Messung der Schallabsorption von möglichen Referenzabsorbern

Moritz Späh, Xiaoru Zhou, Thomas Busse, David Goecke
Fraunhofer Institut für Bauphysik, Nobelstrasse 12, 70569 Stuttgart
E-Mail: moritz.spaeh@ibp.fraunhofer.de

Einleitung

Die aktuell gültige Norm DIN EN ISO 354 [1] für die Messung der Schallabsorption im Hallraum ist aus dem Jahr 2003. An dieser Norm wird unter anderem schon seit geraumer Zeit kritisiert, dass die gemessenen Schallabsorptionsgrade ähnlicher Prüflinge in verschiedenen Laboren zu teilweise unterschiedlichen Messergebnissen führten, und dass die Vergleichsstandardabweichung verschiedener Labore relativ hoch sei. Die Überarbeitung der Norm wurde schon im Jahr 2009 in WG 26 der ISO /TC/43/SC2 begonnen und wird seit 2019 in WG 35 fortgesetzt. Im Rahmen der Überarbeitung der Norm wurde ein Ringversuch initiiert, der den Einsatz von Referenzabsorbern, die Streuung der Messergebnisse von verschiedenen Laboren und den Einsatz verschiedener Vorgaben im Entwurf der neuen Norm [2] untersuchen soll, um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse von Hallraummessungen zu verbessern. Hierzu zählt die Messung mit Lautsprecherposition in Raumecken und die Konditionierung des Hallraums bei tiefen Frequenzen. Dafür wird eine Vorgabe für die minimale und maximale äquivalente Absorptionsfläche im Frequenzbereich von 100 bis 800 Hz gemacht. Bei höheren Frequenzen wird eine maximale zulässige Absorptionsfläche vorgegeben, die mit der Frequenz ansteigt. Der Entwurf enthält auch eine Vorgabe zur Beurteilung der Krümmung der Nachhallzeiten, die in diesem Beitrag näher untersucht werden soll.

Beschreibung des Hallraums

Der Hallraum des IBP in Abbildung 1 besitzt eine Grundfläche von 60 m² und ein Volumen von 392 m³ und ist damit etwas größer als die im Entwurf angegebene Obergrenze von 350 m³. Auch um zu klären, ob diese Obergrenze des Volumens sinnvoll ist, wurde das IBP in den Ringversuch mit aufgenommen. Der Hallraum besitzt leicht schrägwinklige Wände und eine nicht parallel zum Boden verlaufende Decke, sowie 15 gebogene und bedämpfte abgehängte Diffusoren. Diese haben eine beidseitige Oberfläche von 55,6 m². Damit besitzt der Hallraum des IBP ein Verhältnis von Diffusor zu Raumoberfläche von 17 % bzw. von Diffusor zu Grundfläche von 0,92 %. Somit liegt der Hallraum im unteren Bereich des in der ISO 354 [1] angegebenen Verhältnis von Diffusor- zur Raumoberfläche von 15 – 25 %, ist jedoch im Ringversuch der Hallraum mit dem zweithöchsten Diffusor/Raumoberflächen-Verhältnis.

Die äquivalente Absorptionsfläche im leeren Hallraum liegt im tiefen Frequenzbereich unter der Anforderung der aktuellen ISO 354, aber auch unter dem Bereich, den der Entwurf vorgibt. Daher musste der Hallraum für die Messungen im Ringversuch nach dem neuen Entwurf der ISO 354 modifiziert werden.

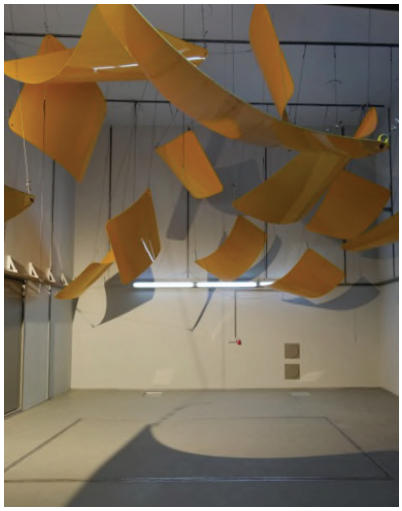

Abbildung 1: Ansicht des leeren Hallraums des IBP.

