige

**Tabelle 3:**  $\bar{s}'_s$  abgeleitet von den Übertragungsfunktionen  $V_x$ ,  $V_v$  and  $V_a$ ; stets sind  $f = f(z)$  aus (12),  $g = g(z)$  aus (13),  $z = \sqrt{-1}x$  und  $x = \alpha R$ ; alternativ können  $f(z)$  und  $g(z)$  auch aus Abbildung 4 ausgelesen werden

| Relative Gefügesteifigkeit $\bar{s}'_s$ |                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V_x$                                   | $\bar{s}'_t - \Re[f] - \frac{\Im[f] \Im[g]}{2\bar{s}'_t + \Re[g]}$                                                                                                       |
| $V_v$                                   | $\frac{-(\Re[f] + \frac{1}{2}\Re[g]) \dots}{\dots \pm \sqrt{(\bar{s}'_t + \frac{1}{2}\Re[g])^2 - \Im[f](\Im[f] + \Im[g])}}$                                              |
| $V_a$                                   | $\frac{(\frac{1}{2}\bar{s}'_t - \Re[f] - \frac{1}{4}\Re[g]) \dots}{\dots \pm \sqrt{(\frac{1}{2}\bar{s}'_t + \frac{1}{4}\Re[g])^2 - \Im[f](\Im[f] + \frac{1}{2}\Im[g])}}$ |

komplexe Ergebnisse entstehen. Außerdem liefern Wurzelfunktionen stets zwei Ergebnisse. Falls der Absolutwert des Wurzelausdrucks größer ist als der Absolutwert des anderen Summanden, dann wird eine Lösung von  $\bar{s}'_s$  negativ und kann aus physikalischen Gründen vernachlässigt werden. Andernfalls besteht eine Mehrdeutigkeit zwischen den beiden Lösungen für  $\bar{s}'_s$ .

Diese Mehrdeutigkeit tritt bei der Auswertung der Übertragungsfunktion  $V_a$  auf. Beide Lösungen tauschen zweimal ihre Rollen. Man kann die "richtige" der beiden Lösungen nicht ohne Vorkenntnisse finden. Die Übertragungsfunktion  $V_v$  zeigt keine Mehrdeutigkeit für den Parametersatz aus Tabelle 1. Bei der Übertragungsfunktion  $V_x$  taucht gar keine Wurzel auf.

Die Parametervariationen gemäß Tabelle 2 wurden auch hinsichtlich der Dämpfungswirkung ausgewertet. Dabei traten für die Übertragungsfunktion  $V_a$  über einen bestimmten Wertebereich des Strömungswiderstands  $\sigma$  zwei Lösungen auf. Der Wechsel zwischen diesen beiden Lösungen fand für verschiedene Parametersätze auch an verschiedenen Stellen auf der  $\sigma$ -Achse statt. Es kann also keine a-priori Festlegung vorgenommen werden, wann welches Vorzeichen der Wurzel von  $V_a$  in Tabelle 3 zur "richtigen" Lösung führt. Die Übertragungsfunktion  $V_a$  ist also ungeeignet für die Auswertung der Messung mit Berücksichtigung der Dämpfung.

Bei der Übertragungsfunktion  $V_x$  bleibt das Problem bestehen, dass über 80% der Datensätze keine auswertbare Resonanz zeigen. Also ist auch  $V_x$  für die Auswertung nicht geeignet.

Bei der Übertragungsfunktion  $V_v$  trat bei den Parametervariationen stets nur eine Lösung der Wurzel auf. Ebenso wurde der Ausdruck  $-(\Re[f] + \frac{1}{2}\Re[g])$  von  $V_v$  in Tabelle 3 untersucht. Er ist innerhalb numerischer Genauigkeit nie positiv. Also muss von der Wurzel stets der positive Ast gewählt werden, damit ein physikalisch sinnvolles Ergebnis entstehen kann. Die Nutzung von  $V_v$  scheint also geeignet, um die erweiterte Kraak-Korrektur mit Berücksichtigung der Dämpfung durchzuführen. Andere Messgrößen als  $V_v$  können darauf umgerechnet werden, z.B.  $V_v = V_x \cdot (i\omega)$  oder  $V_v = V_a/(i\omega)$ .

## Zusammenfassung

Kraak hatte die Messung der dynamischen Steifigkeit in [5] untersucht. Seine kontinuierliche Korrekturformel (9) ist - auf asymptotische Näherungen reduziert - in den Messnormen [2, 3] enthalten. Die Kraak-Korrektur (9) weicht laut [6] nur in einem engen Wertebereich des Strömungswiderstands leicht vom exakten Wert ab (Abbildung 2).

Es war hier gezeigt worden, dass diese Abweichung aus der Vernachlässigung der Systemdämpfung in der Kraak-Rechnung resultiert. Die Berücksichtigung dieser Systemdämpfung ist zuverlässig möglich, wenn hierfür die Übertragungsfunktion der Geschwindigkeit herangezogen wird. Dann erhält man aus der Messung den exakten Wert der dynamischen Steifigkeit.

Die Messnormen [2, 3] definieren nicht die auszuwertende Messgröße. Es war am Beispiel dreier Übertragungsfunktionen aufgezeigt worden, dass diese Definitionslücke zu recht verschiedenen Ergebnissen der dynamischen Steifigkeit führen kann (Abbildung 3).

## Literatur

- [1] ISO 12354-2 Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms, 2017
- [2] ISO 9052-1 Acoustics – Determination of dynamic stiffness – Part 1: Materials used under floating floors in dwellings, 1989
- [3] DIN EN 29052-1 Akustik – Bestimmung der dynamischen Steifigkeit – Teil 1: Materialien, die unter schwimmenden Estrichen in Wohngebäuden verwendet werden, 1992
- [4] ISO 9053 Acoustics – Materials for acoustical applications – Determination of airflow resistance, 1991
- [5] W. Kraak, "Der Einfluss des Strömungsstandwertes bei der Bestimmung der dynamischen Steifigkeit poröser Dämm-Materialien", Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, Bd. 67, Heft 4/5, 1959, S. 111-113
- [6] M. Schmelzer, V. Wittstock, H. Bietz, S. Brezas, "On the influence of the air flow resistivity on the measurement of the dynamic stiffness of underlays for floating floors", Acta Acustica, Vol. 5, Article 13, 2021, doi 10.1051/aacus/2021004
- [7] D. Krause, "Ringversuch der Prüfstellen, Gruppe 1 – Prüfung der dynamischen Steifigkeit nach DIN EN 29052", MPA-Bericht, TU-Braunschweig, 2004
- [8] DEGA-Memorandum "Tieffrequente Schallübertragung von schwimmenden Estrichen", 2020, URL: [www.dega-akustik.de/fileadmin/dega-akustik.de/publikationen/dega\\_br\\_0106.pdf](http://www.dega-akustik.de/fileadmin/dega-akustik.de/publikationen/dega_br_0106.pdf), zuletzt aufgerufen 01. März 2021