

DIN EN 61161

ICS 17.140.50

Einsprüche bis 2012-01-28
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 61161:2007-09

Entwurf

**Ultraschall –
Leistungsmessung –
Schallfeldkraft-Waagen und Anforderungen an ihre
Funktionseigenschaften (IEC 87/483/CDV:2011);
Deutsche Fassung FprEN 61161:2011**

Ultrasonics –
Power measurement –
Radiation force balances and performance requirements (IEC 87/483/CDV:2011);
German version FprEN 61161:2011

Ultrasons –
Mesurage de puissance –
Balances de forces de rayonnement et exigences de fonctionnement
(CEI 87/483/CDV:2011);
Version allemande FprEN 61161:2011

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2011-11-21 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an dke@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (Hausanschrift: Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main).

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 104 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE
Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI

Nationales Vorwort

Die Deutsche Fassung des europäischen Dokuments FprEN 61161:2011 „Ultraschall – Leistungsmessung – Schallfeldkraft-Waagen und Anforderungen an ihre Funktionseigenschaften“ (Entwurf in der Umfrage) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dem entsprechend ist das internationale Dokument IEC 87/483/CDV:2011 „Ultrasonics – Power measurement – Radiation force balances and performance requirements“ unverändert in den Entwurf FprEN 61161:2011 übernommen worden.

Da die Deutsche Fassung noch nicht endgültig mit der Englischen und Französischen Fassung abgeglichen ist, ist die englische Originalfassung des IEC-CDV entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 87 „Ultrasonics“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet.

Bei der Abstimmung zu dem Europäischen Schluss-Entwurf bei CENELEC und dem Internationalen Schluss-Entwurf bei IEC [Final Draft International Standard (FDIS)] sind jeweils nur „JA/NEIN“-Entscheidungen möglich, wobei „NEIN“-Entscheidungen fundiert begründet werden müssen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium GUK 821.3 „Medizinische Ultraschallgeräte“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnietsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 61161:2007-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Die Messung von Feldern von rechteckigen Ultraschallwandlern wurde mit aufgenommen.
- b) Die Vorschriften zur Kalibrierung bzw. Rekalibrierung von Schallfeldkraft-Waagen wurden überarbeitet.
- c) Die neuere Literatur wurde berücksichtigt.

**Ultraschall –
Leistungsmessung –
Schallfeldkraft-Waagen und Anforderungen an ihre Funktionseigenschaften**

Inhalt

	Seite
Einleitung	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	6
4 Liste der Formelzeichen	7
5 Anforderungen an Schallfeldkraft-Waagen	8
5.1 Allgemeines	8
5.2 Target-Typ	8
5.2.1 Allgemeines	8
5.2.2 Absorbierendes Target	8
5.2.3 Reflektierendes Target	9
5.3 Target-Durchmesser	9
5.4 Waage/Kraftmesssystem	9
5.5 Messgefäß	10
5.6 Target-Aufhängung	10
5.7 Wandlerhalterung	10
5.8 Abschirmfolien	10
5.9 Wandlerankopplung	10
5.10 Kalibrierung	10
6 Anforderungen an Messbedingungen	11
6.1 Seitliche Target-Anordnung	11
6.2 Target-Abstand vom Wandler	11
6.3 Wasser	11
6.4 Wasserkontakt	11
6.5 Umgebungsbedingungen	11
6.6 Thermische Drift	12
7 Messunsicherheit	12
7.1 Allgemeines	12
7.2 Waagensystem einschließlich Target-Aufhängung	12
7.3 Linearität und Auflösung des Waagensystems	12
7.4 Extrapolation auf den Schaltzeitpunkt des Ultraschallwandlers	13
7.5 Target-Unvollkommenheiten	13

	Seite
7.6 Form des reflektierenden Targets	13
7.7 Seitliche Absorber im Fall von Messungen mit reflektierendem Target.....	13
7.8 Fehlausrichtung des Targets	13
7.9 Fehlausrichtung des Ultraschallwandlers.....	13
7.10 Wassertemperatur	13
7.11 Ultraschallschwächung und akustische Strömung	13
7.12 Folieneigenschaften	13
7.13 Endliche Target-Größe	14
7.14 Annahme ebener Wellen	14
7.15 Einfluss der Abtastung.....	14
7.16 Umgebungseinflüsse	14
7.17 Messung der Anregungsspannung	14
7.18 Temperatur des Ultraschallwandlers.....	14
7.19 Nichtlinearität.....	14
7.20 Andere Quellen.....	14
Anhang A (informativ) Zusätzliche Angaben zu verschiedenen Gesichtspunkten der Schallfeldkraft-Messungen	16
Anhang B (normativ) Grundlegende Gleichungen.....	29
Anhang C (informativ) Andere Verfahren der Ultraschall-Leistungsmessung.....	35
Anhang D (informativ) Ausbreitungsmedium und Entgasung	36
Anhang E (informativ) Schallfeldkraft-Messungen an divergierenden Ultraschallbündeln.....	41
Anhang F (informativ) Einschränkungen auf Grund der Waagenanordnungen	45
Literaturhinweise.....	50
Bilder	
Bild 1 – Schnitt durch ein absorbierendes Target.....	15
Bild 2 – Linearitätsprüfung: Waagenanzeige als Funktion der Eingangsgröße	15
Bild D.1 – Beispiel für die Gelöstsauerstoffkonzentration als Funktion der Zeit für 200 ml vakuum-entgastes Wasser in einem Glas mit einer Flüssigkeitsoberfläche von 34 cm ²	38
Bild D.2 – Gelöstsauerstoffkonzentration als Funktion der Zeit für 2 g/l, 4 g/l und 6 g/l Natriumsulfit in entmineralisiertem Wasser und für verschiedene Oberflächen und Volumina des Wassers. Die Messungen begannen direkt nach dem Füllen des Glases. Wassertemperatur von (22 ± 1) °C.	39
Bild E.1 – Kolbenmembranergebnis (oszillierende Kurve) für $PlcF$ als Funktion von ka mit „Spitzen“-Näherung (ungestrichelte Linie) und der mittleren Halbwert-Kurve (gestrichelte Linie), die den Korrekturfaktor $corr$ darstellt.....	42
Bild E.2 – $PlcF$ als Funktion von ka mit vier verschiedenen pseudo-trapezförmigen Amplitudenverteilungen, mit $\varepsilon = 0$ (Kolben) (durchgezogen); $\varepsilon = 0,1$ (gestrichelt); $\varepsilon = 0,25$ (gepunktet); $\varepsilon = 0,6$ (Strich-Punkt-Linie)	42
Bild E.3 – Verhältnis des Strahlungsleitwertes G , ermittelt mit einem konvex-konischen, reflektierenden Target mit einem Konushalbwinkel von 45°, ermittelt mit einem absorbierenden Target, aufgetragen gegen den ka -Wert für 11 verschiedene, in der Physiotherapie verwendete Wandler, ermittelt in drei Laboratorien [29]	44
Bild F.1 – Anordnung A mit absorbierendem (a) oder reflektierendem (b) Target	46

	Seite
Bild F.2 – Anordnung B mit konvex-konischem, reflektierendem Target	46
Bild F.3 – Anordnung B mit absorbierendem Target	46
Bild F.4 – Anordnung C mit absorbierendem Target	47
Bild F.5 – Anordnung E mit absorbierendem (a) oder mit konkav-konischem, reflektierendem (b) Target	47
Bild F.6 – Anordnung F mit konvex-konischem, reflektierendem Target	47
Bild F.7 – Anordnung F mit absorbierendem Target	47
Tabellen	
Tabelle D.1 – Wasserentgasungsverfahren	37
Tabelle D.2 – Bedingungen für das Entgasen durch Sieden	38
Tabelle F.1 – Vor- und Nachteile verschiedener Anordnungen	49

Einleitung

Es gibt eine Reihe von Messverfahren für die Bestimmung der emittierten Gesamtleistung von **Ultraschallwandlern** ([1], [2], [3], siehe auch Anhang C). Der Zweck dieser Internationalen Norm ist es, Normverfahren für die Messung der Ultraschallleistung in Flüssigkeiten im unteren Megahertz-Frequenzbereich auf Grundlage der **Schallfeldkraft**-Messung mit einer gravimetrischen Waage festzulegen. Der große Vorteil der **Schallfeldkraft**-Messungen ist, dass ein Wert für die emittierte Gesamtleistung erhalten wird, ohne Felddaten über den Querschnitt des emittierten Schallbündels integrieren zu müssen. Die vorliegende Norm kennzeichnet die Fehlerquellen und beschreibt ein systematisches Stufenverfahren zur Beurteilung der Gesamtmessunsicherheit sowie alle Vorkehrungen, die getroffen werden sollten, und Messunsicherheiten, die bei der Durchführung der Leistungsmessungen berücksichtigt werden sollten.

Die grundlegenden Sicherheitsanforderungen an physiotherapeutische Ultraschallgeräte sind in IEC 60601-2-5 aufgeführt und beziehen sich auf IEC 61689, worin die Notwendigkeit einer geringeren Messunsicherheit als $\pm 15\%$ für Schallleistungsmessungen festgelegt ist. Unter Berücksichtigung der üblicherweise schlechteren Genauigkeit bei der praktischen Anwendung müssen Bezugsmessverfahren mit geringeren Messunsicherheiten als $\pm 7\%$ erarbeitet werden. Die Deklarationsanforderungen für diagnostische Ultraschallgeräte sind in anderen IEC-Normen festgelegt, z. B. IEC 61157.

Die ordnungsgemäße, genaue und wiederholbare Messung der Schallleistung mit einer **Schallfeldkraft**-Waage, wie in dieser Norm definiert, wird von einer Anzahl praktischer Probleme beeinflusst. Als Anleitung für den Anwender werden im Anhang A unter Verwendung der im Hauptteil genutzten Abschnitts- und Unterabschnittsnummerierung zusätzliche Informationen gegeben.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm:

- legt ein Bestimmungsverfahren für die emittierte Gesamtschallleistung von **Ultraschallwandlern** auf Grundlage der Verwendung einer **Schallfeldkraft**-Waage fest;
- stellt allgemeine Regeln für die Verwendung von **Schallfeldkraft**-Waagen auf, in denen ein Hindernis (**Target**) das zu messende Schallfeld unterbricht;
- legt Einschränkungen des **Schallfeldkraft**-Verfahrens bezüglich Kavitation und Temperaturanstieg fest;
- legt quantitative Einschränkungen des **Schallfeldkraft**-Verfahrens bezüglich divergierender und fokussierter Schallbündel fest;
- gibt Informationen über die Ermittlung der Schallleistung divergenter und fokussierter Bündel mit der **Schallfeldkraft**-Methode;
- gibt Informationen über die Abschätzung von Gesamt-Messunsicherheiten.

Diese Internationale Norm gilt für:

- die Messung der Ultraschallleistung bis 1 W auf Grundlage der Verwendung einer **Schallfeldkraft**-Waage im Frequenzbereich von 0,5 MHz bis 25 MHz;
- die Messung der Ultraschallleistung bis 20 W auf Grundlage der Verwendung einer **Schallfeldkraft**-Waage im Frequenzbereich von 0,75 MHz bis 5 MHz;
- die Messung der Gesamtultraschallleistung in gut gebündelten, divergenten und fokussierten Ultraschallfeldern;
- die Verwendung von **Schallfeldkraft**-Waagen vom gravimetrischen Typ oder Kraftrückkopplungstyp.

(Siehe auch A.1.)

ANMERKUNG 1 Ein fokussiertes Bündel ist konvergent im präfokalen Bereich und divergent jenseits des Brennpunktes.

ANMERKUNG 2 Die Titel aller Veröffentlichungen, auf die in dieser Norm Bezug genommen wird, sind im Literaturverzeichnis aufgeführt.

