

Die Bestimmung der Messunsicherheit von akustischen Prüfprozessen

Erfüllen der Vorgaben von VDA, DGQ und DIN

**Prof. Dr.-Ing. Benno Kotterba,
DGaQs e.V., Karlsruhe
md-pro GmbH, Karlsruhe**

1 Einleitung

Die internationale Normung rückt die Messunsicherheit als eine wesentliche Größe zur Kennzeichnung der Qualität von Mess- und Prüfprozessen in den Vordergrund. Aktuelle Richtlinien und Normen wie z.B. DIN EN ISO 9001:2000 und ISO TS 16949 fordern geeignete Prozesse zum Nachweis der Konformität von Produkten mit den Qualitätsforderungen.

Die aktuellen Richtlinien wie z.B. VDA 5 und DGQ 13-61 setzen die Messunsicherheit voraus und leiten daraus den Nachweis der Prüfmittelverwendbarkeit und der Prüfprozesseignung ab. Der Benutzer muss sich von der Verwendbarkeit der eingesetzten Mess- und Prüfmittel und der Eignung der Mess- und Prüfprozesse überzeugen und deswegen den Verwendbarkeits- und Eignungsnachweis führen.

Produkte, die vereinbarte akustische Qualitätskriterien erfüllen müssen, werden durch Hörbeurteilung oder messtechnische Analyse hinsichtlich der Konformität geprüft. Wir haben es also mit einer attributiven Prüfung durch Prüfer oder mit einer messtechnischen Analyse und instrumentellen Qualitätsentscheidung zu tun. Die der Konformitätsaussage zu Grunde liegenden Messprozesse müssen die Bedingung der Eignung erfüllen. Da bedeutet, dass die Messunsicherheit bekannt und mit den jeweiligen Forderungen an die Qualität der Produkte vereinbar ist.

Es ist aber nicht alleine die Notwendigkeit, dem anerkannten Stand der Technik zu genügen und damit im Streitfall eingesetzten Gutachtern die erforderlichen Nachweise unterbreiten zu können, sondern es muss auch im Interesse des Herstellers liegen, die Entscheidungssicherheit seiner Konformitätsnachweise zu kennen. Das setzt die Kenntnis der Messunsicherheit voraus.

Grundsätzlich kann die Messunsicherheit nur für Messwertanzeigende Mess- und Prüfprozesse bestimmt werden. Die attributive Qualitätsbeurteilung erzeugt Ordnungszahlen z.B. im Sinne der Schulnoten. Diese Urteile können für statistische Betrachtungen nur bedingt herangezogen werden, da sie nicht unmittelbar auf Normale noch auf standardisierte Messgrößen zurückgeführt werden können.

Alle messenden und mit Qualitätsvorgaben vergleichenden Prozesse müssen bei der Entscheidung über die Konformität des Produktes die Messunsicherheit einbeziehen. Für geometrische Größen ist diese Forderung in der DIN EN ISO 14253 beschrieben. Für akustische Messgrößen existiert eine solche Forderung heute nicht. Dennoch ist es sinnvoll, sich über die Messunsicherheit und damit über die Entscheidungssicherheit der Prüfprozesse zu vergewissern.

2 Messunsicherheit

Jedem Messwert ist eine Messunsicherheit beizuordnen. Geht man davon aus, dass die Messwerte zufällig um den Erwartungswert variieren, so kennt man von dieser Abweichung weder den Betrag noch das Vorzeichen.

Nach der Vornorm DIN V ENV 13005 gilt:

Im Allgemeinen ist das Messergebnis lediglich eine Näherung oder ein Schätzwert des Wertes der Messgröße und somit nur dann vollständig, wenn es von einer Angabe der Messunsicherheit dieses Schätzwertes begleitet wird.

Die Unsicherheit eines Messergebnisses spiegelt die unzureichende Kenntnis des Wertes der Messgröße wider.

