

Die Messunsicherheit des Klarheitsmaßes bei raumakustischen Messungen

David Kliesch¹, Ingo Witew², Michael Vorländer³

¹Institut für Technische Akustik, 52072 Aachen, Deutschland, Email: david.kliesch@rwth-aachen.de

²Institut für Technische Akustik, 52072 Aachen, Deutschland, Email: iwi@akustik.rwth-aachen.de

³Institut für Technische Akustik, 52072 Aachen, Deutschland, Email: mvo@akustik.rwth-aachen.de

Zusammenfassung

Die Unsicherheit von Impulsantworten kann für den verwendeten Messaufbau und für die verwendete Messtechnik bestimmt werden. Diese Unsicherheit kann bei der Berechnung raumakustischer Parameter Einfluss auf das Resultat nehmen. Am Beispiel des Klarheitsmaßes kann so die Fortpflanzung der Unsicherheit der Impulsantwort bis hin zu der Gesamtunsicherheit des Parameters verfolgt werden.

Eine abklingende Raumimpulsantwort (RIR) fällt ab einem bestimmten Zeitpunkt unter das Hintergrundrauschen und kann dort nicht mehr ausgewertet werden. Um möglichst exakte Resultate zu erzielen, wird die verdeckte Restenergie der Impulsantwort durch einen Korrekturterm nach Lundeby et al. [3] approximiert, und die Berechnung des Klarheitsmaßes um diesen ergänzt.

Neben der Unsicherheitsdiskussion der Parameterberechnung muss dementsprechend auch eine Unsicherheitsdiskussion des Korrekturterms durchgeführt werden. Eine Kombination beider Ergebnisse liefert die Gesamtunsicherheit des Klarheitsmaßes. Diese Unsicherheit wird im Folgenden für eine Messung bestimmt.

Einleitung

Der "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements" (GUM) [1] wurde verfasst, um einen generellen Satz Regeln zu etablieren, wie Unsicherheiten in Messungen zu evaluieren sind. Soll die Unsicherheitsfortpflanzung von Eingangsgrößen zu einer Ausgangsgröße evaluiert werden, muss eine Modellfunktion hergeleitet werden. Dazu werden zunächst die Ausgangsgrößen und alle Eingangsgrößen, die sich auf die Ausgangsgröße auswirken, bestimmt. Im Folgenden wird versucht eine Modellfunktion, die alle Größen miteinander verknüpft, entweder empirisch oder mathematisch herzuleiten. Basierend auf dem Wissen über die Eingangsgrößen werden diesen Eingangsgrößen Unsicherheitsverteilungen wie z.B. Normalverteilungen zugeordnet. Typischerweise werden nach Gleichung 1 Modellfunktionen gewählt, die nur eine Ausgangsgröße Y_1 aber eine Vielzahl von Eingangsgrößen X_1, \dots, X_n haben können. Der GUM bietet aber auch Ansätze für Modellfunktionen mit mehreren Ausgangsgrößen.

$$Y = f(X_1, \dots, X_n) \quad (1)$$

Als Startpunkt der Überlegung wird von einer realistischen Messung ausgegangen, die im Ergebnis eine unsicherheitsbehaftete Raumimpulsantwort (RIR) ergibt. Zahlreiche relevante Einflüsse auf eine Messung (z.B.

Symbol - K_i	Unsicherheitsanteil
K_{Filter}	0.41dB
$K_{LS-Level}$	0.4dB
$K_{LS-Directivity}$	0.35dB
$K_{LS-Spektrum}$	0.31dB
K_{LTI}	0.2dB
$K_{Mic-Spektrum}$	0.15dB
$K_{Mic-Calibration}$	0.14dB
$K_{Meteo-Pressure}$	0.07dB
$K_{Mic-Directivity}$	0.07dB
$K_{Mic-Field}$	0.011dB

Tabelle 1: Anteile verschiedener, durch die Messung verursachter, Unsicherheiten an der Gesamtunsicherheit der Raumimpulsantworten.

Kalibrierung, Sender- und Empfängerrichtcharakteristik, Störung des Schallfelds durch den Messaufbau) führen zu einer Unsicherheit in der Impulsantwort, die auf den logarithmischen Maßstab bezogen zu einer konstanten Unsicherheit über die laufende Zeit führt. In Tabelle 1 sind verschiedene relevante Einflüsse auf die Gesamtunsicherheit der Impulsantworten in dB gelistet, die von Witew et al. ermittelt wurden [5].