ANMERKUNG 3 Die Ultraschall-Leistungsmessung im Bereich hoch-intensiven therapeutischen Ultraschalls (HITU), d. h. jenseits von 1 W beziehungsweise 20 W, wird in IEC 62555 behandelt. IEC-Normen sind in Abschnitt 2, Normative Referenzen, aufgeführt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60050, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 801: Acoustics and Electroacoustics, Chapter 802: Ultrasonics*

IEC 60601-2-5, *Medical electrical equipment – Part 2-5: Particular requirements for the safety of ultrasonic therapy equipment*

IEC 60854:1986, *International Report, Methods of measuring the performance of ultrasonic pulse-echo diagnostic equipment*

IEC 61157, *Standard means for the reporting of the acoustic output of medical diagnostic ultrasonic equipment*

IEC 61689, *Ultrasonics – Physiotherapy systems – Performance requirements and methods of measurement in the frequency range 0,5 MHz to 5 MHz*

IEC 61846:1998, *Ultrasonics – Pressure pulse lithotripters – Characteristics of fields*

IEC 62127-1, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields up to 40 MHz*

IEC 62127-2, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz*

IEC 62127-3, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 3: Properties of hydrophones for ultrasonic fields up to 40 MHz*

IEC 62555, *Ultrasonics – Power measurement – Output power measurement for high intensity therapeutic ultrasound (HITU) transducers and systems*. Wird gerade erarbeitet, neuestes Dokument: IEC 87/422/CD, August 2009 (Wird durch die neueste Ausgabe ersetzt werden.)

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe sowie die Begriffe nach IEC 60050-801 und IEC 60050-802^{N1)}.

3.1

akustische Strömung

Gesamt-Volumenströmung einer Flüssigkeit, die von einem Schallfeld verursacht wird

3.2

Freifeld

Schallfeld in einem homogenen, isotropen Medium, dessen Grenzen einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Schallwellen ausüben

[IEV 801-23-28, modifiziert]

3.3

Ausgangsleistung

P

zeitlich gemittelte Ultraschallleistung, die von einem **Ultraschallwandler** in ein nahezu ideales **Freifeld** unter festgelegten Bedingungen in einem bestimmten Medium, vorzugsweise Wasser, emittiert wird

ANMERKUNG **Ausgangsleistung** wird in Watt (W) ausgedrückt.

3.4

Feldkraft

Schallfeldkraft

F

im Zeitmittel vorhandene Kraft, die auf einen Körper in einem Schallfeld wirkt und die durch das Schallfeld verursacht wird, ohne den durch akustische Strömung verursachten Beitrag; oder allgemeiner: im Zeitmittel vorhandene Kraft (ohne den durch akustische Strömung verursachten Beitrag) in einem Schallfeld, die an der Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen akustischen Eigenschaften auftritt

ANMERKUNG **Feldkraft**, Schallfeldkraft wird in Newton (N) ausgedrückt.

^{N1)} Nationale Fußnote: IEC 60050-802 ist noch in der Veröffentlichungsphase und wird in Kürze erscheinen.

3.5

Felddruck

Schallfelddruck

Feldkraft je Flächeneinheit

ANMERKUNG 1 Die Verwendung dieses Begriffes ist in der Literatur sehr verbreitet. Genau genommen ist die **Feldkraft** je Flächeneinheit jedoch eine Tensorgröße [4] und sollte als der Schallfeld-Spannungstensor bezeichnet werden, wenn eine wissenschaftlich präzisere Terminologie verwendet wird. Die integrale Größe „Schallfeldkraft“ wird in dieser Internationalen Norm allgemein bevorzugt. Wenn jedoch an einigen Stellen der Begriff „Schallfelddruck“ verwendet wird, so ist er als der Negativwert der betrachteten Schallfeld-Normalspannung in Richtung der Feldachse zu verstehen.

ANMERKUNG 2 **Felddruck**, Schallfelddruck wird in Pascal (Pa) ausgedrückt.

3.6

Target

ein besonders gebautes Objekt, das praktisch das gesamte Ultraschallfeld auffangen soll und auf das die **Feldkraft** einwirken soll

3.7

Ultraschallwandler

Einrichtung zur Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Energie im Frequenzbereich des Ultraschalls und/oder umgekehrt zur Umwandlung mechanischer Energie in elektrische Energie

3.8

Strahlungsleitwert

G

Quotient aus der akustischen **Ausgangsleistung** und der quadrierten effektiven Wandlereingangsspannung. Er wird zum Charakterisieren der Wandlung elektrischer Energie zu Schallenergie von **Ultraschallwandlern** verwendet.

ANMERKUNG **Strahlungsleitwert** wird in Siemens (S) ausgedrückt.

4 Liste der Formelzeichen

a Radius eines kreisrunden **Ultraschallwandlers**

b_x und b_y halbe Abmessungen eines rechteckigen **Ultraschallwandlers** in x - beziehungsweise y -Richtung (so dass $2b_x$ und $2b_y$ die Seitenlängen des Wandlers sind)

c Schallgeschwindigkeit (üblicherweise in Wasser)

d_x und d_y geometrische Brennweiten eines fokussierten **Ultraschallwandlers** in der x - z - beziehungsweise der y - z -Ebene

d geometrische Brennweite eines fokussierten **Ultraschallwandlers** im Fall, dass $d_x = d_y = d$

F **Schallfeldkraft** auf ein **Target** in Ausbreitungsrichtung der Ultraschallwelle

g Erdbeschleunigung

G **Strahlungsleitwert**

h_d halbe Länge der Diagonale eines rechteckigen Wandlers, $h_d = (b_x^2 + b_y^2)^{1/2}$

h_h harmonischer Mittelwert von b_x und b_y , $h_h = 2/(1/b_x + 1/b_y)$

k Kreiswellenzahl ($k = 2\pi/\lambda$)

P **Ausgangsleistung** eines **Ultraschallwandlers**

s normierter Abstand von einem **Ultraschallwandler** ($s = z\lambda/a^2$)

z Abstand zwischen einem **Ultraschallwandler** und einem **Target**

α Amplitudenschwächungskoeffizient ebener Wellen in einem Medium (üblicherweise Wasser)

β_x und β_y Fokus(-Halb)winkel eines fokussierenden rechteckigen **Ultraschallwandlers** in der x-z-beziehungsweise der y-z-Ebene; $\beta_x = \arctan(b_x/d_x)$, $\beta_y = \arctan(b_y/d_y)$ wenn der Wandler eben ist und die Brennweiten von der ebenen Wandleroberfläche aus gezählt werden

γ Fokus(-Halb)winkel eines fokussierenden kreisrunden **Ultraschallwandlers**; $\gamma = \arcsin(a/d)$ wenn der Wandler sphärisch gekrümmt ist und die Brennweite vom „Boden“ der „Schüssel“ aus gezählt wird; $\gamma = \arctan(a/d)$ wenn der Wandler eben ist oder die Brennweite von der durch den Rand des aktiven Teils der „Schüssel“ definierten Ebene aus gezählt wird

θ Winkel zwischen der Ausbreitungsrichtung einer Ultraschallwelle und der Senkrechten auf einer reflektierenden **Target**-Fläche

λ Ultraschallwellenlänge im Schallausbreitungsmedium (üblicherweise Wasser)

ρ Dichte (volumenbezogene Masse) des Schallausbreitungsmediums (üblicherweise Wasser)

ANMERKUNG 1 Die oben unter F und θ erwähnte Richtung der einfallenden Welle ist als die Richtung der Feldachse anzusehen, d. h., sie ist eher global als lokal zu betrachten.

ANMERKUNG 2 Im Fall eines fokussierenden Wandlers sind genau genommen die Fokussierungseigenschaften und die Wandlerform unabhängig voneinander, d. h. auch ein kreisrunder Wandler kann zwei unterschiedliche Fokus(-Halb)winkel haben. Im Hinblick auf die Ultraschallpraxis beschränkt sich diese Norm jedoch auf die beiden Fälle eines kreisrunden Wandlers mit einem Fokus(-Halb)winkel und eines rechteckigen Wandlers mit zwei Fokus(-Halb)winkeln (die natürlich untereinander gleich sein können).

5 Anforderungen an Schallfeldkraft-Waagen

5.1 Allgemeines

Die **Schallfeldkraft**-Waage muss aus einem **Target** in Verbindung mit einer Waage bestehen. Das Ultraschallbündel muss vertikal aufwärts oder abwärts auf das **Target** gerichtet und die vom Ultraschallbündel ausgeübte **Schallfeldkraft** muss mit der Waage gemessen werden. Die Ultraschallleistung muss nach den Gleichungen im Anhang B aus der Differenz zwischen der gemessenen Kraft mit und der ohne Ultraschallstrahlung bestimmt werden. Die Kalibrierung kann mittels kleiner Präzisionsgewichte bekannter Masse erfolgen.

ANMERKUNG Die verschiedenen möglichen Aufbauten für **Schallfeldkraft**-Messungen sind in Bild F.1 bis Bild F.7 vorgestellt. Jeder Messaufbau hat seine eigenen Vorzüge, die in Anhang F zusammengefasst sind.

5.2 Target-Typ

5.2.1 Allgemeines

Das **Target** muss bekannte akustische Eigenschaften haben, denn diese sind für die Einzelheiten der Beziehung zwischen Ultraschallleistung und **Feldkraft** wichtig. (Siehe auch A.5.2.1.)

Wenn das **Target** so gewählt wird, dass es sich einem der beiden Extremfälle, d. h. idealer Absorber oder idealer Reflektor, möglichst weit annähert, dann müssen die in Anhang B angegebenen Gleichungen angewendet werden und gelten folgende Anforderungen.

5.2.2 Absorbierendes Target

Ein absorbierendes **Target** (siehe Bild F.1, Bild F.1 a, Bild F.3, Bild F.4, Bild F.5 a und Bild F.7) muss Folgendes aufweisen:

- einen geringeren Amplitudenreflexionsfaktor als 3,5 %;
- eine akustische Energieabsorption innerhalb des **Targets** von mindestens 99 %.

(Siehe auch A.5.2.2.)

5.2.3 Reflektierendes Target

Ein reflektierendes **Target** (siehe Bild F.1 b, Bild F.2, Bild F.5 b und Bild F.6) muss Folgendes aufweisen:

- einen höheren Amplitudenreflexionsfaktor als 99 %.

Ein konisches reflektierendes **Target** sollte für Leistungsmessungen von nicht fokussierenden Wandlern nicht verwendet werden, wenn $ka < 30$. Ein konischer Reflektor vom konvexen Typ mit einem Konus(-Halb-)winkel von 45° darf für Leistungsmessungen von Wandlern nicht verwendet werden, wenn $ka < 17,4$, was aus theoretischen Überlegungen zu den Einflüssen der Bündeldivergenz hervorgeht. Siehe auch A.5.3.

ANMERKUNG 1 Die genaue Bedeutung der Größe a hängt von den Gegebenheiten ab. Bei praktischen Wandlern entspricht diese dem effektiven Wandlerradius entsprechend der für das Anwendungsgebiet geltenden Definition. Bei Modellberechnungen mittels des Kolbenansatzes ist es der geometrische Kolbenradius.

Des Weiteren sollte ein konischer Reflektor vom konvexen Typ mit einem Konus(-Halb-)winkel von 45° nicht für Leistungsmessungen von fokussierenden Wandlern verwendet werden, wenn $d < 32 a$. Ist die geometrische Brennweite d nicht bekannt, dann sollte ein konischer Reflektor vom konvexen Typ mit einem Konus-Halbwinkel von 45° nicht verwendet werden, wenn der Abstand z_f des Schalldruck-Höchstwerts vom Wandler $z_f < 1/((1/(32 a)) + (\lambda a^2))$ ist.

ANMERKUNG 2 Diese Bedingung legt nahe, die Verwendung von konischen Reflektoren vom konvexen Typ auf den nicht fokussierten Fall oder den Fall mit schwacher Fokussierung zu beschränken. Wenn trotzdem ein konischer Reflektor vom konvexen Typ in stark fokussierten Feldern verwendet und Gleichung (B.5) angewendet wird, müssen von Abschnitt 7 nicht erfasste zusätzliche Unsicherheiten berücksichtigt werden. Im Fall eines schräg einfallenden Bündels (Abtastung) sollten konische Reflektoren nicht verwendet werden.

ANMERKUNG 3 Die obigen Aussagen gelten für kreisrunde Wandler. Im Fall eines rechteckigen Wandlers sollten die obigen Bedingungen zweimal betrachtet werden, indem a einmal durch b_x und dann durch b_y ersetzt wird, und das reflektierende **Target** sollte nur verwendet werden, wenn alle Bedingungen im positiven Sinn sowohl für b_x als auch für b_y erfüllt sind.

(Siehe auch A.5.2.3 und B.6.)

5.3 Target-Durchmesser

Die Querschnittsgröße des **Targets** muss groß genug zum Erfassen aller wesentlichen Teile des Feldes sein, in dem Sinne, dass die **Feldkraft** mindestens 98 % der Bezugs-**Feldkraft** beträgt, das ist die auf ein **Target** unendlicher Querschnittsgröße.