Diese Aussage tangiert die Messung und Prüfung der Produkte, denn die Eigenschaften (Merkmale) eines Produktes werden i.d.R. durch eine einzelne Messung erfasst und mit den Forderungen (z.B. Toleranzen) verglichen, um eine Entscheidung über die Erfüllung der Forderungen und damit die Konformität nachzuweisen.

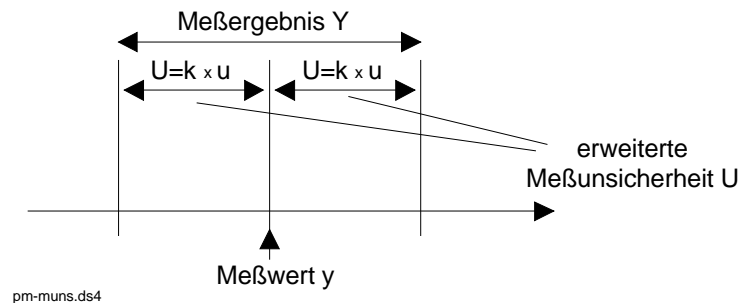


Abbildung 1: Messergebnis Y aus Messwert y und erweiterter Messunsicherheit U

Das Messergebnis Y ist nach DIN EN ISO 14253-1: 1999 das symmetrische Intervall der erweiterten Messunsicherheit um den Messwert y (Abbildung 1). Die Messunsicherheit U ist dem Messwert y beigeordnet.

Folgerung:

$$Y = y \pm U$$

Jedes Messergebnis Y besteht aus dem Messwert y und der beigeordneten Messunsicherheit U .

2.1 Definitionen

Definition Messunsicherheit nach DIN V ENV 13005

Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte.

Anmerkung 1: Der Parameter kann beispielsweise eine Standardabweichung (oder ein gegebenes Vielfaches davon), oder die halbe Weite eines Bereiches sein, der ein festgelegtes Vertrauensniveau hat.

Anmerkung 2: Die Messunsicherheit enthält im allgemeinen viele Komponenten. Einige dieser Komponenten können aus der statistischen Verteilung der Ergebnisse einer Messreihe ermittelt und durch empirische Standardabweichungen gekennzeichnet werden. Die anderen Komponenten, die ebenfalls durch Standardabweichungen charakterisiert werden können, werden aus angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen ermittelt, die sich auf Erfahrung oder andere Informationen gründen.

Anmerkung 3: Es wird vorausgesetzt, dass das Messergebnis der beste Schätzwert für den Wert der Messgröße ist, und dass alle Komponenten der Unsicherheit zur Streuung beitragen, eingeschlossen diejenigen, welche von systematischen Einwirkungen herrühren, z. B. solche, die von Korrektur und Bezugsnormen stammen.

Für die Betrachtung der Messunsicherheit U wird unterschieden zwischen:

1. Standardunsicherheit (einer Messung) $u(x)$

Als Standardabweichung ausgedrückte Unsicherheit des Ergebnisses einer Messung.

2. Kombinierte Standardunsicherheit $u(y)$

Standardunsicherheit eines Messergebnisses als positive Quadratwurzel einer Summe von $n > 1$ Standardunsicherheiten.

3. Erweiterte Messunsicherheit U

Kenngroße, die einen Bereich um das Messergebnis kennzeichnet, von dem erwartet werden kann, dass er einen großen Anteil der Verteilung der Werte umfasst, die der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden könnten.

Anmerkung 1: Der Anteil kann als Überdeckungswahrscheinlichkeit oder Vertrauensniveau des Bereiches angesehen werden.

Anmerkung 2: Um dem durch die erweiterte Messunsicherheit gekennzeichneten Bereich ein spezielles Vertrauensniveau zuzuordnen, sind explizite oder implizite Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung erforderlich, die durch das Messergebnis und die kombinierte Standardunsicherheit charakterisiert wird. Das Vertrauensniveau, das diesem Bereich zugeordnet werden kann, kann nur in dem Maße bekannt sein, wie solche Annahmen gerechtfertigt sind.