Modifikation des Hallraums

Zur Anpassung der äquivalenten Absorptionsfläche wurden eine ganze Reihe von Untersuchungen durchgeführt, die endgültig gewählte Variante war das Einbringen von drei VPR-Absorbern in der hinteren linken (rechtwinkligen) Ecke des Hallraums. Dabei spielt auch die Ausrichtung und Abdichtung der Absorber zu den Oberflächen des Hallraums eine Rolle. Mit dieser Maßnahme konnte die äquivalente Absorptionsfläche in den geforderten Bereich gebracht werden, dargestellt in Abbildung 2.

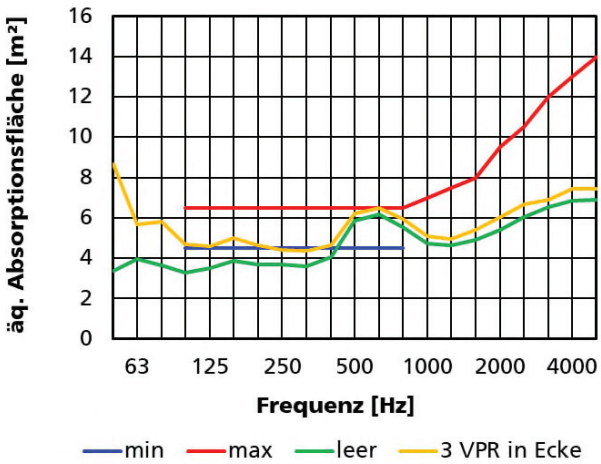

Abbildung 2: Gemessene äquivalente Absorptionsfläche des leeren Hallraums, des Hallraums mit Absorbern und die Anforderungen des Entwurfs der ISO 354 [2].

Die Messung zeigt, dass bei 630 Hz die äquivalente Absorptionsfläche im Raum relativ hoch ist, so dass es hier bei der Konditionierung des Raumes mit Absorbern leicht zur Überschreitung der oberen Grenze kommt. Daher müssen die rein tieffrequent wirksamen Absorber sorgfältig ausgesucht werden. Mit den drei VPR-Absorbern erreicht man Werte, die im vorgegebenen Zielkorridor liegen.

Kriterium für die Krümmung der Nachhallzeit

Im Entwurf der ISO 354 [2] wird im normativen Anhang A.6 ein Kriterium für die Krümmung der Abklingkurve angegeben. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kurve bei optimal diffusem Schallfeld linear verläuft, jedoch bei weniger diffusem Schallfeld eine Krümmung C_m aufweist. Diese ist definiert durch:

$$C_m = 100\left(\frac{T_b}{T_t} - 1\right) \quad \% \qquad (1)$$

Mit T_b der Nachhallzeit über die unteren 15 dB, d.h. von -20 dB bis -35 dB (bottom), T_t der Nachhallzeit der oberen 15 dB (-5 dB bis -20 dB) (top). Die theoretische Standardabweichung der gemittelten Krümmung wurde von Davy [3] angegeben mit:

$$\sigma(\bar{C}) = \sqrt{\frac{K_s^2 + K_e^2/n}{N\,f\,T}} \qquad (2)$$

dabei ist K_s eine Konstante für die räumliche Variation der Krümmung (K_s = 320), K_e die Konstante für die Ensemble-Variation der Krümmung (K_e = 484 bei abgeschaltetem Rauschen, K_e = 0 bei Impulsantwort). N ist die Anzahl der verschiedenen Quellen- und Mikrofonpositionen, n die Anzahl der Messungen pro Quellen- und Mikrofonposition, f die Frequenz und T die mittlere Nachhallzeit. Als Kriterium wird im Entwurf der ISO 354 angegeben, dass

$$\overline{|C_m|} < 3\,\sigma(\bar{C}) \qquad (3)$$

für alle Frequenzen erfüllt sein soll.

Die Ermittlung der Größen in Gleichung (1) ist nicht bei allen Messgeräten für die Messung der Nachhallzeit vorgesehen. Um dennoch eine praktikable Angabe zur Krümmung der Abklingkurven machen zu können wird folgendes Kriterium vorgeschlagen:

$$C_{m,neu} = 100\left(\frac{T_{30}}{T_{15}} - 1\right) \quad \% \qquad (4)$$

Da die beiden Größen T_{30} und T_{15} nicht unabhängig voneinander sind, ist der Vergleich mit der theoretischen Standardabweichung nach Gleichung (2) und dem Kriterium nach Gleichung (3) theoretisch nicht korrekt. Dennoch wurde die Größe $C_{m,neu}$ im Folgenden ebenfalls betrachtet.