Da die Bezugs-**Feldkraft** in der Praxis oft unbekannt ist, gilt die folgende alternative Anforderung für unfokussierte Felder. Die seitliche Targetabmessung in beliebiger Richtung darf in keinem Fall weniger als das 1,5fache der entsprechenden Abmessung (z. B. des Durchmessers) des **Ultraschallwandlers** betragen.

Ob die **Target**-Abmessungen größer als das 1,5fache der Wandlerabmessungen sein sollten, hängt von den Bündelabmessungen des Feldes am Ort des **Targets** ab. Die Bündelabmessungen müssen durch Messung oder theoretische Schätzung, wie z. B. in A.5.3 angegeben, ermittelt worden sein.

Im Fall eines schräg einfallenden Bündels (Abtastung), d. h. wenn die Bündelachse gegenüber der Achse der Feldkraftwaage gekippt ist, sind größere Targetabmessungen erforderlich. In diesem Fall ist der Bündelquerschnitt am Ort des **Targets** nicht auf den Mittelpunkt des **Targets** zentriert sondern um einen gewissen Betrag verschoben, der vom Kippwinkel und dem Targetabstand abhängt, und die erforderliche Targetabmessung ist entsprechend vergrößert.

5.4 Waage/Kraftmesssystem

Die **Schallfeldkraft**-Waage kann eine gravimetrische Waage mit dementsprechender vertikaler Bündelausrichtung sein. Alternativ dazu kann die Waage auf dem Kraftrückkopplungsprinzip beruhen, was eine

waagerechte Bündelausrichtung erlaubt. Wenn die Waage bezüglich Masseinheiten kalibriert wurde, muss vom Hersteller des Schallfeldkraft-Messgerätes oder vom Anwender eine genaue Umrechnung der Waagenanzeigewerte in Kraftwerte sichergestellt werden.

ANMERKUNG Die senkrechte Bündelausrichtung erlaubt die Rückverfolgbarkeit auf nationale Massennormale (kalibrierte Gewichtsstücke). In der Praxis gibt es Messanordnungen mit horizontaler Bündelausrichtung, die entweder ein reflektierendes [5], [6] oder ein absorbierendes [7] **Target** nutzen. Die Kalibrierung kann mit einem geeigneten Waagebalkenvorsatz oder Quellen bekannter Schalleistung erfolgen.

Die verwendete Waage muss eine ausreichende Auflösung für die Größenordnung der zu messenden Ultraschalleistung haben. (Siehe A.5.4.)

5.5 Messgefäß

Wenn ein reflektierendes **Target** verwendet wird, muss das Messgefäß absorbierend ausgekleidet sein, damit zurückkehrende Reflexionen nicht mehr als 1 % zur gemessenen Gesamtleistung beitragen. (Siehe auch A.5.5.)

5.6 Target-Aufhängung

In statischen **Schallfeldkraft**-Waagen sollten die strukturellen Teile der **Target**-Aufhängung, die die **Feldkraft** durch die Wasseroberfläche leiten, so gebaut sein, dass der Einfluss der Oberflächenspannung auf weniger als 1 % der gemessenen Gesamtleistung eingeschränkt ist. (Siehe auch A.5.6.)

5.7 Wandlerhalterung

Die Halterung des **Ultraschallwandlers** muss geeignet sein, eine stabile und reproduzierbare Einstellung des **Ultraschallwandlers** in Bezug auf das **Target** sicherzustellen, damit die damit zusammenhängenden Änderungen in der gemessenen Gesamtleistung 1 % nicht überschreiten.

5.8 Abschirmfolien

Wenn eine Abschirmfolie verwendet wird, muss sie dicht am **Target** angeordnet sein und darf nicht parallel zur Oberfläche des **Ultraschallwandlers** ausgerichtet sein [8]. Ihr Durchlasskoeffizient muss durch Messung bestimmt worden sein und es muss korrigiert werden, wenn dessen Einfluss größer als 1 % der gemessenen Gesamtleistung ist. (Siehe auch A.5.8.)

ANMERKUNG In der Praxis hat sich ein Neigungswinkel von 5° bis 10° als geeignet erwiesen.

5.9 Wandlerankopplung

Der **Ultraschallwandler** muss direkt an die Messeinrichtung angekoppelt werden, damit der Einfluss auf die gemessene Gesamtleistung geringer als 1 % ist, ansonsten ist eine Korrektur vorzunehmen. (Siehe auch A.5.9.)

5.10 Kalibrierung

Der Kraftmessteil der **Schallfeldkraft**-Waage muss mittels kleiner Gewichtsstücke bekannter Masse kalibriert werden.

Darüber hinaus muss im Fall einer nicht-primären Messanordnung die **Schallfeldkraft**-Waage auch mit einem **Ultraschallwandler** bekannter **Ausgangsleistung** kalibriert werden, bei mehreren akustischen Arbeitsfrequenzen und Ausgangsleistungen im Bereich wie in Abschnitt 1 angegeben, und rückführbar auf ein primäres Messnormal. In diesem Fall muss die Kalibrierung einmal alle zwei Jahre durchgeführt werden oder öfter, wenn es einen Hinweis darauf gibt, dass sich die Empfindlichkeit der Waage in Bezug auf die Ultraschalleistung geändert hat. (Siehe auch A.5.10)

ANMERKUNG 1 In diesem Dokument bedeutet „primäres Messnormal“ eine Messeinrichtung, die an einem internationalen Schlüsselvergleich oder an einem anderen, vom CIPM/BIPM durchgeführten Vergleich teilgenommen hat.

ANMERKUNG 2 Je nach verwendeter Anordnung sollten, um angestrebte Genauigkeitsziele zu erreichen, Korrekturen angebracht werden in Bezug auf Beugung, Fokuswinkel, am **Target** vorbeilaufende oder nicht vom **Target** absorbierte/reflektierte Energie, Absorption im Wasser zwischen Wandler und **Target**, Strömung usw.

6 Anforderungen an Messbedingungen

6.1 Seitliche Target-Anordnung

Die seitliche Anordnung des **Targets** während der Messung muss in dem Maß konstant und reproduzierbar sein, dass die damit zusammenhängenden Änderungen in der gemessenen Gesamtleistung 1 % nicht überschreiten. (Siehe auch A.6.1.)

6.2 Target-Abstand vom Wandler

Der Abstand zwischen der Oberfläche des **Ultraschallwandlers** und dem **Target** oder der Folie (falls verwendet) und dem **Target** muss bekannt und in dem Maß reproduzierbar sein, dass die damit zusammenhängenden Änderungen in der gemessenen Gesamtleistung 1 % nicht überschreiten. (Siehe auch A.6.2.)

6.3 Wasser

Bei Anwendung einer **Schallfeldkraft**-Waage muss die für die Messungen verwendete Flüssigkeit Wasser sein.

Bei der Bestimmung von **Ausgangsleistungen** oberhalb von 1 W darf nur entgastes Wasser verwendet werden.

Die Entgasung des Wassers muss in einem wohl definierten Prozess erfolgen, wie in Anhang D beschrieben. Wenn entgastes Wasser erforderlich ist, muss die Menge an gelöstem Sauerstoff im Wasser bei allen Messungen < 4 mg/l betragen.

(Siehe auch A.6.3.)

6.4 Wasserkontakt

Vor Beginn der Messungen muss sichergestellt sein, dass alle Luftblasen von den aktiven Oberflächen entfernt sind. Nach Abschluss der Messungen müssen alle aktiven Oberflächen erneut sichtgeprüft werden und die Messwerte sind zu verwerfen, wenn irgendwelche Luftblasen gefunden wurden. (Siehe auch A.6.4.)

6.5 Umgebungsbedingungen

Für Messungen im Milliwatt- und Mikrowatt-Bereich muss entweder die Messeinrichtung mit einer Wärmeisolierung versehen sein oder der Messvorgang einschließlich der Datenerfassung muss in so einer Weise erfolgen, dass die thermische Drift und andere Störungen während der Messung keine größere Auswirkung als 1 % der gemessenen Gesamtleistung verursachen.

Die Messeinrichtung muss gegen Erschütterungen aus der Umgebung und Luftströmungen geschützt sein.

(Siehe auch A.6.5.)

6.6 Thermische Drift

Bei einem absorbierenden **Target** muss eine Abschätzung der thermischen Effekte auf Grund der absorbierten Schallenergie (Ausdehnung und Auftriebsänderung) durch Aufzeichnung des gemessenen Signals vor und nach dem Einschalten und Ausschalten des **Ultraschallwandlers** vorgenommen werden. (Siehe auch A.6.6.)

7 Messunsicherheit

7.1 Allgemeines

Für jede verwendete Anordnung muss individuell eine Abschätzung der Gesamt-Messunsicherheit oder eine Genauigkeitsbeurteilung gemacht werden. Diese Abschätzung sollte folgende Elemente enthalten.

Die Messunsicherheit muss mit Hilfe des ISO Guide [9]^{N2)} beurteilt werden.

7.2 Waagensystem einschließlich Target-Aufhängung

Das Waagensystem muss mittels kleiner Gewichtsstücke bekannter Masse überprüft oder kalibriert werden, wobei das gesamte System wie für die **Feldkraft**-Messung vorbereitet sein muss, d. h. mit dem im Wasser hängenden **Target**.

Dieser Vorgang muss mehrfach mit jedem Gewichtsstück wiederholt werden, um ein Maß für die zufällige Streuung der Ergebnisse zu erhalten. Aus den Ergebnissen dieser Kalibrierung und aus der Massenunsicherheit der verwendeten Gewichtsstücke muss eine Unsicherheitsabschätzung des Kalibrierfaktors der Waage abgeleitet werden.

Die Ergebnisse dieser Überprüfungen sollten aufbewahrt werden, um eine Beurteilung der langfristigen Stabilität des Kalibrierfaktors der Waage zu ermöglichen.

(Siehe auch A.7.2.)

7.3 Linearität und Auflösung des Waagensystems

Die Linearität des Waagensystems muss mindestens alle sechs Monate wie folgt geprüft werden.

Die in 7.2 beschriebene Messung muss innerhalb des interessierenden Waagen-Messbereichs mit mindestens drei Gewichtsstücken verschiedener Masse durchgeführt werden. Die Waagenanzeige als Funktion der verwendeten Masse kann in einer grafischen Darstellung entsprechend Bild 2 wiedergegeben werden. Die sich ergebenden Punkte in dieser Darstellung sollten idealerweise auf einer Geraden liegen, die im Koordinatenursprung beginnt. Wenn Abweichungen von dieser Geraden auftreten, so muss hieraus ein zusätzlicher Unsicherheitsbeitrag abgeleitet werden.

Da Gewichtsstücke mit weniger als 10 mg schwierig zu handhaben sind, kann die Linearitätsprüfung der Waage auch mit Hilfe eines **Ultraschallwandlers** mit bekannten Eigenschaften durchgeführt werden, der mit Spannungen unterschiedlicher Amplitude angeregt wird, wodurch unterschiedlich große Schallfeldkräfte erzeugt werden. In diesem Fall ist die „Eingangsgroße“ an der Abszisse von Bild 2 die Ultraschall-**Ausgangsleistung** des Wandlers, deren Unsicherheit zu berücksichtigen ist.

Die endliche Auflösung der Waage führt zu einem Beitrag zur Leistungs-Unsicherheit, der in der Unsicherheitsanalyse berücksichtigt werden muss.

^{N2)} Nationale Fußnote: Siehe DIN V ENV 13005, *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*.

7.4 Extrapolation auf den Schaltzeitpunkt des Ultraschallwandlers

Zur Ermittlung des Wertes der **Feldkraft** wird im Fall einer elektronischen Waage das Waagen-Ausgangssignal üblicherweise als Funktion der Zeit aufgezeichnet und auf den Schaltzeitpunkt des **Ultraschallwandlers** zurückextrapoliert. Mit dieser Extrapolation ist eine Unsicherheit verbunden, die hauptsächlich von den Störschwankungen des Waagen-Ausgangssignals abhängt (Signal-Rausch-Verhältnis). Die Unsicherheit des Extrapolationsergebnisses muss mit den üblichen mathematischen Verfahren in Verbindung mit dem Regressionsalgorithmus abgeschätzt werden.