4. Erweiterungsfaktor k

Zahlenfaktor, mit dem die kombinierte Standardunsicherheit multipliziert wird, um eine erweiterte Messunsicherheit zu erhalten. (Gewöhnlich ist $k = 2$)

Der Wert des Erweiterungsfaktors wird auf der Grundlage, des für den Bereich $y - U$ bis $y + U$ geforderten Überdeckungswahrscheinlichkeit ausgewählt. Die Anwendung des Erweiterungsfaktors $k = 2$ für eine annähernde Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % (gilt nur für eine Normalverteilung) wird empfohlen.

$k=2$	95 % bzw. 4 s
$k=3$	99,7 % bzw. 6 s
$k = 4$	99,996 % bzw. 8 s

Tabelle 1: Erweiterungsfaktor k und die Abhängigkeit von der Überdeckungswahrscheinlichkeit bei Normalverteilung der Messwerte

5. Unsicherheitsbudget (für eine Messung oder eine Kalibrierung) DIN EN ISO 14253-1 Beiblatt 1

Aussage, die die Ergebnisse der Schätzungen bzw. der statistischen Auswertungen der zur Unsicherheit eines Messergebnisses beitragenden Unsicherheitskomponenten zusammenfasst.

Anmerkung 1: Die Unsicherheit eines Messergebnisses ist nur dann eindeutig, wenn das Messverfahren (einschließlich Prüfgegenstand, Messgröße, Messmethode und Messbedingungen) definiert ist.

Anmerkung 2: Die Benennung „Budget“ wird für die Zuordnung von Zahlenwerten zu den Unsicherheitskomponenten, deren Kombination und Erweiterung basierend auf dem Messverfahren, den Messbedingungen und –annahmen, verwendet.

6. Toleranz (an manchen Stellen auch Toleranzfeld genannt):

Differenz zwischen dem oberen und unteren Grenzwert des Merkmals bzw. der oberen und unteren Toleranzgrenze.

Anmerkung 1: Die Toleranz ist ein Absolutwert ohne Vorzeichen.

Anmerkung 2: Die Toleranz kann zweiseitig oder einseitig sein (maximal zulässiger Wert auf einer Seite, anderer Grenzwert Null), aber die Toleranz schließt nicht unbedingt den Nennwert mit ein.

2.2 Bestimmung der Messunsicherheit

Der Einfluss von Unsicherheitsbeiträgen auf das Messergebnis wird durch die Bestimmung von Standardunsicherheiten $u(x)_i$ quantifiziert. Die Bestimmung der Standardunsicherheit kann durch Auswertung einer Messreihe mit statistischen Methoden (Methode Typ A; $u(x_A)_i$) oder durch Anwendung von Schätzmethode aus Vorinformationen (Methode Typ B; $u(x_B)_i$) ermittelt werden.

Ermittlungsmethode Typ A

Für den Fall der Anwendung der Ermittlungsmethode Typ A wird vereinfachend im Allgemeinen vom statistischen Verteilungsmodell der Normalverteilung ausgegangen (vollständige Beschreibung der Normalverteilung durch den Mittelwert und die Standardabweichung einer Messreihe)

Die Angabe der Komponente $u(x_A)$ aus einer Ausreißerbereinigten Messreihe, entnommen unter definierten Versuchsbedingungen als empirische Standardabweichung, wenn das Ergebnis aus Einzelmesswerten bestimmt wird:

$$u(x_A)^2 = s_{x_i}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

wobei

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

und als Standardabweichung der Mittelwerte, wenn das Messergebnis aus Mittelwerten von Wiederholmessreihen bestimmt wird:

$$u(x_A) = s_{x_i} = \frac{s_n}{\sqrt{n}}$$

Ermittlungsmethode Typ B

Wenn die Bestimmung einer Standardunsicherheit nach der Ermittlungsmethode Typ A nicht, bzw. nicht wirtschaftlich erfolgen kann, so können die entsprechenden Standardunsicherheiten aus Vorinformationen geschätzt werden. Vorinformationen können sein:

- Daten aus früheren Messungen
- Erfahrungen oder allgemeine Kenntnisse über Verhalten und Eigenschaften der relevanten Materialien und Messgeräte
- Angaben des Herstellers
- Daten von Kalibrierscheinen und Zertifikaten
- Unsicherheiten, die Referenzdaten aus Handbüchern zugeordnet sind.