Aus den unsicheren Impulsantworten können raumakustische Parameter abgeleitet werden. Diese Einzelwerte sind aufgrund der unsicheren Impulsantworten, oder genauer der unsicheren Samples, ebenfalls unsicher. Als Ausgangsgröße Y_i kann der zu bestimmende Parameter gewählt werden, als Eingangsgröße die unsicherheitsbehafteten Samples der RIRs X_1, \dots, X_n .

Basierend auf dem GUM lässt sich die Fortpflanzung der Unsicherheit durch Formel 2 bestimmen. Die Modellfunktion f wird nach jeder unsicheren Eingangsgröße x_i abgeleitet, quadriert und mit der quadrierten Unsicherheit, also der Varianz, multipliziert. Im Bezug auf unsichere Raumimpulsantworten repräsentieren die x_i die unsicheren Samples, die mit der Varianz einer Wahrscheinlichkeitsverteilung $u^2(x_i)$ behaftet sind.

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2)$$

Das Klarheitsmaß ist eine Kenngröße zur Einordnung der Sprachverständlichkeit. Es setzt die am Messpunkt bis zu einem Zeitpunkt t_e eintreffende Schallenergie, beschrieben durch die quadrierte Impulsantwort $h(t)$, ins

Verhältnis zur später eintreffenden Energie, bewertet dieses Verhältnis logarithmisch und gibt es in Dezibel an. Die Definition des Klarheitsmaßes nach der ISO Norm 3382-2 [2] kann als zugrunde liegende Modellfunktion f verwendet werden und wird durch Formel 3 beschrieben.

$$C_{t_e} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{t_e} h(t)^2 dt}{\int_{t_e}^{\infty} h(t)^2 dt} \right) \quad (3)$$

Methodik

Mit Formel 3 lässt sich das Klarheitsmaß bestimmen, es müssen aber Transformationen vorgenommen werden, um die Formel an die quantisierten Impulsantworten anzupassen. Die zur Berechnung verwendeten Impulsantworten sind zeitdiskret und die Modellfunktion muss dementsprechend angepasst werden. Die Integrale werden durch Summen ersetzt und die Grenze zwischen früher und später Impulsantwort an die Samples angepasst.

$$C_{s_e} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{s=1}^{s_e} h(s)^2}{\sum_{s=s_e+1}^{\infty} h(s)^2} \right) \quad (4)$$

Die Modellfunktion wird basierend auf dem GUM nach jedem unsicheren Element abgeleitet und mit der zugehörigen Unsicherheit multipliziert. Im Falle des Klarheitsmaßes entspricht dies genau einer Ableitung pro Sample der Impulsantwort und lässt sich wie in Formel 5 darstellen, wobei s die einzelnen Samples repräsentiert.

$$u^2(y) = \left(\sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{\partial C_{s_e}}{\partial s_i} \right)^2 u^2(s_i) \right) \quad (5)$$

An dieser Stelle ist es erforderlich eine weitere Transformation vorzunehmen. Formel 4 basiert auf einer linearen Skalierung der Impulsantwort, so dass die Unsicherheit der Samples abhängig von deren Amplitude ist. Nach Tabelle 1 ist die Unsicherheit der RIR-Samples nur in der logarithmischen Skala bekannt, so dass Gleichung 4 nach Gleichung 6 für Raumimpulsantworten in Dezibel angepasst wird.

$$C_{s_e} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{s=1}^{s_e} 10^{0.2|h(s)|}}{\sum_{s=s_e+1}^{\infty} 10^{0.2|h(s)|}} \right) \quad (6)$$

Für die Berechnung der Unsicherheit des Klarheitsmaßes muss die Modellfunktion nach Formel 6 zu jedem Sample der Impulsantwort $h(s)$ abgeleitet werden. Es lässt sich ausnutzen, dass alle partiellen Ableitungen der Variablen in der Zählersumme sowie alle partiellen Ableitungen der Variablen in der Nennersumme zu ähnlichen Ableitungen führen. Wird weiterhin ausgenutzt, dass jede partielle Ableitung in der logarithmischen Skala mit derselben Unsicherheit multipliziert wird, können alle partiellen Ableitungen nach Formel 9 zusammengefasst werden. Dabei ist $u_{1,s_{t_e}}^2(C_{s_e})$ (Formel 7) die kombinierte Unsicherheit der Nennersumme, dem frühen Teil der Raumimpulsantwort, und $u_{s_{t_e},s_{cp}}^2(C_{s_e})$ (Formel 8) die kombinierte Unsicherheit der Zählersumme, dem späten Teil der RIR. Die