7.5 Target-Unvollkommenheiten

Der Einfluss von **Target**-Unvollkommenheiten muss mittels einer annähernd ebenen Welle abgeschätzt werden, wie in A.7.5 beschrieben.

7.6 Form des reflektierenden Targets

Der Einfluss des reflektierenden **Targets** muss abgeschätzt und in der Gesamtunsicherheit des Systems berücksichtigt werden. (Siehe A.7.6.)

7.7 Seitliche Absorber im Fall von Messungen mit reflektierendem Target

Die Unvollkommenheiten der seitlichen Absorber in der Anordnung nach Bild F.1 b, Bild F.2, Bild F.5 b und Bild F.6 müssen abgeschätzt und in der Gesamtunsicherheit des Systems berücksichtigt werden. (Siehe A.7.7.)

7.8 Fehlausrichtung des Targets

Der Einfluss der Fehlausrichtung des **Targets** muss abgeschätzt und in der Gesamtunsicherheit des Systems berücksichtigt werden. (Siehe A.7.8.)

7.9 Fehlausrichtung des Ultraschallwandlers

Der Einfluss der Fehlausrichtung des **Ultraschallwandlers** muss abgeschätzt und in der Gesamtunsicherheit des Systems berücksichtigt werden. (Siehe A.7.9.)

7.10 Wassertemperatur

Die von der Wassertemperatur hervorgerufene Unsicherheit muss abgeschätzt und in der Gesamtunsicherheit des Systems berücksichtigt werden. (Siehe A.7.10.)

7.11 Ultraschallschwächung und akustische Strömung

Die von der Ultraschallschwächung und der **akustischen Strömung** hervorgerufene Unsicherheit muss abgeschätzt und in der Gesamtunsicherheit des Systems berücksichtigt werden. (Siehe A.7.11.)

7.12 Folieneigenschaften

Wenn bei **Feldkraft**-Messungen eine Kopplungs- oder Abschirmfolie verwendet wird, so muss der gemessene oder abgeschätzte Durchgangsverlust der Folie berücksichtigt werden sowie jede mögliche Wirkung der reflektierten Welle auf den **Ultraschallwandler**. Die auf diese Effekte zurückzuführende Unsicherheit muss individuell beurteilt und in der Gesamtunsicherheit des Systems berücksichtigt werden.

7.13 Endliche Target-Größe

Der Einfluss der Unsicherheit der endlichen **Target**-Größe muss abgeschätzt und in der Gesamtunsicherheit des Systems berücksichtigt werden. (Siehe A.7.13.)

7.14 Annahme ebener Wellen

Der Unsicherheitsbeitrag auf Grund der Annahme einer ebenen Welle muss bestimmt und in der Gesamtunsicherheit des Systems berücksichtigt werden. (Siehe A.7.14.)

7.15 Einfluss der Abtastung

In Abschnitt B.7 werden Vorkehrungen für Leistungsmessungen mit absorbierendem **Target** direkt im Abtast-Modus getroffen. Dies setzt die Konstanz der Bündelparameter während der Abtastung und die Kenntnis der Abtastwinkel voraus. Das Ausmaß, in dem diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind, und die damit verbundenen Unsicherheiten müssen ermittelt und in die Gesamt-Unsicherheit mit aufgenommen werden.

7.16 Umgebungseinflüsse

Die Unsicherheiten auf Grund von Erschütterungen der Umgebung, Luftströmungen oder Temperaturschwankungen müssen abgeschätzt und in der Gesamtunsicherheit des Systems berücksichtigt werden. (Siehe A.7.16.)

7.17 Messung der Anregungsspannung

Wenn die an den **Ultraschallwandler** angelegte Anregungsspannung gemessen wird und deren Wert für das Ergebnis der Ultraschalleistungsmessung von Bedeutung ist, muss deren Messunsicherheit abgeschätzt und in der Gesamtunsicherheit des Systems berücksichtigt werden. (Siehe A.7.17.)

7.18 Temperatur des Ultraschallwandlers

Wenn bei verschiedenen Temperaturen gemessene Werte der Ultraschalleistung verglichen werden sollen, muss die Temperaturabhängigkeit der Leistung überprüft und ihr Einfluss berücksichtigt werden. (Siehe auch A.7.18.)

7.19 Nichtlinearität

Der mögliche Einfluss von Nichtlinearitäten bezüglich Folgendem muss beurteilt und erforderlichenfalls in der Gesamtunsicherheit des Systems berücksichtigt werden:

- a) Linearität des Waagensystems einschließlich **Target**-Aufhängung;
- b) nicht lineare Beiträge auf Grund unzureichend entgasten Wassers;
- c) Ultraschallschwächung und **akustische Strömung**;
- d) die theoretischen **Feldkraft**-Beziehungen selbst.

(Siehe auch A.7.19.)

7.20 Andere Quellen

Es sollte regelmäßig überprüft werden, ob die nach den obigen Anleitungen ermittelte Gesamtunsicherheit, wie in 7.2 bis 7.19 festgelegt, nicht von irgendwelchen anderen Quellen zufälliger Streuung beeinflusst wird. (Siehe auch A.7.20.)

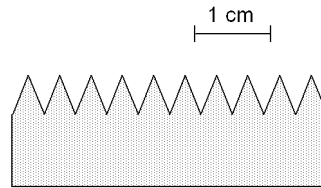
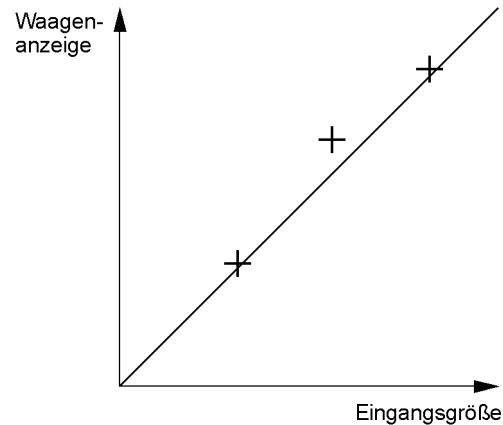


Bild 1 – Schnitt durch ein absorbierendes Target



ANMERKUNG Bei einer Linearitätsprüfung mittels kleiner Gewichtsstücke bekannter Masse ist die Eingangsgröße die Masse der verwendeten Gewichtsstücke. Bei einer Linearitätsprüfung mittels der **Feldkraft** des von einem **Ultraschallwandler** mit bekannten Eigenschaften emittierten Ultraschallfeldes ist die Eingangsgröße die Ultraschall-**Ausgangsleistung** des Wandlers.

Bild 2 – Linearitätsprüfung: Waagenanzeige als Funktion der Eingangsgröße

Anhang A (informativ)

Zusätzliche Angaben zu verschiedenen Gesichtspunkten der Schallfeldkraft-Messungen

Dieser Anhang enthält zusätzliche Angaben zu den Festlegungen in der vorliegenden Norm, die für die praktische Messung der Ultraschallleistung hilfreich sind. Die Abschnitte entsprechen der Anordnung des Hauptteils der Norm.

A.1 Anwendungsbereich

ANMERKUNG Die **Schallfeldkraft** ist gleich der Änderung des zeitlich gemittelten Impulsstroms [4] und ist so mit der Ultraschallintensität und -leistung verknüpft.

A.2 Normative Verweisungen

(Leer)

A.3 Begriffe

(Leer)

A.4 Liste der Formelzeichen

(Leer)

A.5 Schallfeldkraft-Waagen

A.5.1 Allgemeines

(Leer)

A.5.2 Target-Typ

A.5.2.1 Allgemeines

Ziel ist es üblicherweise, sich möglichst weit einem der beiden Extremfälle anzunähern: idealer Absorber oder idealer Reflektor [10]. Die Kompressibilität sollte so gering wie möglich sein, um Auftriebsänderungen als Folge von Schwankungen des Umgebungsdrucks zu vermeiden. Auch in anderer Hinsicht sollte der Auftrieb des **Targets** möglichst konstant gehalten werden.

Um Leistungsmessungen mit vorhersehbarer Unsicherheit durchzuführen, muss die Wahl des **Target**-Typs in Abhängigkeit von der Weise, in der das Ultraschallbündel vom theoretischen Ansatz der ebenen Welle abweicht, getroffen werden. Insbesondere die Verwendung eines reflektierenden **Targets** kann zu unvermeidbaren Unsicherheiten führen (siehe 5.2.3).

A.5.2.2 Absorbierendes Target

Scheiben aus geeignetem elastischem Gummimaterial mit oder ohne Keile werden normalerweise als absorbierende **Targets** verwendet. Zur Erhöhung der Absorptionseigenschaften kann das Material Inhomogenitäten enthalten.

Bild 1 zeigt ein Beispiel für einen Aufbau eines Absorbers mit Keilen. In diesem Fall steigt die Volumenkonzentration der Inhomogenitäten von null, in den Keilen, auf 30 % an der Rückseite. In diesem Beispiel werden hohle Glaskugeln als Inhomogenitäten mit einem Durchmesser in der Größenordnung von 0,1 mm verwendet. Diese haben nur einen geringen Einfluss auf die Dichte und Kompressibilität des elastischen Gummimaterials.

Andere Absorber-Typen sind in [11] und [12] beschrieben.

Bei Ultraschallbündeln, die höhere Leistungen als 10 W übertragen oder hohe örtliche Leistungsdichten aufweisen, wurde nachgewiesen, dass sie einen sehr starken Temperaturanstieg im Absorber erzeugen, der zu einer Beschädigung und zu Änderungen der akustischen Eigenschaften führen kann. Es wurden Temperaturanstiege > 50 °C beobachtet.

A.5.2.3 Reflektierendes Target

Das Hauptproblem ist die Verminderung der Kompressibilität eines reflektierenden **Targets**, denn Schwankungen des Luftdrucks verändern das Volumen und damit den Auftrieb des **Targets**, und zwar proportional zu dessen Kompressibilität. Ebene Schallreflektoren, die als doppelwandige, dünne Metallplatten mit Lufteinschluss realisiert werden, sollten nicht verwendet werden. Der Gebrauch von massiven Metallplatten als Reflektoren mit einem Einfallswinkel bezüglich des Schallbündels von 45° kann zu Fehlern führen [13], wegen beträchtlicher und frequenzabhängiger Durchlässigkeit der Platte.

Konische Reflektoren aus dickwandigen, hohlen Körpern oder aus dünnen Metallplatten mit Lufteinschluss sind geeignet. Konische Reflektoren aus sehr steifem Kunststoffschäum mit sehr dünnem, galvanischem Metallüberzug haben sich als geeignete **Targets** erwiesen [10].

Reflektierendes Target – konvex

Ein konischer Reflektor vom konvexen Typ ist in Bild F.1 b, Bild F.2 und Bild F.6 gezeigt. Der Konus-Halbwinkel wird typischerweise zu 45° gewählt, so dass die reflektierte Welle rechtwinklig von der Bündelachse wegläuft.

Reflektierendes Target – konkav

Ein konischer Reflektor vom konkaven Typ ist in Bild F.5 b gezeigt. Der Konus-Halbwinkel wird typischerweise zwischen 60° und 65° gewählt, so dass die reflektierte Welle näher zum **Ultraschallwandler** hin orientiert ist als beim konvexen Reflektor.

A.5.3 Target-Durchmesser

A.5.3.1 Runder Kolbenmembran-Wandler

Im Folgenden wird eine Abschätzungsgleichung [14] für den Mindestwert des **Target**-Radius r angegeben, der zu einer **Schallfeldkraft** führt, die wenigstens 98 % derjenigen **Schallfeldkraft** beträgt, die bei unendlich großem **Target**-Querschnitt existieren würde (d. h. Messabweichung kleiner als 2 %). Die Gleichung gilt für ein rundes, absorbierendes **Target** in einem kontinuierlich schwingenden Feld eines runden Kolbenmembran-**Ultraschallwandlers** vom Radius a in einem absorptionsfreien Medium. Die Gleichung lautet:

$$r = a [1/(1 + 0,53 \tau_1 s) + \tau_1 s] \quad (\text{A.1})$$

mit

$$\eta = 0,98 + 0,01 \pi k a$$

$$\tau_1 = \tau_0 + \Delta \tau$$

$$\tau_0 = k a / (2 \pi \cdot (\eta^2 - 1)^{1/2})$$

$$\Delta \tau = \begin{cases} 0,7 & \text{für } k a \leq 9,3 \\ 6,51 / k a & \text{für } 9,3 \leq k a \leq 65,1 \\ 0,1 & \text{für } 65,1 \leq k a \end{cases}$$

Dabei ist

- z Abstand zwischen **Ultraschallwandler** und **Target**;
- λ die Ultraschallwellenlänge im Schall führenden Medium;
- $k = 2\pi/\lambda$, die Kreiswellenzahl;
- $s = z/\lambda a^2$, der normierte Abstand zwischen **Ultraschallwandler** und **Target**.