Eine systematische Methode zur Ermittlung von Standardunsicherheiten nach Ermittlungsmethode Typ B ist die Transformation von Fehlergrenzen. Für alle Messwertverteilungen besteht ein bestimmtes Verhältnis zwischen der Standardabweichung und dem Grenzwert a . Da die Normalverteilung nicht begrenzt ist, wird $2s$ als Grenzwert a entsprechend einer statistischen Sicherheit von 95% verwendet. Als Grenzwertbezeichnung wurden bei symmetrischer Verteilung $-a$ und $+a$ gewählt. Bei der Schätzung auf der Basis von Fehlergrenzwerten kann aus den Grenzwerten und der bekannten Art der Messwertverteilung, die Standardunsicherheit $u(x_B)$ durch einen Verteilungskoeffizient b berechnet werden:

$$u(x_B) = a \cdot b$$

mit

a – Grenzwert

b – Verteilungskoeffizient

3 Messunsicherheit akustischer Messprozesse

Akustische Messprozesse unterliegen Einflüssen, die vom Prüfling, von der Art des Prüfsignals (Luftschall oder Körperschall), vom Messmittel (Raum, Sensorik, Ankopplung der Sensorik, Signalerfassung), von den Umgebungsbedingungen und natürlich von der Messgröße selbst bzw. dem zu messenden Merkmal abhängen.

Um die Messunsicherheit möglichst zuverlässig zu schätzen, ist das Aufstellen des sog. Messunsicherheitsbudgets sinnvoll. Es geht von einem Modell des Messprozesses aus, in dem alle wirkenden Einflüsse identifiziert und in ihrer Größe abgeschätzt werden. Ein Beispiel für ein Messunsicherheitsbudget kann z.B. folgende Einflüsse bzw. Messunsicherheitsanteile u_i enthalten:

- Unsicherheitsanteil des Normals (dokumentiert als Messunsicherheit des Kalibrierlabors im Kalibrierschein)
- Wiederholgenauigkeit bei der Adaption des Normals
- Ankopplung der Sensorik an den Prüfling oder Raum
- Raumeinfluss oder Einfluss der Messvorrichtung
- Messgenauigkeit der Sensorik
- Messgenauigkeit der Sensor-Signalverarbeitung
- Unsicherheitsanteile bedingt durch die Umgebungsbedingungen wie z.B. Temperatur, Schwingungen, Umgebungsschall
- Rechengenauigkeit der Analyseverfahren
- Fehlergrenze des eingesetzten Messgerätes
- Abweichungen bei der Anzeige oder Speicherung der Messdaten.

Sind die möglichen Einflüsse gefunden, so gilt es deren Einflussgröße abzuschätzen. zu berücksichtigen ist dabei, dass die Einheit und Dimension der Messgröße berücksichtigt werden.

Da akustische Größen häufig in Dezibel (dB) angegeben werden, ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei um eine logarithmische Größe handelt. Die Messgrößen müssen daher zunächst in lineare Größen umgerechnet werden, also Schalldruckpegel in Schalldruck, Beschleunigungspegel in Beschleunigung, Spannungspegel in Spannung usw.

Die Umrechnung des Schalldruckpegels in Schalldruck erfolgt durch Umformen der Formel:

$$L_p = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0} \text{ dB} \quad (1)$$

mit

p = Schalldruck in Pa

p_0 = Bezugsgröße $2 \cdot 10^{-5} \text{ mPa}$ (für Luftschall)

$$p = 10^{\frac{L_p}{20}} \cdot p_0 \quad (2)$$

Da grundsätzlich die Möglichkeit besteht, die Messunsicherheit entweder nach Methode B aus bekannten Quellen oder, falls es derartige Informationen nicht gibt, nach Methode A aus Wiederholungsmessungen zu gewinnen, ist es sinnvoll, einen Katalog mit dokumentierten Einflussgrößen zu führen, um für die Aufstellung des Messunsicherheitsbudgets auf diese Erfahrungswerte zurückgreifen zu können. Dadurch lässt sich der Aufwand für die Schätzung der Messunsicherheit im Laufe der Zeit immer weiter reduzieren.