Addition beider Teilergebnisse liefert im Folgenden die Unsicherheit des Klarheitsmaßes.

$$u_{1,s_{t_e}}^2(C_{s_e}) = 4 \frac{\sum_{n=1}^{s_{t_e}} 10^{0.4|s_n|}}{\left(\sum_{n=1}^{s_{t_e}} 10^{0.2|s_n|} \right)^2} u^2(s) \quad (7)$$

$$u_{s_{t_e},s_{cp}}^2(C_{s_e}) = 4 \frac{\sum_{n=s_{t_e}+1}^{s_{cp}} 10^{0.4|s_n|}}{\left(\sum_{n=s_{t_e}+1}^{s_{cp}} 10^{0.2|s_n|} \right)^2} u^2(s) \quad (8)$$

$$u_C(C_{s_e}) = \sqrt{u_{1,s_{t_e}}^2(C_{s_e}) + u_{s_{t_e},s_{cp}}^2(C_{s_e})} \quad (9)$$

Die Summe im Nenner wird ausgewertet, bis das Ende der Impulsantwort erreicht ist. Hier wird allerdings nicht berücksichtigt, dass die Impulsantwort von einem Grundrauschen teilweise überdeckt wird.

Nach dem Vorschlag von Lundebjerg et al. [3] kann die RIR ab einem zu ermittelnden Zeitpunkt abgeschnitten und eine Kompensationsenergie E_{comp} eingeführt werden, um die fehlende Signalrestenergie abzuschätzen. Entscheidend für einen validen Korrekturterm ist der genaue Zeitpunkt, oder im diskreten Fall das exakte Sample, in dem die Raumimpulsantwort von dem Grundrauschen überschattet wird. Der iterative Algorithmus zur Bestimmung des Übergang-Samples zwischen Signal- und Rauschenergie kann grob in drei Schritten zusammengefasst werden. Zunächst wird durch eine Mittelung der letzten 10% der Raumimpulsantwort der Rauschpegel geschätzt. Im zweiten Schritt wird der abklingende Teil der Raumimpulsantwort durch eine lineare Regression angenähert und im dritten Schritt wird ein Schnittpunkt zwischen der gefundenen linearen Annäherung und dem Rauschpegel ermittelt. Diese drei Schritte werden wiederholt, wobei der Rauschpegel sowie die lineare Regression, basierend auf dem zuletzt gefundenen Schnittpunkt, aktualisiert werden, bis der Schnittpunkt konvergiert.

Ist der Schnittpunkt zwischen Signal- und Rauschenergie bekannt, kann die Restenergie E_{comp} über ein Integral vom Schnittpunkt s_{cp} bis Unendlich mit einer exponentiell abklingenden Funktion nach Formel 10 angenähert werden.

$$E_{comp} = \int_{s_{cp}}^{\infty} B e^{As} ds = -\frac{B}{A} e^{As_{cp}} \quad (10)$$

Eine exponentiell abklingende Funktion, zu sehen im Integral in Gleichung 10, ist generell abhängig von zwei noch zu bestimmenden Parametern A und B , wobei B nach Gleichung 10 den Skalierungsfaktor der Funktion bildet. A hingegen definiert die Geschwindigkeit des exponentiellen Abfalls. Die Parameter werden aus der linearen Annäherung der späten Raumimpulsantwort ermittelt, in der das Schallfeld diffus bestimmt ist. Zur Bestimmung werden zwei Grenzbedingungen verwendet. Zum Start der Impulsantwort hat die Regression den Wert des Y-Achsen-Abschnitts. Setzt man $s = 0$ in Gleichung 10, so ergibt sich für B der Wert des Y-Achsen-Abschnitts. A lässt sich ermitteln, indem für s die Position und der zugehörige Wert des gefundenen Schnittpunkts eingesetzt werden.