ANMERKUNG Einige Symbole sind hier gegenüber früheren Ausgaben geändert.

Gleichung (A.1) kann auch nach s aufgelöst werden und liefert dann einen Höchstwert des normierten Abstandes zwischen **Target** und **Ultraschallwandler** für ein **Target** mit gegebenem Radius r . Der Einfluss von Absorption und **akustischer Strömung** wird getrennt betrachtet.

Zur Vorsicht und entsprechend 5.3 sollte r nie unter $1,5 a$ reduziert werden, selbst wenn dies nach der oben angegebenen Gleichung möglich wäre.

Genau genommen gelten oben stehende Gleichungen für ein absorbierendes **Target**, dürfen jedoch auch für die Entscheidung genutzt werden, ob ein reflektierendes **Target** für Messungen im Fall eines divergierenden Strahlenbündels geeignet ist. r sollte dann als der Radius des größten **Target**-Querschnitts (im Fall eines konvex-konischen Reflektors würde dies der Kegelgrundfläche entsprechen) und z als der Abstand dieses Querschnitts vom Wandler angesehen werden.

Im Fall eines konvex-konischen 45°-Reflektors besteht ein bestimmter ka -Grenzwert des Wandlers, unter dem die Anforderungen dieser Gleichungen unabhängig von der Reflektorgröße niemals erfüllt werden können, selbst bei der nahesten möglichen Anordnung der Reflektorspitze, d. h. in Kontakt mit der Wandleroberfläche. Dieser Grenzwert ist $ka = 17,4$.

A.5.3.2 Rechteckiger Kolbenmembran-Wandler

Formel (A.1) kann wie folgt auf den Fall eines rechteckigen Kolbenmembran-Wandlers übertragen werden. Dies gilt für ein rundes absorbierendes **Target** vom Radius r . Die Formel gibt wiederum einen Mindest-Targetradius, so dass die **Schallfeldkraft** mindestens 98 % derjenigen auf ein unendlich ausgedehntes **Target** beträgt.

$$r = h_d / (1 + \mu \tau_1 s) + h_h \tau_1 s \quad (\text{A.2})$$

mit

$$\mu = 0,53 h_h / h_d$$

$$\eta = 0,98 + 0,01 \pi k h_h$$

$$\tau_1 = \tau_0 + \Delta \tau$$

$$\tau_0 = k h_h / (2 \pi \cdot (\eta^2 - 1)^{1/2})$$

$$\Delta \tau = \begin{cases} 0,7 & \text{für } k h_h \leq 9,3 \\ 6,51 / k h_h & \text{für } 9,3 \leq k h_h \leq 43,4 \\ 0,15 & \text{für } 43,4 \leq k h_h \end{cases}$$

Dabei ist

$s = z \lambda / h_h^2$ ein formaler Ausdruck, der hier nicht notwendigerweise mit der Nahfeldlänge verbunden ist;

$h_h = 2 / (1/b_x + 1/b_y)$ der harmonische Mittelwert der halben Wandlerabmessungen;

$h_d = (b_x^2 + b_y^2)^{1/2}$ die halbe Wandlerdiagonale

Zur Vorsicht und entsprechend 5.3 sollte r nie unter $1,5 h_d$ reduziert werden, selbst wenn dies nach der oben angegebenen Gleichung möglich wäre.

A.5.3.3 Runder fokussierender Wandler

In diesem Fall ist die Abschätzung (nach [15]) für den Mindestradius r eines runden absorbierenden **Targets** unterschiedlich von der in Abschnitt A.5.3.1. Das Kriterium ist wiederum, dass die **Schallfeldkraft** mindestens 98 % derjenigen auf ein unendlich ausgedehntes **Target** betragen soll. Die Größen a , d , k , z und γ wie in Abschnitt 4 erklärt sind beteiligt; d und z werden hier so verstanden, dass sie von der durch den Rand des aktiven Wandlers definierten Ebene aus gezählt werden.

ANMERKUNG 1 Wenn im Fall eines sphärisch gekrümmten Wandlers die Brennweite und der Targetabstand vom „Boden“ der „Schüssel“ aus gezählt werden, so müssen d und z wie hier zu verwenden erst durch Subtraktion der Schüsseltiefe berechnet werden.

Die Abschätzung gilt für den Abstandsbereich zwischen $z/d = 0$ und $z/d = 2$. Der erforderliche Targetradius r/a bezogen auf den Wandlerradius beträgt für vier Werte von z/d wie folgt:

$$r/a = 1 \quad \text{für } z/d = 0 \quad (\text{A.3})$$

$$r/a = 0,5 + 6,24 \cdot (ka \sin \gamma)^{-0,885} \quad \text{für } z/d = 0,5 \quad (\text{A.4})$$

$$r/a = 12,54 \cdot (ka \sin \gamma)^{-0,749} \quad \text{für } z/d = 1 \quad (\text{A.5})$$

$$r/a = 1 + 29,1 \cdot (ka \sin \gamma)^{-0,892} \quad \text{für } z/d = 2 \quad (\text{A.6})$$

Wenn der tatsächliche Targetabstand zwischen zwei der obigen z/d -Werten liegt, sind die entsprechenden r/a -Werte linear zu interpolieren.

ANMERKUNG 2 Die obige Abschätzung gilt nicht, wenn der Wandler eine zentrale Öffnung hat.

A.5.4 Waage/Kraftmesssystem

Der benötigte Waagentyp hängt stark von der Größe der zu messenden Ultraschallleistung ab. Ein Leistungswert von 10 mW entspricht einer **Feldkraft** (in Wasser und auf ein absorbierendes **Target**) von $6,7 \mu\text{N}$, entsprechend einem Massenäquivalent von 0,68 mg, während ein Leistungswert von 10 W eine **Feldkraft** von 6,7 mN bedeutet, entsprechend einem Massenäquivalent von 0,68 g. Im ersten Fall ist eine elektronische, selbst kompensierende Mikrowaage das am besten geeignete Instrument, während im letzteren Fall eine geeignete elektronische Waage oder eine rein mechanische Laborwaage [15] verwendet werden kann. In jedem Fall ist eine Kompensation der Positionsänderung des **Targets** wesentlich.

Wenn die Waage/Kraftmesseinrichtung mittels kleiner Gewichte bekannter Masse kalibriert wird oder aus anderen Gründen die Anzeige der Waage/Kraftmesseinrichtung Masseneinheiten ausgibt, muss das Messergebnis in Masseneinheiten mit der Erdbeschleunigung g multipliziert werden, um es in eine Kraft umzuwandeln. Wenn das Messergebnis in Milligramm (bzw. in Gramm) angegeben ist, liefert die Multiplikation mit g eine Kraft in Mikronewton (bzw. in Millinewton). Wenn die Kraft in eine **Feldkraft** nach den in Anhang B angegebenen Gleichungen umgerechnet wird, führt die Verwendung eines Wertes der Schallgeschwindigkeit in Meter je Sekunde, wie z. B. $c = 1\,491 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in reinem Wasser bei 23°C , dann zu einer Leistung in Mikrowatt (bzw. Milliwatt).

ANMERKUNG Der Zahlenwert von g hängt vom Standort der **Schallfeldkraft**-Waage ab. Es muss der zutreffende Wert eingesetzt werden, der z. B. in Mitteleuropa $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ beträgt, wobei die Höhenlage noch nicht berücksichtigt ist.

A.5.5 Messgefäß

Es ist sicherzustellen, dass weder das **Target** noch die anderen Teile der Messeinrichtung wesentliche Ultraschallreflexionen erzeugen oder die reflektierten Wellen in solche Richtungen ausgesandt werden, dass sie nicht zum **Ultraschallwandler** zurückkehren und auf ihn einwirken. Ansonsten würde die gemessene Leistung im Allgemeinen nicht gleich dem gewünschten **Freifeld**-Wert sein.

Wenn ein reflektierendes **Target** verwendet wird, sind die Reflexionen an den Gefäßwänden kritisch. Deren Einfluss auf die gemessene Leistung hängt von der Gefäßgeometrie ab. Wenn das Messgefäß einen runden Querschnitt hat, können alle Reflexionen zurück auf das **Target** gerichtet sein (und über das reflektierende **Target** auf den Wandler). In diesem Fall führt die in 5.5 gestellte 1-%-Anforderung wieder zu einer Anforderung von $\leq 1\%$ Energie-Reflexionsvermögen der Gefäßwandung einschließlich Auskleidung.

Im Fall der direkten Aufstellung des Messgefäßes auf der Wägeschale, siehe Aufbau in Bild F.4, sollte darauf geachtet werden, das Gefäß genau mittig auf der Wägeschale anzuordnen.

A.5.6 Target-Aufhängung

Wenn das **Target** an Drähten hängt, die die Flüssigkeitsoberfläche durchstoßen, so sollte ihr Durchmesser zur Reduzierung von Messfehlern, die durch eine unvollkommene Benetzung des Drahtes oder durch Staubpartikel verursacht werden können, so klein wie möglich sein. Die Verwendung eines kleinen Drahtdurchmessers ist noch wichtiger, wenn der **Ultraschallwandler** oberhalb des **Targets** angeordnet ist (Strahlrichtung abwärts) und mehrere Aufhängedrähte benötigt werden, wie in Bild F.5.

ANMERKUNG 1 Platin-Iridium-Draht mit einem Durchmesser von 60 µm bis 80 µm ist geeignet.

ANMERKUNG 2 Der Einfluss von Aufhängedrähten kann durch Kalibrierung des Systems mit Gewichtsstücken bekannter Masse und dem im Wasser hängenden **Target** nach 7.2 und A.7.2 überprüft werden.

ANMERKUNG 3 Spezielle Aufmerksamkeit muss dem in Bild F.4 dargestellten Aufbau gelten. Die Außenoberfläche des Wandlers wird in diesem Fall zu den störenden Oberflächenspannungskräften beitragen. Es sollte eine Verzögerung des Messbeginns zugelassen werden, damit sich der Wasserspiegel stabilisieren kann.

A.5.7 Wandlerhalterung

(Leer)

A.5.8 Abschirmfolien

Zwei Strömungstypen können relevant sein: die Wärmekonvektionsströmung, wie z. B. im Fall der Erwärmung eines **Ultraschallwandlers** während der Ultraschallabstrahlung, und die **akustische Strömung**, die mit der Ultraschallschwächung verknüpft ist und deshalb hauptsächlich im Hochfrequenzbereich auftritt.

Akustische Strömung kann auftreten, wenn die Energieaufnahme entlang des Schallweges nicht vernachlässigt werden kann (langer Schallweg und/oder hohe Frequenz [17]). Ihr Einfluss kann durch (a) Korrektur des **Schallfeldkraft**-Ergebnisses, (b) Verwendung einer Abschirmfolie oder (c) Variieren des **Target**-Abstandes und Extrapolation des **Schallfeldkraft**-Ergebnisses auf den Nullabstand ausgeglichen werden.

Wenn eine Folie verwendet wird, muss deren Dicke so gering wie möglich sein, um ihre Durchlasseigenschaften zu optimieren. Dieser Gesichtspunkt ist bei hohen Frequenzen von besonderer Bedeutung.

A.5.9 Wandlerankopplung

Für Präzisionsmessungen sollte der **Ultraschallwandler** direkt an die Messflüssigkeit angekoppelt werden, um die Impedanztransformation zu vermeiden, die bei einer zusätzlichen Kopplungsfolie auftreten kann. Dies

ist bei hochempfindlichen, hochgenauen Waagen, bei denen das Ultraschallbündel vertikal aufwärts gerichtet ist ([18], [19], Bild F.1), besonders wichtig. Die Vermeidung der Impedanztransformation einer zusätzlichen Kopplungsfolie ist besonders bei Messungen an **Ultraschallwandlern** hoher Güte wichtig.