Messungen

Im Rahmen des Ringversuches wurden sowohl Messungen nach der aktuell geltenden ISO 354 [1], nach einer modifizierten Vorgehensweise (Lautsprecher in den Raumecken aufgestellt) und nach dem Entwurf der ISO 354 [2] durchgeführt. Die Messdaten wurden herangezogen, um die Krümmung der Abklingkurven zu untersuchen und um zu klären, was dieses Kriterium für unseren Hallraum bedeuten.

Zunächst ergab sich das Problem, dass herkömmliche Messtechnik eine Auswertung der beiden Größen T_b und T_t nicht standardmäßig unterstützt. Lediglich das Messsystem DIRAC [4] ermöglicht diese Auswertung direkt. Da die Messungen mit Software und Hardware von Sinus Messtechnik [5] durchgeführt wurden, mussten die aufgezeichneten Signale zunächst mittels Matlab-Script hinsichtlich dieser beiden Größen ausgewertet werden. Dies konnte automatisiert, unter Berücksichtigung der bekannten Regel (Startpunkt der Auswertung -5 dB unter dem mittleren Pegel bei konstanter Anregung), für alle Messungen durchgeführt werden. Dabei ist anzumerken, dass im Ringversuch die Messung mit abgeschaltetem Rauschen vorgegeben wurde, so dass diese Art der Messung für die hier dargestellte Analyse verwendet wurde.

Krümmung der Nachhallkurven im leeren Hallraum

Zunächst wurde eine Messung des leeren Hallraums nach DIN EN ISO 354 bezüglich der mittleren Krümmung der Abklingkurven ausgewertet und in Abbildung 3 dargestellt. Dabei wurde die Krümmung C_m nach Gleichung (1) auf zwei verschiedene Arten gemittelt. Zum einen wurde die Krümmung für jede der 24 gemessenen Abklingkurven berechnet und gemittelt, zum anderen wurden die Nachhallzeiten gemittelt und daraus die Krümmung berechnet (welche der beiden Arten der Mittelung verwendet werden soll, ist im Entwurf zur ISO 354 [2] offen gelassen). Auch für die Größe $C_{m,neu}$ nach Gleichung (4) wurde die Mittelung analog vorgenommen. Weiterhin wurde das Kriterium nach Gleichung (3) berechnet.

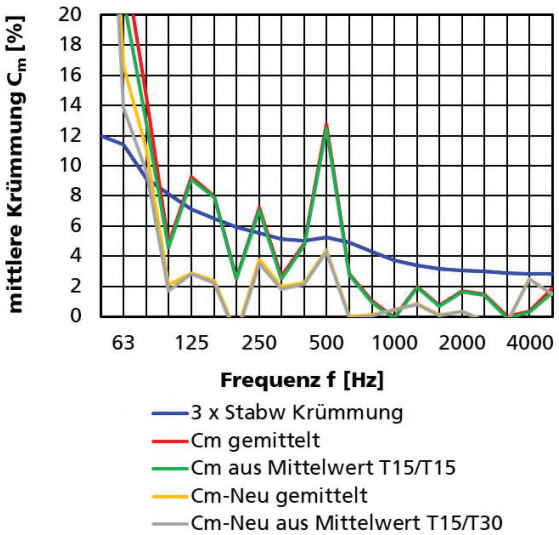

Abbildung 3: Gemessene mittlere Krümmung der Abklingkurven im leeren Hallraum, Messung nach DIN EN ISO 354 [1]. Gemittelte Krümmung C_m (rot), berechnete Krümmung aus gemittelten Nachhallzeiten (grün) und $C_{m,neu}$ gemittelt (gelb) sowie aus gemittelten Nachhallzeiten berechnet (grau) und Kriterium nach (3) (blau).

Die Ergebnisse in Abbildung 3 zeigen für die beiden Mittelungsverfahren sehr ähnliche Werte, so dass sie praktisch als gleichwertig betrachtet werden können. Die Krümmung C_m zeigt bei 500 Hz eine ausgeprägte Spitze mit Werten von ca. 12 %, die deutlich über denen des Vergleichskriteriums nach Gleichung (3) liegt.