Der gesamte iterative Prozess muss im Bezug auf die Unsicherheitsdiskussion untersucht werden. Ziel ist es, die Unsicherheit der Kompensationsenergie zu bestimmen, die von den unsicheren Eingangsgrößen A , B und s_{cp} abhängt. Die Unsicherheitsfortpflanzung des Parameters s_{cp} beschränkt sich im wesentlichen auf drei Schritte. Für den ersten Schritt wird die Rauschenergie L_n der Impulsantwort gemittelt. Die zugehörige Unsicherheitsfortpflanzung für ein Intervall der Länge k wird unter Berücksichtigung des GUMs (Formel 2) nach Formel 11 ermittelt. Eine Mittelung über eine Anzahl k unsicherer Samples reduziert demnach die Unsicherheit um den Faktor k .

$$L_n = \frac{1}{k} \sum_{i=n}^{n+k} s_i$$

$$u^2(L_n) = \frac{1}{k} \cdot u^2(s) \quad (11)$$

Nach Schritt 2 wird durch die lineare Regression aus den unsicheren Samples die unsichere Steigung $u^2(m)$ und der unsichere Y-Achsen-Abschnitt $u^2(b)$ der linearen Annäherung an die abklingende Impulsantwort gewonnen. Zunächst wird die Unsicherheit der Steigung m bestimmt. Die allgemeine Formel zur Bestimmung einer linearen Regression ist im ersten Teil von Formel 12 dargestellt. Die Geradengleichung wird so bestimmt, dass der quadratische Abstand aller Punkte zur zu bestimmenden Geraden minimal ist. Der Beitrag der Unsicherheit eines Samples $u^2(y_{s,j})$ zur Gesamtunsicherheit $u^2(m)$ ist in Formel 12 aufgezeigt und muss für jedes Sample, das zur Regression beiträgt, wiederholt werden. Die Werte s_i repräsentieren die Sample-Position und können als nicht unsicher angenommen werden, während die unsicheren $y_{s,i}$ die zur Sample-Positionen s_i ermittelten Amplituden repräsentieren.

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s}) \cdot (y_{s,i} - \bar{y}_s)}{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}$$

$$u_j^2(m) = \left(\frac{\partial m}{\partial y_{s,j}} \right)^2 u^2(y_{s,j})$$

$$= \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2} \cdot \left(\frac{n-1}{n} s_k - (\bar{s} - \frac{s_k}{n}) \right) \right)^2 u^2(y_{s,j}) \quad (12)$$

Die Unsicherheit des Y-Achsen-Abschnitts b kann im Folgenden mit der zuvor bestimmten Unsicherheit der Steigung m nach Formel 13 bestimmt werden.

$$b = \bar{y}_s - m \cdot \bar{s}$$

$$u^2(b) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n u^2(y_{s,i}) + \bar{s}^2 u(m)^2 \quad (13)$$

Zuletzt kann der Schnittpunkt zwischen dem ermittelten Rauschpegel und der linearen Regression nach Gleichung 14 errechnet werden.

$$s_{cp} = \frac{L_n - b}{m}$$

$$u^2(s_{cp}) = \frac{1}{m^2} (u^2(L_n) + u^2(b)) + \frac{(b - L_n)^2}{m^4} u^2(m) \quad (14)$$

Die Unsicherheiten der Parameter A und B , die zur Berechnung der Kompensationsenergie benötigt werden, können aus den Randbedingungen der späten linearen Regression bestimmt werden und hängen von den zuvor bestimmten Unsicherheiten der Parameter m und b der Regression ab. Der Parameter B wurde durch die Randbedingung $s = 0$ gewonnen und muss demzufolge dieselbe Unsicherheit wie der Y-Achsen-Abschnitt b haben, sodass $u(B) = u(b)$ nach Gleichung 13 gilt. Die Unsicherheit des Parameters A wird nach Formel 15 bestimmt und wird erneut durch eine Superposition mehrerer unsicherer Eingangsgrößen ermittelt.

$$A = \frac{\ln(\frac{C}{B})}{s_{cp}} \quad \text{mit} \quad C = m s_{cp} + b$$

$$u(A)^2 = \left(\frac{1}{C s_{cp}} \right)^2 u^2(C) + \left(\frac{1}{B s_{cp}} \right)^2 u^2(B)$$

$$+ \left(\frac{\ln(\frac{C}{B})}{s_{cp}^2} \right)^2 u^2(s_{cp}) \quad (15)$$

Zuletzt sind alle benötigten Unsicherheiten bekannt und die komplette Unsicherheitsfortpflanzung der Kompensationsenergie kann nach Formel 16 bestimmt werden.