Detaillierte technische Zeichnungen einer bewährten günstigen Messanordnung mit einer Koppelmembran werden in [20] angegeben. Sie sollten für die meisten praktischen Messungen an Breitband-**Ultraschallwandlern** gut geeignet sein, vorausgesetzt, die Abschirmfolie ist nach 5.8 richtig angeordnet und ihre Wirksamkeit ist unabhängig davon nachgeprüft.

A.5.10 Kalibrierung

Kalibrierung mit Gewichtsstücken bekannter Masse bedeutet eine Überprüfung der Waage selbst. Kalibrierung mit einem Ultraschall-Referenzwandler bedeutet eine Überprüfung des gesamten Messsystems einschließlich **Target**.

A.6 Messbedingungen

A.6.1 Seitliche Target-Anordnung

Bei einem reflektierenden **Target** vom konvex-konischen Typ sollte beachtet werden, dass das **Target** vom Ultraschallbündel dezentriert werden kann. Das **Target** kann in ein Gebiet geringerer Intensität verschoben werden, und der Einfallswinkel des Schallbündels, bezogen auf das **Target**, kann sich ändern.

Dieser Effekt hängt hauptsächlich von der abgestrahlten Leistung und von der Verteilung lokaler Intensitäten ab sowie von der Art der für das **Target** verwendeten Aufhängung.

A.6.2 Target-Abstand vom Wandler

Der Abstand zwischen der Oberfläche des **Ultraschallwandlers** und dem **Target** oder der Folie (falls verwendet) und dem **Target** muss, angesichts der Tatsache, dass die störende **akustische Strömung** durch die Ultraschallabsorption entlang dem Schallweg verursacht wird, so klein wie möglich sein.

Ein absorbierendes **Target** kann immer nahe genug am **Ultraschallwandler** angeordnet werden, um jede Schwierigkeit mit einer divergenten Feldstruktur auszuschließen.

Bei einem reflektierenden **Target** vom konkav-konischen Typ ist es wesentlich, jede Rückwirkung der reflektierten Welle auf den **Ultraschallwandler** zu vermeiden. Dieser **Target**-Typ muss deshalb einen solchen Abstand haben, dass diese Rückwirkung vermieden wird [21]. Dieser Mindestabstand hängt von den individuellen Einzelheiten ab und muss deshalb individuell abgeschätzt werden.

Andererseits kann die Spitze eines konvexen reflektierenden **Targets** praktisch bis zum Kontakt mit der Oberfläche des **Ultraschallwandlers** angenähert werden, aber dies bedeutet nicht, dass das **Target** den ganzen Halbraum abdeckt, in den der **Ultraschallwandler** emittiert. Selbst wenn (im Fall einer divergenten Feldstruktur) fast das gesamte Feld den konvexen Konus erreicht, kann dies unter Einfallswinkeln geschehen, die von der Gleichung für ebene Wellen abweichen, und dies kann zu einer Verminderung der tatsächlichen **Feldkraft** führen. Wenn irgendein Verdacht besteht, dass das Feld des besagten **Ultraschallwandlers** nicht kollimiert genug ist (dies kann hauptsächlich bei kleinen ka -Werten, also bei kleinen Frequenzen und/oder einem kleinen Durchmesser des **Ultraschallwandlers**, geschehen), sollte der Abstand zwischen **Ultraschallwandler** und **Target** variiert werden und wiederholte Messungen gemacht werden. Jede Abnahme der **Feldkraft** mit wachsendem Abstand, die über diejenige durch Ultraschall-Abschwächung hinausgeht, ist ein Hinweis auf ungeeignete Größe oder Typ des **Targets**.

Bei Verwendung eines absorbierenden **Targets** für Hochleistungsmessungen sollte der Wandler-**Target**-Abstand nicht weniger als 8 mm betragen. Der absorbierte Ultraschall wird den Absorber erwärmen. Bei geringen Abständen könnten sich die Wandlereigenschaften durch direkte Wärmeübertragung vom Absorber ändern.

A.6.3 Wasser

Für **Ausgangsleistungen** über 1 W wird die Verwendung von entgastem Wasser festgelegt, um Kavitation zu vermeiden. Bei geringeren **Ausgangsleistungen** ist entgastes Wasser für Präzisionsmessungen vorzuziehen, jedoch kann destilliertes Wasser ohne zusätzliche Entgasung in vielen Fällen verwendet werden, wenn darauf geachtet wird, dass keine Luftblasen an den Oberflächen des **Ultraschallwandlers** oder des **Targets** vorhanden sind.

ANMERKUNG 1 Die Menge an gelöstem Sauerstoff im Wasser nimmt mit der Zeit zu, siehe Anhang D. Die Zunahmegeschwindigkeit hängt von den Maßen des Messgefäßes und den Wasserturbulenzen ab.

ANMERKUNG 2 Die Verwendung eines Zusatzstoffes zum Unterdrücken der Kavitation ist in D.4 beschrieben.

ANMERKUNG 3 Wenn das verwendete Wasser mit Luft gesättigt ist, werden sich bei Temperaturanstieg während der Messungen Luftblasen bilden, weil die Gaslöslichkeit mit steigender Temperatur abnimmt.

A.6.4 Wasserkontakt

Eine vollständige Benetzung (Wasserkontakt) der Oberfläche des **Ultraschallwandlers**, des **Targets** und der Folie sollte durch Lagerung dieser Teile für wenigstens mehrere Stunden in entgastem Wasser vor den Messungen erreicht werden.

ANMERKUNG Die Entgasung eines absorbierenden **Targets** zusammen mit dem Wasser verhindert mögliche Benetzungsprobleme des Absorbermaterials.

A.6.5 Umgebungsbedingungen

Außerdem sollte das Messgefäß weitestgehend geschlossen sein, um Wärmekonvektionsströmungen in der Messflüssigkeit zu vermeiden, die als Folge der Abkühlung bei Verdampfung an der Flüssigkeitsoberfläche auftreten.

Im Fall eines Messaufbaus nach Bild F.4 kann es schwierig oder unmöglich sein, das Messgefäß zu schließen, und die daraus folgende Drift der Waagenanzeige auf Grund der Verdunstung an der Flüssigkeitsoberfläche muss dementsprechend korrigiert werden.

Die Temperatur der Messflüssigkeit (Wasser) sollte gemessen werden. Der für die Berechnung der Leistungsergebnisse benötigte Wert der Schallgeschwindigkeit in Wasser hängt von der Temperatur ab. (Siehe auch A.7.10.)

ANMERKUNG Der Einfluss von Erschütterungen und Luftströmung kann an der Waagenanzeige einfach abgelesen werden.

A.6.6 Thermische Drift

Dies kann unter bestimmten Umständen auch für reflektierende **Targets** gelten, wenn auch in geringerem Ausmaß.

ANMERKUNG Der Einfluss der **Target**-Auftriebsänderung ist in der in Bild F.4 gezeigten Waagenanordnung viel geringer, aber auch hier wird eine Aufzeichnung der Waagenanzeige als Funktion der Zeit empfohlen.

A.7 Messunsicherheit

A.7.1 Allgemeines

(Leer)

A.7.2 Waagensystem einschließlich Target-Aufhängung

Diese Anforderung stellt sicher, dass der Einfluss des Aufhängedrahtes, der durch die Wasseroberfläche tritt, automatisch berücksichtigt wird.

A.7.3 Linearität und Auflösung des Waagensystems

(Leer)

A.7.4 Extrapolation auf den Schaltzeitpunkt des Ultraschallwandlers

(Leer)

A.7.5 Target-Unvollkommenheiten

Genau genommen wäre die Kenntnis des Impulses, der von allen unerwünschten, vom **Target** ausgehenden Wellen in alle Richtungen fortgetragen wird, nötig, um den Einfluss von **Target**-Unvollkommenheiten auf die Messgenauigkeit der **Feldkraft**-Waage abzuschätzen. Da diese Kenntnis in der Praxis nicht vorliegt, wird eine vereinfachte ebene Wellen-Näherung wie im Folgenden beschrieben als ausreichend angesehen. Unter der Annahme ebener Wellen ist der **Schallfelddruck** gleich der akustischen Gesamt-Energiedichte. Die Welle, die von einem absorbierenden **Target** (siehe Bild F.1 a) in Vorwärtsrichtung durchgelassen wird, führt zu einer Verringerung der **Feldkraft**, wobei diese Verringerung durch die durchgelassene Energiedichte, d. h. durch die resultierende Energiedichte hinter dem **Target**, bestimmt ist. Das Ausmaß dieses Effektes kann ermittelt werden, indem man das **Target** als Hindernis benutzt und eine **Feldkraft**-Messung mittels eines zusätzlichen **Targets** durchführt, das hinter dem ursprünglichen angeordnet ist. Es sollte beachtet werden, dass die Reflexion der durchgelassenen Welle an der Wasseroberfläche in der in Bild F.1 a gezeigten Anordnung zu einer Verdoppelung der Verringerung der gemessenen **Feldkraft** führt.

Die Welle, die von einem absorbierenden **Target** reflektiert oder zurückgestreut wird, führt zu einer Zunahme der **Feldkraft**, die durch die reflektierte Energiedichte bestimmt ist. Bei einem ebenen, absorbierenden **Target** kann dieser Effekt durch Vergleich des Puls-Echo-Signals mit dem eines perfekten Reflektors abgeschätzt werden. Bei einem **Target** mit einer Oberflächenstruktur liefert diese Messung jedoch nur den räumlich kohärenten Anteil und nicht die gesamte reflektierte Energie. In diesem Fall müsste die reflektierte Energie durch Abtastung mit einem Hydrophon und Integration des Quadrats des gemessenen Drucks über das reflektierte Feld abgeschätzt werden. Alternativ könnten andere Informationen über die Absorbereigenschaften verwendet werden, um eine obere Grenze für Reflexionseffekte anzugeben (z. B. das Reflexionsvermögen einer gleichwertigen ebenen Ausführung). Zusätzlich zur Erhöhung der gemessenen Leistung kann die vom **Target** reflektierte Welle auf den **Ultraschallwandler** rückwirken und zu einer Änderung seiner Ausgangsgrößen führen [8]. Dieser Interferenzeffekt kann durch eine geringfügige Schrägstellung des **Targets** oder durch Verwendung eines besseren **Targets** minimiert werden. Beim Auftreten dieser Interferenz gibt es Oszillationen der **Feldkraft**, die durch Variation der Frequenz oder des **Ultraschallwandler-Target**-Abstandes beobachtet werden können [8]. Die Unsicherheit als Folge noch vorhandener Interferenzeffekte kann aus den Oszillationsamplituden abgeschätzt werden.

ANMERKUNG Die Reflexions- oder Rückstreueigenschaften eines absorbierenden **Targets** können vom Einfallswinkel abhängen. Dies ist im Fall eines schräg einfallenden Bündels (Abtastung) wichtig. Das kann mit einem gut gebündelten Wandler überprüft werden, wenn man ihn in einer Linie mit der Kraftmesseinrichtung anordnet und dann das absorbierende **Target** kippt (aber nicht den Wandler und die Waage). Der Kippwinkel ist nicht zu groß zu wählen, so dass das **Target** das ganze Bündel überdeckt, auch im gekippten Zustand. Bei einem perfekten Absorber würde das Ergebnis nicht vom Kippwinkel abhängen.

Im Fall eines reflektierenden **Targets** ist die vorstehende Diskussion der durchgelassenen Welle und ihres Einflusses ebenfalls gültig. Die reflektierten Wellen können sowohl vom **Target** als auch von seitlichen Absorbern kommen (siehe Bild F.1 b, Bild F.2, Bild F.6) und müssen deshalb ausführlicher betrachtet werden.

Insgesamt wird die verlässlichste Genauigkeitsabschätzung durch Vergleich von Messungen mit unterschiedlichen **Targets** erreicht. Die akustischen **Target**-Eigenschaften ändern sich erheblich mit der

Frequenz, und so muss jede Unsicherheitsabschätzung getrennt für jede interessierende Frequenz gemacht werden. Es ist besonders schwierig, gute **Targets** für Frequenzen unter 2 MHz zu erhalten.

Um den Einfluss kohärenter Reflexionen zu minimieren, wird empfohlen, zwei Messungen bei um $\lambda/4$ getrennten **Target**-Abständen durchzuführen, wobei λ die Wellenlänge der Schallwelle in der schallführenden Flüssigkeit (Wasser) ist, und den Mittelwert zu bilden.