3.1 Schätzen der Messunsicherheit nach Methode A

Um die Messunsicherheit eines wirksamen Einflusses nach Methode A zu bestimmen, werden Wiederholungsmessungen unter repräsentativen Messbedingungen durchgeführt. Nach VDA 5 werden 25 Wiederholungsmessungen empfohlen, um die statistische Schätzgenauigkeit zu gewährleisten. In besonderen Fällen insbesondere wenn der Aufwand durch die große Zahl zu hoch wird, kann auf kleinere Stichproben zurückgegangen werden. Empfohlen wird aber, mindestens 10 Wiederholungsmessungen zu machen.

Nach Test auf Normalverteilung werden aus den Wiederholungsmessungen der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Die Standardabweichung s der Stichprobe wird als Standardmessunsicherheit u benutzt und daraus die Messunsicherheit U berechnet.

$$U = k \cdot u = k \cdot s$$

Die so berechnete Messunsicherheit U wird mit den möglicherweise nach Methode B bestimmten weiteren Unsicherheitsanteilen kombiniert und daraus die Gesamtmessunsicherheit berechnet. Der Band VDA 5 hat für die Berechnung der kombinierten Messunsicherheit die Berechnung des geometrischen Mittelwertes aus den Einzelanteilen vorgeschlagen. Dies ist auch für die Messunsicherheit akustischer Mess- und Prüfprozesse eine praktikable Lösung.

Die Gesamtmessunsicherheit U ergibt sich dann zu

$$U = 2 \cdot u_{ges} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_i^2 + \dots + u_n^2}$$

mit u_i = Einzel-Messunsicherheitsanteilen.

3.2 Beispiel für die Berechnung der Messunsicherheit nach Methode A

In einem Prüfprozess wurden Wiederholungsmessungen durchgeführt, um für die reale Situation und das eingesetzte Prüfmittel die Messunsicherheit zu bestimmen. Aus Aufwandsgründen wurden lediglich 10 Wiederholungsmessungen durchgeführt.

Die Messergebnisse aus den Wiederholungsmessungen sind in Tabelle 2 wiedergegeben. Die Pegelwerte wurden entsprechend der oben angegebenen Formel (2) in lineare Messwerte umgerechnet, sowie Mittelwert und Standardabweichung berechnet.

Die Messunsicherheit U der Wiederholungsmessungen ist in diesem Fall

$$U = k \cdot s = 2 \cdot 31,336 = 62,672$$

Um die Messunsicherheit wieder als Pegelwert (also als relative Größe) anzugeben, muss diese aus Mittelwert m und Messunsicherheit U berechnet werden. Die Messunsicherheit ist ein absoluter Wert, der den Abstand vom Mittelwert angibt. Der Pegelwert der Messunsicherheit muss also den absoluten Abstand zwischen diesen beiden Punkten auf der Messgrößenachse wieder-

geben. Das bedeutet, dass der Pegel des Mittelwertes m und der Pegel des Mittelwertes+ U und daraus der Pegelabstand berechnet werden muss.

- Pegel des Mittelwertes $m = 42,13 \text{ dB}$
- Pegel von $m+U = 45,60 \text{ dB}$
- Pegel der Messunsicherheit $= 45,60 \text{ dB} - 42,13 \text{ dB} = 3,47 \text{ dB}$

Nr.	Pegel / dB	Messwert /lin
1	41,82	123,31
2	38,13	80,63
3	39,16	90,78
4	42,52	133,65
5	43,49	149,45
6	42,62	135,20
7	40,23	102,68
8	43,3	146,21
9	45,51	188,58
10	42,13	127,79
Mittelwert	m	127,83
Standardabweichung	s	31,336