$$u^2(E_{comp}) = \left(\frac{1}{A^2} u^2(B) + B^2 u^2(s_{cp}) \right)$$

$$+ \left(\frac{B}{A^2} - \frac{B s_{cp}}{A} \right)^2 u^2(A) e^{2A s_{cp}} \quad (16)$$

Das Klarheitsmaß nach Formel 4 kann durch die unsicherheitsbehaftete Kompensationsenergie ergänzt werden. Die finale Modellfunktion, die im Bezug auf die Unsicherheit der einzelnen Elemente evaluiert werden muss, zeigt Formel 17. Anstelle der unendlichen Summe wird die Energie der Impulsantwort nur bis zum gefundenen Schnittpunkt s_{cp} evaluiert und die restliche Energie durch die gefundene Kompensation E_{comp} abgeschätzt.

$$C_{t_e} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{s=1}^{s_{t_e}} h(s)^2}{\left(\sum_{s=s_{cp}}^{s_{t_e}+1} h(s)^2 \right) + E_{comp}} \right) \quad (17)$$

Nach GUM muss die nun finale Modellfunktion nach jedem unsicheren Element abgeleitet und mit der zugehörigen Unsicherheit multipliziert werden. Im Falle der aktualisierten Klarheitsmaß-Formel sind das weiterhin die Samples 1 bis s_{cp} und gesondert die Kompensationsenergie E_{comp} .

$$u^2(C_{t_e}) = \left(\sum_{i=1}^{s_{cp}} \left(\frac{\delta C_{t_e}}{\delta x_i} \right)^2 \right) u^2(s) + \left(\frac{\delta C_{t_e}}{\delta E_{comp}} \right)^2 u^2(E_{comp}) \quad (18)$$

Wiederum kann ausgenutzt werden, dass die partiellen Ableitungen nach den Summanden im Zähler und Nenner zusammengefasst werden können. Die zusätzliche Ableitung nach der Kompensationsenergie kann für sich allein stehen betrachtet werden.

Werden alle Ableitungen passend zusammengefasst, erhält man für die Gesamtunsicherheit das Resultat nach

Gleichung 22. E_{comp} verändert die Resultate aller partiellen Ableitungen des Nenners und erhält mit $u_{E_{comp}}^2$ einen Anteil an der Gesamtunsicherheit. Die Gesamtunsicherheit $u(C_{t_e})$ des Klarheitsmaßes wird aus $u_{1,s_{t_e}}$ (Formel 19) $u_{s_{t_e},s_{cp}}^2$ (Formel 20) und $u_{E_{comp}}$ (Formel 21) zusammengesetzt. So kann die komplette Fortpflanzung der Unsicherheit der einzelnen Samples bis hin zur Unsicherheit des Klarheitsmaßes, unter Berücksichtigung des Korrekturterms, bestimmt werden.

$$u_{1,s_{t_e}}^2 = 4 \frac{\sum_{n=1}^{s_{t_e}} 10^{0.4|x_n|}}{(\sum_{n=1}^{s_{t_e}} 10^{0.2|x_n|})^2} u^2(s) \quad (19)$$

$$u_{s_{t_e},s_{cp}}^2 = 4 \frac{\sum_{n=s_{t_e}+1}^{s_{cp}} 10^{0.4|x_n|}}{((\sum_{n=s_{t_e}+1}^{s_{cp}} 10^{0.2|x_n|}) + E_{comp})^2} u^2(s) \quad (20)$$

$$u_{E_{comp}}^2 = \left(\frac{10/\ln(10)}{(\sum_{i=s_{t_e}+1}^{s_{cp}} 10^{0.2|x_i|}) + E_{comp}} \right)^2 u^2(E_{comp}) \quad (21)$$

$$u(C_{t_e}) = \sqrt{u_{1,s_{t_e}}^2 + u_{s_{t_e},s_{cp}}^2 + u_{E_{comp}}^2} \quad (22)$$

Ergebnisse

Nach Formel 22 wird die Unsicherheit des Klarheitsmaßes aus drei Anteilen zusammengesetzt. Wesentlich für die Gesamtunsicherheit sind die Anteile der frühen Raumimpulsantwort $u_{1,s_{t_e}}^2$ (19) und der späten Raumimpulsantwort $u_{s_{t_e},s_{cp}}^2$ (20), da der Anteil der Kompensationsunsicherheit vergleichsweise gering ist.