A.7.6 Form des reflektierenden Targets

Wie in B.2 diskutiert, hat der Konuswinkel eines konischen, reflektierenden **Targets** einen Einfluss auf das Messergebnis. Im Einzelnen: Wenn der Konus-Halbwinkel eines Reflektors vom konvexen Typ mit nominell 45° innerhalb $(45 \pm 1)^\circ$ liegt, so ist die resultierende Leistungsunsicherheit $\pm 3,5\%$. Wenn der Konus-Halbwinkel eines Reflektors vom konkaven Typ mit nominell 63° (gleichbedeutend mit $\theta = 27^\circ$, in der Bezeichnungsweise von B.2) innerhalb $(63 \pm 1)^\circ$ liegt, so ist die resultierende Leistungsunsicherheit $\pm 1,8\%$.

ANMERKUNG Anhang E gibt zusätzliche Informationen über den Einfluss der **Target**-Größe im Fall divergierender Ultraschallfelder.

A.7.7 Seitliche Absorber im Fall von Messungen mit einem reflektierenden Target

Unvollkommenheiten der seitlichen Absorber in den Anordnungen nach Bild F.1 b, Bild F.2, Bild F.5 b und Bild F.6 verursachen reflektierte Wellen, die zum **Target** zurückkehren und zu einer Erhöhung des Wertes der gemessenen **Feldkraft** führen. Auch hier kommt es unter inkohärenten Bedingungen auf die reflektierte Energiedichte an, und auch hier können Interferenzeffekte auftreten (siehe A.7.5).

A.7.8 Fehlausrichtung des Targets

Dieser Unterabschnitt betrifft den Fall, dass der **Ultraschallwandler** und die Kraftmesseinrichtung kollinear ausgerichtet sind, aber die Winkelausrichtung des **Targets** falsch ist.

Während die **Feldkraft** auf ein perfekt absorbierendes **Target** entsprechend der Gleichung in B.2 unabhängig von einer Schrägstellung des **Targets** ist, hängt die Messung im Fall eines reflektierenden **Targets** von der richtigen **Target**-Orientierung ab. Zum Beispiel führt eine Winkelunsicherheit von $\pm 1^\circ$ eines ebenen Reflektors bei 45° zu einer Unsicherheit der gemessenen Leistung von $\pm 3,5\%$. Im Fall eines konischen reflektierenden **Targets** kann der Einfluss einer Fehlausrichtung nicht durch eine universelle Gleichung wiedergegeben werden, aber er wird im Allgemeinen viel geringer als bei einem ebenen, reflektierenden **Target** sein, insbesondere wenn das **Target** im Bündel zentriert ist. Bei einem zylindrisch-symmetrischen Bündel, das auf ein konisches reflektierendes **Target** von 45° zentriert ist, ist die Empfindlichkeit auf eine Winkelabweichung der Ausrichtung noch geringer.

Ein Vorteil des konkav-konischen reflektierenden **Targets** ist, dass es sich in Abhängigkeit von der Art der Aufhängung selbst innerhalb des Ultraschallbündels symmetrisch zentriert.

A.7.9 Fehlausrichtung des Ultraschallwandlers

Dieser Unterabschnitt betrifft den Fall, dass das **Target** und die Kraftmesseinrichtung kollinear (zueinander) ausgerichtet sind, aber die Orientierung oder Lage des **Ultraschallwandlers** falsch ist.

Im Fall eines perfekt absorbierenden **Targets** hinreichender Größe ist die gemessene **Feldkraft** proportional zum Kosinus des Fehlwinkels der Ausrichtung. Im Fall eines konvex-konischen reflektierenden **Targets** von 45° kann eine maximale Unsicherheit von $\pm 3\%$ auf Grund der Fehlausrichtung erwartet werden, wenn maximale Lage- und Winkelfehler der Ausrichtung von $\pm 3\text{ mm}$ und $\pm 3^\circ$ angenommen werden [22], was für eine Ausrichtung mit dem bloßen Auge realistisch erscheint.

Wenn die Messungen wiederholt werden und der **Ultraschallwandler** zwischen den Messungen aus der Apparatur entnommen wird, erfolgt eine Überprüfung der von der Fehlausrichtung des **Ultraschallwandlers** verursachten Zufallseffekte mit der Beurteilung. Zusätzlich kann eine systematische Fehlausrichtung des Wandlers vorliegen.

A.7.10 Wassertemperatur

Als Folge der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Wasser [23] wird eine Unsicherheit der Temperaturmessung von $\pm 1\text{ °C}$ zu einer Unsicherheit der Leistungsmessung von $\pm 0,2\text{ %}$ führen.

Wenn Leistungsmessungen bei über 1 W durchgeführt werden müssen, kann ein wesentlicher Temperaturanstieg erwartet werden. Es sollte darauf geachtet werden, den tatsächlichen Temperaturanstieg zu berücksichtigen.

A.7.11 Ultraschallschwächung und akustische Strömung

Der aus der Messung mit der **Feldkraft**-Waage ermittelte Leistungswert bezieht sich auf die **Target**-Position in einem gegebenen axialen Abstand vom **Ultraschallwandler**. Die interessierende Größe ist jedoch häufig die abgestrahlte Leistung mit Bezug auf die Oberfläche des **Ultraschallwandlers**. Die zusätzliche Unsicherheit für diesen Fall wird im Folgenden diskutiert.

Diese Diskussion betrifft hauptsächlich die in Bild F.1, Bild F.2, Bild F.3, Bild F.5, Bild F.6 und Bild F.7 dargestellten Aufbauten für die **Schallfeldkraft**-Messung. Für den Messaufbau nach Bild F.4 scheinen diese Effekte von geringerer Bedeutung zu sein, jedoch ist bei beobachtetem Auftreten dieser Effekte deren Ursprung unbekannt. Für diesen Messaufbau sollte der weiter unten beschriebene, alternative Ansatz für Korrekturen benutzt werden.

Es gibt zwei grundlegende Modelle für die Beschreibung des Unterschiedes zwischen den oben genannten Leistungswerten. Das erste betrachtet allein den Einfluss der Ultraschallschwächung. In diesem Fall wird die Korrektur durch Verwendung des exponentiellen Korrekturfaktors (siehe B.3.2) durchgeführt. Das zweite schließt die Auswirkungen der **akustischen Strömung** auf dem freien Ausbreitungsweg vor dem **Target** mit ein. Für ein absorbierendes **Target** unter gewissen idealisierenden Bedingungen besagt das Borgnis-Theorem [24], dass die Auswirkungen der Schwächung und der **akustischen Strömung** sich gegenseitig aufheben und folglich keine Korrektur nötig ist. Das Verhalten realer **Targets** (sowohl absorbierender als auch reflektierender) wurde als irgendwo zwischen diesen beiden grundlegenden Modellen liegend gefunden [17]. Es wird deshalb empfohlen, einen Unsicherheitsbereich anzunehmen, der vom unkorrigierten Leistungswert, wie mit der Waage gemessen, bis zum Wert mit der vollen Schwächungskorrektur reicht [25]. Dieser Unsicherheitsbeitrag hängt vom **Target**-Abstand ab und ist besonders kritisch, wenn die Messungen im höheren Megahertz-Frequenzbereich durchgeführt werden.

Ein alternativer Weg ist, die gemessene Leistung als Funktion des **Target**-Abstandes aufzunehmen und das Ergebnis mit Hilfe eines Regressionsalgorithmus auf den Abstand null zurückzuextrapolieren, wobei ein lineares oder exponentielles Abstandsgesetz angenommen wird. Die gemessenen Werte werden das angenommene Abstandsgesetz nicht exakt erfüllen, d. h., es wird eine gewisse experimentelle Streuung geben, und so kann die Unsicherheit des Extrapolationsergebnisses mit Hilfe bekannter mathematischer Methoden abgeschätzt werden.

Im Fall einer unebenen **Target**-Oberfläche ist der effektive **Target**-Abstand schwierig zu definieren. Hier ist es hilfreich, daran zu erinnern, dass die durchschnittliche Höhe eines Kegels oder einer Pyramide $1/3$ der Spitzenhöhe beträgt, wenn von der Grundfläche aus gemessen wird, oder $2/3$, wenn von der Spitze ausgegangen wird. Diese Regel kann bei konisch geformten reflektierenden **Targets** oder bei absorbierenden **Targets** mit pyramidenförmigen Keilen verwendet werden. Unter Annahme eines gleichförmigen, zylindrischen Bündels, das auf ein konvex-konisches **Target** trifft, beträgt der zusätzliche effektive **Target**-Abstand (von der Spitze aus):

$$2 a / (3 \tan \zeta)$$

Dabei ist

a der Bündelradius;

ζ der Konus(-Halb-)winkel.

A.7.12 Folieneigenschaften

(Leer)

A.7.13 Endliche Target-Größe

In A.5.3 wird eine Gleichung für die **Target**-Mindestgröße auf der Grundlage eines 2-%-Kriteriums angegeben. Wenn die tatsächliche **Target**-Breite um mehr als 50 % größer ist als der in A.5.3 festgelegte Wert, so ist es vernünftig, einen Unsicherheitsbeitrag von nur 1 % oder sogar noch weniger anzunehmen [14]. Es wird jedoch empfohlen, die Abhängigkeit der **Feldkraft** vom **Target**-Abstand entsprechend A.6.2 zu überprüfen und dabei Schwächung und **akustische Strömung** zu berücksichtigen (siehe 7.11).

Genau genommen, gelten die Gleichungen, auf die verwiesen wird, für ein absorbierendes **Target**. In A.5.3 und Anhang E sind Einschränkungen für die Verwendung konvex-konischer reflektierender **Targets** angegeben.

A.7.14 Annahme ebener Wellen

Wenn das Feld eine divergierende oder konvergierende Feldstruktur hat, sind die Gleichungen für ebene Wellen in B.2 nicht mehr uneingeschränkt gültig. Die theoretischen Abschätzungen der Größe der Fehler, die auf Grund der Abweichungen von diesen Gleichungen im Fall fokussierter Felder oder solcher mit geringen ka -Werten auftreten, finden sich in B.4.2, B.5 und B.6 (siehe [26-28]). Die theoretischen Abschätzungen der Größe der Fehler auf Grund der Abweichungen von diesen Gleichungen für divergierende Felder an einem absorbierenden **Target** sind in E.1 angegeben (siehe [29], [30]). Eine Betrachtung für divergierende Felder an konvex-konischen Reflektoren ist in E.2 enthalten.

A.7.15 Einfluss der Abtastung

(Leer)

A.7.16 Umgebungseinflüsse

Die Abschätzung der Unsicherheiten als Folge von Erschütterungen der Umgebung, Luftströmung oder Temperaturänderungen kann durch mindestens dreimalige Wiederholung der Messungen, vorzugsweise an unterschiedlichen Tagen, überprüft werden.

A.7.17 Messung der Anregungsspannung

Im Allgemeinen ist die Messunsicherheit der an den **Ultraschallwandler** angelegten Anregungsspannung für die Messung der **Ausgangsleistung** unerheblich. Wenn jedoch die **Ausgangsleistung** desselben **Ultraschallwandlers** in verschiedenen Laboratorien unabhängig voneinander gemessen wird (z. B. für Vergleichszwecke), müssen die möglichen Unterschiede in der Amplitude der Anregungsspannung berücksichtigt werden. Da die **Ausgangsleistung** proportional zum Quadrat der angelegten Spannung ist, wird in diesem Fall üblicherweise der **Strahlungsleitwert** G gebildet, und es muss die ermittelte Spannungsunsicherheit bei der Aufnahme in die Gesamt-Unsicherheit von G verdoppelt werden.

ANMERKUNG 1 Wenn die Anregungsspannung betrachtet wird, ist es ihr direkt am Eingang des **Ultraschallwandlers** gemessener Wert, der von Bedeutung ist.

ANMERKUNG 2 Es wird empfohlen, dass die Anregungsspannung für die Dauer jeder **Ausgangsleistungs**-Messung, für die der Wert der angelegten Anregungsspannung verwendet wird, um ein angestrebtes Leistungsniveau zu erhalten oder den **Strahlungsleitwert** zu berechnen, gemessen und aufgezeichnet wird. Solche Daten können verwendet werden, um Instabilitäten verschiedener Art festzustellen.