Bei tieferen Frequenzen, z.B. bei 125, 160 und 250 Hz, wird das Kriterium etwas überschritten, bei Frequenzen unter 100 Hz liegen die Werte ebenfalls deutlich darüber. Interessant ist, dass die Größe $C_{m,neu}$ in ihrem Verlauf eine ähnliche Signatur aufweist wie C_m, die Werte jedoch deutlich niedriger liegen, so dass im Frequenzbereich von 100 bis 5 kHz das Kriterium nicht überschritten wird.

Als nächstes wurde die Messung des leeren Hallraums ausgewertet, bei der die Mikrofonpositionen beibehalten wurden, jedoch sich die drei Lautsprecherpositionen jeweils in den unteren Raumecken des Hallraums befanden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 gezeigt. Auch hier ergeben die beiden Mittelungsverfahren sehr ähnliche Werte. Der hohe Wert der Krümmung bei 500 Hz verschwindet jedoch fast vollständig und liegt nun deutlich unter dem Kriterium nach Gleichung (3). Jedoch liegen die Werte der Krümmung C_m unter 250 Hz mit Werten von ca. 14 % deutlich über dem Bewertungskriterium. Unter 100 Hz sind die Krümmungen ähnlich hoch wie zuvor.

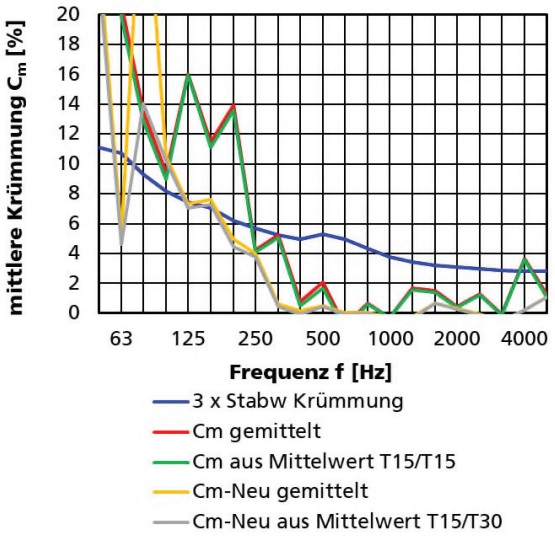

Abbildung 4: Gemessene mittlere Krümmung der Abklingkurven im leeren Hallraum. Messung modifiziert mit Lautsprecher in Raumecken. Gemittelte Krümmung C_m (rot), aus gemittelten Nachhallzeiten berechnet (grün), $C_{m,neu}$ gemittelt (gelb), aus gemittelten Nachhallzeiten berechnet (grau) und Kriterium nach (3) (blau).

Wird nun der Hallraum modifiziert, d.h. mit den zuvor beschriebenen VPR-Absorbern in einer Raumecke ausgestattet, um die geforderte Mindestabsorption bei den tiefen Frequenzen zu erreichen, ergeben sich für den leeren Hallraum, gemessen nach dem Entwurf der ISO 354 [2], die Ergebnisse in Abbildung 5.

Mit dieser Modifikation ergibt sich bei 500 Hz wiederum eine etwas höhere Krümmung, jedoch liegen die Werte noch im Bereich des Kriteriums nach (3). Bei 125 und 200 Hz ist die Krümmung etwas geringer als zuvor, bei 160 Hz bleibt sie mit Werten von ca. 12 % ähnlich. Die geringfügige Erhöhung der äquivalenten Absorptionsfläche bei tiefen Frequenzen hat nur einen geringen Einfluss auf die festgestellte Krümmung der Abklingkurven.