Die Unsicherheit der Kompensation $u^2(E_{comp})$ hängt von der Unsicherheit des Schnittpunktes s_{cp} und den Unsicherheiten der Parameter A und B ab. Diese Unsicherheiten hängen maßgeblich von den Unsicherheiten der Parameter m und b der Regression ab. Die Regression selbst kann als Mittelwertbildung über eine große Anzahl an Intervallen angesehen werden, wodurch nach Formel 11 die resultierende Unsicherheit stark reduziert wird. Folglich hat m sowie b als direkte Folge von m , eine geringe Unsicherheit, wodurch letzten Endes die Unsicherheit der Kompensation deutlich geringer ist, als die deutlich größeren Unsicherheiten $u_{1,s_{t_e}}^2$ und $u_{s_{t_e},s_{cp}}^2$, die insbesondere von den Unsicherheiten der einzelnen Samples abhängen.

In Abbildung 1 wird ein Bezug zwischen Messungen des Klarheitsmaßes C_{80} in verschiedenen Räumen und der zugehörigen Unsicherheit dargestellt. Wird unter Berücksichtigung von Tabelle 1 die Unsicherheit der Samples ausgewertet, so haben nur die sampleweise unkorrelierten Beiträge für das Klarheitsmaß eine Relevanz. Beiträge wie der Oktavbandfilter K_{Filter} beeinflussen jedes Sample in gleicher Weise und haben daher keinen Einfluss für die Unsicherheitsberechnung des Klarheitsmaßes. Für hochwertige Messtechnik kann so eine Unsicherheit von 0.5dB für jedes Sample bestimmt werden. In Abbildung 1 deckt das Klarheitsmaß einen Wertebereich von -5dB bis 12dB ab und die Unsicherheiten variieren

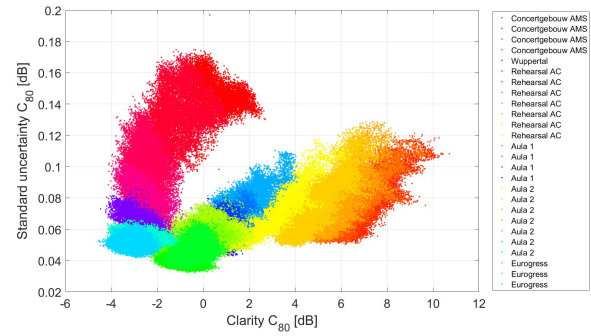


Abbildung 1: Streudiagramm von Klarheitsmaß Messungen in verschiedenen Räumen und zugehörigen Unsicherheiten.

unter diesen Bedingungen zwischen 0.04dB und 0.18dB. Auffällig sind die höheren Unsicherheiten des Konzertgebäudes in Amsterdam, die durch individuelle, durch die Geometrie verursachte, zusätzliche Reflexionen hoher Amplitude verursacht werden.

In [4] wird die minimale Wahrnehmungsschwelle, die JND (just noticeable difference), für das Klarheitsmaß diskutiert. Als Schwellen, sodass eine Veränderung gerade wahrgenommen werden kann, werden 3dB für C_{80} und 2.5dB für C_{50} bestimmt. Vergleicht man diese Werte mit Abbildung 1 zeigt sich, dass die Unsicherheiten des Klarheitsmaßes in verschiedenen Messungen nur selten an Werte von 0.2dB heranreichen. Die Unsicherheit des Klarheitsmaßes liegt demnach noch weit unter den von R. Höhne und G. Schroth gefundenen JND's und wird auch durch seltene Ausreißer nicht überschritten. Wird allerdings von höheren Unsicherheiten der einzelnen Samples, verursacht durch einen veränderten Messaufbau oder Messequipment, ausgegangen, können die ermittelten Unsicherheiten ansteigen.

Literatur

- [1] Joint Committee for Guides in Metrology JCGM-100:2008.: Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008.
- [2] International Organization for Standardization ISO-3382-1.: Acoustics - measurement of room acoustic parameters - part 1: Performance spaces. EN ISO 3382- 1:2009, 2009.
- [3] A. Lundeby, T. E. Vigran, H. Bietz, and M. Vorländer.: Uncertainties of measurements in room acoustics. *Acustica*, 81(4):344-355, 1995.
- [4] R. Höhne, G. Schroth.: Zur Wahrnehmbarkeit von Deutlichkeits- und Durchsichtigkeitsunterschieden in Zuhörersälen. *Acustica*, 81: 309-319, 1995
- [5] I. Witew and M. Vorländer.: The uncertainty of room impulse response measurements. ICA – Aachen, 2019.