A.7.18 Temperatur des Ultraschallwandlers

Die Änderung der **Ausgangsleistung** mit der Temperatur des **Ultraschallwandlers** kann wichtig sein, wenn Messungen zu verschiedenen Zeiten oder an verschiedenen Orten miteinander verglichen werden. Manchmal kann diese Änderung sehr erheblich sein (z. B. 5 % je °C), insbesondere bei impedanzangepassten Mehrschicht-**Ultraschallwandlern**. Die Temperaturänderung kann durch Änderung der Umgebungsbedingungen oder durch Erwärmung innerhalb des **Ultraschallwandlers** verursacht sein.

Ein Anstieg der Wandlertemperatur kann auch thermische Konvektionsströmungen auslösen, die die Waagenanzeige beeinflussen können.

Diese Effekte können durch Beobachtung der **Feldkraft** als Funktion der Zeit nach dem Einschalten des **Ultraschallwandlers** abgeschätzt werden.

A.7.19 Nichtlinearität

- a) Die Linearität des Waagensystems unter Einschluss der **Target**-Aufhängung kann durch Kalibrierung mit Gewichtsstücken als Funktion ihres Massenwertes überprüft werden, oder durch Messungen mit einem **Ultraschallwandler** bekannter Eigenschaften (7.2) und mit dem **Target** näher als 10 mm am **Ultraschallwandler**.
- b) Nach 6.3 und 6.4 sind entgastetes Wasser und die Abwesenheit jeglicher Blasen notwendig. Wenn es Luftblasen oder Kavitationsereignisse im Ultraschallfeld gibt, kann die Leistungsmessung grob falsch sein. Dafür kann keine allgemeine Abschätzung gegeben werden.

Weitere Informationen zur Wasserentgasung und Kavitation können Anhang D entnommen werden.

- c) Ultraschallschwächung und **akustische Strömung** können nichtlinear sein. Wenn der Abstand zwischen **Ultraschallwandler** und **Target** oder der kleinste **Target**-Abstand in einem Experiment mit Abstandsänderung kleiner als 10 mm ist, so reicht es aus, A.7.11 zu folgen. Wenn der Abstand zwischen **Ultraschallwandler** und **Target** oder der kleinste **Target**-Abstand in einem Experiment mit Abstandsänderung 10 mm oder größer ist, so sind zusätzliche Unsicherheiten infolge Nichtlinearität wahrscheinlich, es kann hier aber keine allgemeine Abschätzung gegeben werden.

Es mag erscheinen, dass dieser Effekt mit einem Bezugs-**Ultraschallwandler** bekannter **Ausgangsleistung** überprüft werden kann. Es sollte jedoch beachtet werden, dass Nichtlinearitäten der Ultraschallschwächung und der **akustischen Strömung** von der zeitlichen Wellenform und vom zeitlichen Spitzenwert des Drucks abhängen können und dass Prüfergebnisse, die mit einem Bezugs-**Ultraschallwandler** mit einer vom zu messenden **Ultraschallwandler** unterschiedlichen Wellenform gewonnen werden, deshalb nicht unbedingt aussagekräftig sind.

- d) Abgesehen von den in den Listenelementen a), b) und c) behandelten Effekten könnten die theoretischen **Feldkraft**-Beziehungen selbst nichtlinear sein und sich von den Gleichungen zweiter Ordnung in B.2 und B.5, wo lineare Beziehungen zwischen Leistung und Kraft angegeben sind, unterscheiden. Jedoch sollte im **Ausgangsleistungs**-Bereich heutiger Diagnostik- und Therapiegeräte, und solange nichts Gegenteiliges bekannt wird, die **Schallfeldkraft** als ein im Wesentlichen lineares Phänomen in Bezug auf die **Ausgangsleistung** angesehen werden. Nichtlineare Abweichungen von den in B.2 und B.5 gegebenen Gleichungen sollten als vernachlässigbar im Vergleich mit den anderen Unsicherheitsbeiträgen betrachtet werden [31].

A.7.20 Andere Quellen

Es wird empfohlen, regelmäßig zu überprüfen, ob die nach den obigen Anweisungen ermittelte Gesamtunsicherheit nicht von irgendwelchen anderen, zufälligen Fehlerquellen beeinflusst wird. Dies kann leicht durch mindestens dreimaliges Auseinandernehmen, Wiederzusammensetzen der Messanordnung und Wiederholen der Messung geschehen.

Wenn die in Abschnitt 5 und Abschnitt 6 gestellten Anforderungen eingehalten werden und es sich um Wandler mit $ka \geq 30$ oder $kh_n \geq 30$ handelt, scheint eine Gesamtmessunsicherheit von 10 % im Frequenzbereich von 1 MHz bis 10 MHz [29, 32-35] eine von 20 % außerhalb dieses Frequenzbereiches und

bis zu 20 MHz und eine von 30 % oberhalb 20 MHz erzielbar. Bei Wandlern mit $10 < ka < 30$ oder $10 < kh_h < 30$ scheint die Gesamtmessunsicherheit bei Frequenzen um 1 MHz 20 % zu betragen.

Fehleranalysen für bestimmte Systeme sind in [25], [29], [33], [36] angegeben. Wenn kalibrierte Bezugs-**Ultraschallwandler** verfügbar sind, werden Prüfmessungen mit ihnen ausdrücklich empfohlen [33], [34], [37].

Anhang B (normativ)

Grundlegende Gleichungen

B.1 Die in dieser Norm empfohlenen **Feldkraft**-Messungen werden unter Bedingungen eines offenen Gefäßes durchgeführt (Langevin-Bedingung), d. h., die beschallte Flüssigkeit ist in Kontakt mit dem umgebenden Medium, das unter dem Umgebungsdruck steht.

B.2 Unter solchen Bedingungen und für ebene Ultraschallwellen kleiner Amplitude ist der an der Grenzfläche zwischen zwei Medien auftretende **Felddruck** gleich der Differenz zwischen den akustischen Gesamtenergiedichten auf beiden Seiten der Fläche. Dies führt zu den folgenden Gleichungen, die die Komponente F der **Feldkraft** auf das **Target** in der Ausbreitungsrichtung der einfallenden Welle mit der akustischen **Ausgangsleistung** P des **Ultraschallwandlers** verbinden:

Für ein vollständig absorbierendes **Target**:

$$P = c F \quad (\text{B.1})$$

Für ein vollständig reflektierendes **Target**:

$$P = c F / (2 \cos^2 \theta) \quad (\text{B.2})$$

Dabei ist

c die Schallgeschwindigkeit in der Schall führenden Flüssigkeit (Wasser);

θ der Winkel zwischen der Ausbreitungsrichtung der einfallenden Welle und der Senkrechten auf der reflektierenden Oberfläche.

ANMERKUNG Die oben erwähnte Richtung der einfallenden Welle wird als die Richtung der Feldachse verstanden, d. h., sie wird eher global als lokal betrachtet.

B.3 Vorausgesetzte Annahmen

Die oben angegebenen Gleichungen gelten unter zwei Annahmen:

B.3.1 Das **Target** ist groß genug, um den ganzen Querschnitt des Ultraschallbündels zu überdecken, d. h., der Anteil der akustischen Leistung, der in solche Richtungen emittiert wird, dass er am **Target** vorbeiläuft, ist im Vergleich mit der akustischen Gesamtleistung zu vernachlässigen.

B.3.2 Es gibt keine Ultraschallabsorption im Schall führenden Medium. Wenn es Absorption gibt, bezeichnet das Formelzeichen P in den oben angegebenen Gleichungen die akustische Leistung am Ort des **Targets**. Um sie in die akustische **Ausgangsleistung** des **Ultraschallwandlers** umzuwandeln, muss sie mit $\exp(2 \alpha z)$ multipliziert werden, wobei z der Abstand des **Targets** vom **Ultraschallwandler** ist und α der Amplitudenschwächungskoeffizient ebener Wellen. Der Wert von α im MHz-Bereich ist proportional zu f^2 und ist z. B. gegeben durch

$$\alpha / f^2 = 2,3 \times 10^{-4} \text{ MHz}^{-2} \text{ cm}^{-1}, \text{ für reines Wasser bei } 23^\circ \text{C} \quad (\text{B.3})$$

Dabei ist

f die Ultraschallfrequenz (siehe [38], interpoliert).

Vorbedingungen für die Gültigkeit dieser Regeln sind die Abwesenheit von zusätzlicher Dämpfung auf Grund von Verzerrungen durch endliche Amplitude und die Abwesenheit einer zusätzlichen Kraft auf das **Target** auf Grund von **akustischer Strömung** (Annahme der Verwendung einer Abschirmfolie).

B.4 Einschränkungen für unfokussierte Felder

Die oben angegebenen Gleichungen beruhen auf der Annahme ebener Wellen. Die Feldstruktur von **Ultraschallwandlern, auch für nicht fokussierende Wandler**, unterscheidet sich im Allgemeinen von der einer ebenen Welle, hauptsächlich wegen Beugung. Der Gebrauch dieser Gleichungen wird für nicht fokussierende Wandler dennoch aus zwei Gründen empfohlen:

B.4.1 Auf der experimentellen Seite wurde bei ebenen Kolbenmembran-**Ultraschallwandlern** mit ausreichend großem ka oder kh_h innerhalb der Messgenauigkeit von typischerweise mindestens einigen Prozent nie gefunden, dass sie ungültig sind.

B.4.2 Auf der theoretischen Seite [39], siehe auch Gleichung (E.2), wurde das Ergebnis für ebene Wellen im Fall einer runden, ebenen Kolbenmembran als näherungsweise gültig gefunden, vorausgesetzt, der ka -Wert ist groß genug (wobei $k = 2\pi/\lambda$ die Kreiswellenzahl in der Schall führenden Flüssigkeit ist und a der Radius des **Ultraschallwandlers**; die theoretische Untersuchung wurde auf den Fall eines absorbierenden **Targets** beschränkt). Zum Beispiel beläuft sich die Übereinstimmung auf 2 %, wenn $ka \geq 35$ ist, eine Bedingung, die üblicherweise von **Ultraschallwandlern** erfüllt wird. Ein Versagen der o. a. Gleichungen könnte hauptsächlich im Bereich kleiner ka -Werte als möglich betrachtet werden (für eine Korrektur dieses Effektes siehe nachfolgenden Anhang E).

Ähnliches gilt für den Fall einer rechteckigen ebenen Kolbenmembran [27]. Das ebene-Wellen-Ergebnis ist näherungsweise gültig, vorausgesetzt der kh_h -Wert ist groß genug, wobei h_h der harmonische Mittelwert der halben Wandlerabmessungen ist. Die Übereinstimmung beläuft sich auf 2 % (für Dauerschall-Anregung) wenn $kh_h \geq 36$. Die Notwendigkeit einer Korrektur kann vorwiegend im Bereich kleiner kh_h -Werte erwartet werden (siehe Anhang E weiter unten).

B.5 Absorbierendes Target in einem fokussierten Feld

B.5.1 Es wurde theoretisch herausgefunden [26, 27], dass die Gleichungen für ebene Wellen im Fall fokussierender **Ultraschallwandler** nicht vollständig richtig sind. Stattdessen würde der **Feldkraft**-Ausdruck für ein absorbierendes **Target** lauten:

$$P = 2 c F I (1 + \cos \gamma) \quad (\text{B.4})$$

Dabei ist

γ = Fokus(-Halb-)winkel, $\gamma = \arcsin(a/d)$ wenn der Wandler sphärisch gekrümmt ist und die Brennweite vom „Boden“ der „Schüssel“ aus gezählt wird; $\gamma = \arctan(a/d)$ wenn die Brennweite von der durch den Rand des aktiven Teils der „Schüssel“ definierten Ebene aus gezählt wird oder der Wandler eben ist;

d die geometrische Brennweite;

a der Radius des aktiven **Ultraschallwandler**-Elements.

Der Ausdruck (B.4) konvergiert gegen die entsprechende Gleichung für ebene Wellen im Fall $\gamma \rightarrow 0$ oder $d \rightarrow \infty$.

Der Feldkraft-Ausdruck für ein absorbierendes **Target** würde im Fall eines rechteckigen Wandlers lauten:

$$P = c \cdot F \cdot \text{Zähler} / \text{Nenner} \quad (\text{B.5})$$

mit $\text{Zähler} = 2 \arcsin(\sin \beta_x \sin \beta_y)$

$$\text{Nenner} = \sin \beta_x \arctan(\cos \beta_x \tan \beta_y) + \sin \beta_y \arctan(\cos \beta_y \tan \beta_x)$$