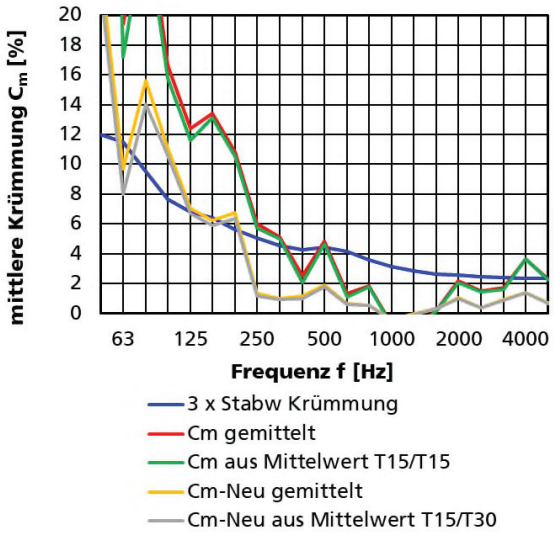

Abbildung 5: Gemessene mittlere Krümmung der Abklingkurven im leeren Hallraum. Messung nach dem Entwurf der ISO 354 [2]. Gemittelte Krümmung C_m (rot), aus gemittelten Nachhallzeiten berechnet (grün), $C_{m,neu}$ gemittelt (gelb), aus gemittelten Nachhallzeiten berechnet (grau) und Kriterium nach (3) (blau).

Krümmung der Nachhallkurven im Raum mit Absorbern

Im Ringversuch wurden sowohl dünnere poröse Absorber mit 50 mm Dicke als auch verschiedene Absorber mit 200 mm Dicke gemessen. Die Krümmung wurde für die Messung nach dem Entwurf der ISO 354 [2] für 50 mm Polyestervlies ausgewertet und ist in Abbildung 6 gezeigt.

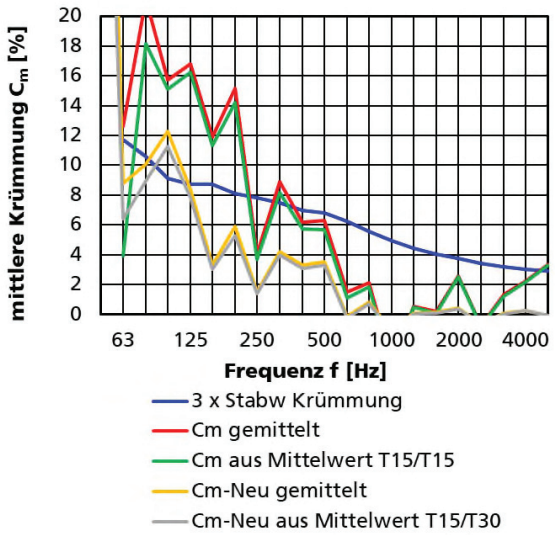

Abbildung 6: Gemessene mittlere Krümmung der Abklingkurven im Hallraum mit 50 mm Polyestervlies, Messung nach dem Entwurf der ISO 354 [2]. Gemittelte

Krümmung C_m (rot), aus gemittelten Nachhallzeiten berechnet (grün), $C_{m,neu}$ gemittelt (gelb), aus gemittelten Nachhallzeiten berechnet (grau) und Kriterium nach (3) (blau).

Auch wenn bei der Messung mit Absorber die Nachhallzeit kürzer und die theoretische Standardabweichung sowie das Vergleichskriterium nach (3) ansteigt, wird unter 250 Hz das Kriterium von C_m deutlich überschritten. In diesem Frequenzbereich erreicht der Absorber Schallabsorptionsgrade von ca. 0,5 (bei 200 Hz). Betrachtet man die Messung mit 200 mm dickem Polyestervlies, so ergibt sich die Krümmung wie gezeigt in Abbildung 7.

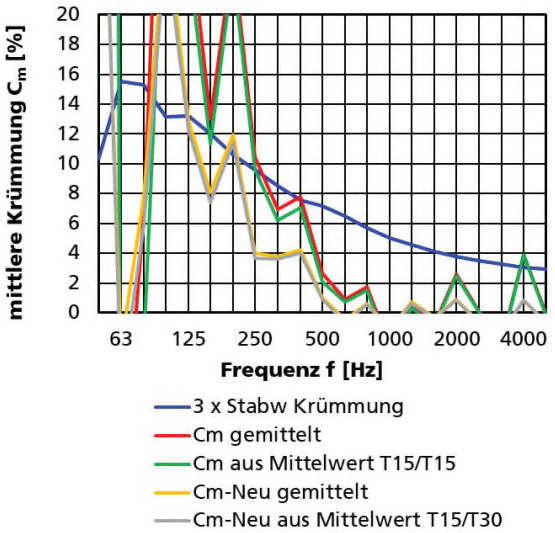

Abbildung 7: Gemessene mittlere Krümmung der Abklingkurven im Hallraum mit 200 mm Polyestervlies, Messung nach dem Entwurf der ISO 354 [2]. Gemittelte Krümmung C_m (rot), aus gemittelten Nachhallzeiten berechnet (grün), $C_{m,neu}$ gemittelt (gelb), aus gemittelten Nachhallzeiten berechnet (grau) und Kriterium nach (3) (blau).