Tabelle 2: Messergebnisse aus den Wiederholungsmessungen

4 Vorgehen bei der Bestimmung des Messunsicherheitsbudgets

Bei der Bestimmung der Messunsicherheit U des akustischen Mess- und Prüfprozesses wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Voraussetzung: Einsatz kalibrierter Mess- und Prüfmittel (inkl. Kalibrierschein)
2. Festgelegtes Verfahren zum Nachweis der Messunsicherheit
3. Aufstellen des Modells des Mess- und Prüfprozesses (Messunsicherheitsbudget)

Bestimmung der wesentlichen Einflussgrößen und ihres Beitrages zur Messunsicherheit.

4. Bestimmen der Größe der Einzelmessunsicherheiten nach Methode A oder B entsprechend DIN V EN V 13005
5. Berechnen der Gesamtmessunsicherheit U aus den Einzelbeiträgen der Einflussgrößen u_i

Um die Messunsicherheit des Mess- und Analysesystems hinsichtlich seines Beitrages und seiner Wiederholgenauigkeit zu untersuchen, bietet sich die Möglichkeit, die von der DGAQS erarbeiteten Signale inkl. der zugehörigen Beschreibung zu verwenden (DGAQS-CD mit Referenzsignalen. Diese Signale sowie die zugehörige Versuchs- und Auswertebeschreibung wurde bereits erfolgreich für Ringversuche eingesetzt. Damit wird die Leistungsfähigkeit des Prüfsystems auch vergleichbar mit anderen Systemen.

5 Literatur

DIN EN ISO 9001: 2000-12

Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001: 2000-09);
Dreisprachige Fassung EN ISO 9001: 2000, Originalsprache:
Deutsch/Englisch/Französisch

E DIN EN ISO 13485:2002

Qualitätssicherungssysteme - Medizinprodukte - Besondere Anforderungen für die Anwendung von EN ISO 9001 Deutsche Fassung EN ISO 13485:2002-05

DIN EN ISO 13485: 2001-02

Qualitätssicherungssysteme - Medizinprodukte - Besondere Anforderungen für die Anwendung von EN ISO 9001 (Überarbeitung von EN 46001:1996), (Identisch mit ISO 13485:1996); Deutsche Fassung EN ISO 13485:2000

DIN EN ISO 9000: 2000-12

Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000: 2000); Dreisprachige Fassung EN ISO 9000: 2000, Originalsprache: Deutsch/Englisch/Französisch

DIN V ENV 13005: 1999-06

Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM)[1];
Deutsche Fassung ENV 13005: 1999

Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)

DIN EN ISO 14253-1: 1999-03

Geometrische Produktspezifikationen (GPS), Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen, Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen, (ISO 14253-1: 1998); Deutsche Fassung EN ISO 14253-1:1998

E DIN 32937

Prüfmittelüberwachung: Planen, Verwalten und Einsetzen von Prüfmitteln. 2004

E VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 1.2

Prüfmittelüberwachung, Anweisungen zur Überwachung von Messmitteln für geometrische Größen – Messunsicherheit

DGQ 13-61

Prüfmittelmanagement: Planen, Überwachen, Organisieren und Verbessern von Prüfprozessen. Jan. 2004

DIN V ENV 13005: 1999-06 Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM)

DIN V EN V 13005 Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen

ISO Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)

ISO/TS 16949 Qualitätsmanagementsysteme – Spezielle Forderungen bei Anwendung von ISO 9001:1994 für Zulieferer in der Automobilindustrie.

VDA 5 Prüfprozesseignung - Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie
VDA 2001

DIN EN ISO/IEC 17025: 2000-04

Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025: 1999); Dreisprachige Fassung EN ISO/IEC 17025: 2000

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Benno Kotterba
DGaQs - Deutsche Gesellschaft
für akustische Qualitätssicherung e.V.
Karlstr. 119
D - 76137 Karlsruhe
Tel: +49-721-9379244
Mobil: + 49-171-3621901
Fax: +49-721-9379246
E-Mail: kotterba@dgaqs.de