Bei der Messung mit 200 mm dickem Polyestervlies, bei dem der gemessene Schallabsorptionsgrad bei 125 Hz schon bei 1,0 liegt, erreicht die Krümmung unterhalb von 250 Hz Werte deutlich über dem Kriterium nach (3) und zum Teil Werte von über 20 %. Dagegen zeigt die Größe $C_{m,neu}$ auch bei den Messungen mit Absorbern Werte, die (mit Ausnahme bei 100 Hz) noch im Bereich oder unter dem Bewertungskriterium nach (3) liegen. Weiterhin ist interessant, dass auch bei hohen Frequenzen von 3150 bis 5000 Hz die Krümmung bei allen Messungen etwas ansteigt, jedoch wird hier bei allen Messungen das Bewertungskriterium von C_m nicht wesentlich überschritten.

Zusammenfassung

Der Hallraum des IBP in Stuttgart ist ein relativ großer Hallraum, der mit schräg gestellten Wänden und Decke, einer großen Anzahl von Diffusoren und damit einem angemessenen Verhältnis von Diffusor- zu Raumoberfläche von 17 % ausgestattet ist. Mit der Ausrüstung des Hallraums mit 3 VPR-Absorbern liegt er im Bereich der äquivalenten Absorptionsfläche, der im Entwurf der ISO 354 [2] vorgesehen ist.

Die Messergebnisse der Krümmung der Abklingkurven, die in Anhang A.6 des Entwurfs definiert ist und wo ein Vergleichskriterium aus der theoretisch hergeleiteten Standardabweichung der Krümmung angegeben ist, zeigen, dass im leeren Hallraum tieffrequent unter ca. 250 Hz das Vergleichskriterium überschritten wird. Auch bei der Messung mit Schallabsorbern im Raum wird das Kriterium im ähnlichen Frequenzbereich überschritten, dies jedoch deutlicher, wenn die Dicke des Absorbers und damit die Schallabsorption bei den tiefen Frequenzen höher ist.

Das vorgeschlagene Kriterium für die Krümmung, errechnet aus den in der Regel von der Messtechnik bereitgestellten Werten T15 und T30, hat einen ähnlichen Verlauf wie das im Entwurf genannte Kriterium C_m, ergibt aber geringere Werte und liegt bei allen Messungen im Bereich des Vergleichskriteriums nach (3), jedoch sprechen theoretische Gründe gegen diesen direkten Vergleich.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das vorgeschlagene Kriterium in weiteren Hallräumen untersucht werden sollte und auch geklärt werden muss, mit welchen Maßnahmen in Hallräumen das Kriterium gegebenenfalls eingehalten werden kann. Das könnte z.B. der Einsatz von mehr Diffusoren oder auch von größeren Diffusoren sein, so dass das Schallfeld bei tiefen Frequenzen diffuser gestaltet werden kann. Die notwendigen Maßnahmen müssen jedoch noch gefunden und getestet werden, bevor ein solches Kriterium bindend in die Normung mit aufgenommen werden kann. Weiter sollte geklärt werden, ob in entsprechend konditionierten Räumen die Vergleichsstandardabweichung der Messergebnisse geringer wird.

Literatur

[1] DIN EN ISO 354:2003 Akustik – Messung der Schallabsorption im Hallraum. Beuth Verlag Berlin.

[2] ISO 354:2019(E). Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room. ISO/TC 43/SC 2/WG 35 N61 – ISO CD 354_Draft20200902, ISO, Geneva, Switzerland

[3] J.L Davy, The variance of Decay Rates at Low Frequencies, Applied Acoustics 23 (1988).

[4] DIRAC Version 6.0.6165.785 Bruel & Kjær

[5] SAMURAI Version 3.0.2 Software für Soundbook (MK2_8L G), Sinus Messtechnik.