

# Präzise AVG-Bewertung mit Gruppenstrahler-Winkelprüfköpfen für alle Winkel

Wolf KLEINERT \*, York OBERDÖRFER \*

\* GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Hürth

[wolf.kleinert@ge.com](mailto:wolf.kleinert@ge.com); [york.oberdoerfer@ge.com](mailto:york.oberdoerfer@ge.com)

**Kurzfassung:** Die AVG-Methode wurde um 1959 für senkrecht einschallende Kreiswandler entwickelt. Diese Wandler erzeugen im Werkstück ein rotationssymmetrisches Schallfeld. Herkömmliche Winkelprüfköpfe, in der Regel mit Rechteckwandlern ausgestattet, erfüllen diese Voraussetzung nicht. Das führt zum Teil zu erheblicher Überbewertung bei der Anwendung der AVG-Methode.

Mit speziell berechneten Wandlerformen lässt sich auch mit Winkelprüfköpfen ein rotationssymmetrisches Schallfeld erzeugen. Diese Wandler haben nicht nur eine spezielle Form, sondern sind auch in beiden Dimensionen gekrümmt. Diese neuartigen Wandler können sowohl in Einschwingerprüfköpfen als auch in Gruppenstrahlern eingesetzt werden.

Die Rotationssymmetrie wird anhand einer CIVA-Modellierung und durch eine photoelastische Schallfeldvermessung nachgewiesen.

Es wird der Algorithmus zur Berechnung dieser Wandler vorgestellt, einschließlich der notwendigen Korrekturen, die aufgrund der Brechung und der Phasenverschiebung an der Grenzfläche zwischen Keil und Werkstück notwendig sind. Dieser Algorithmus kann auch bei gekrümmten Ankoppelflächen verwendet werden, solange diese mathematisch beschreibbar sind. Damit ergibt sich auch bei gekrümmten Ankoppelflächen ein rotationssymmetrisches Schallfeld. Die Krümmung der Ankoppelfläche wird gewissermaßen herausgerechnet. Damit bietet dieses Verfahren auch dort klare Vorteile, wo keine AVG-Bewertung gefordert wird.

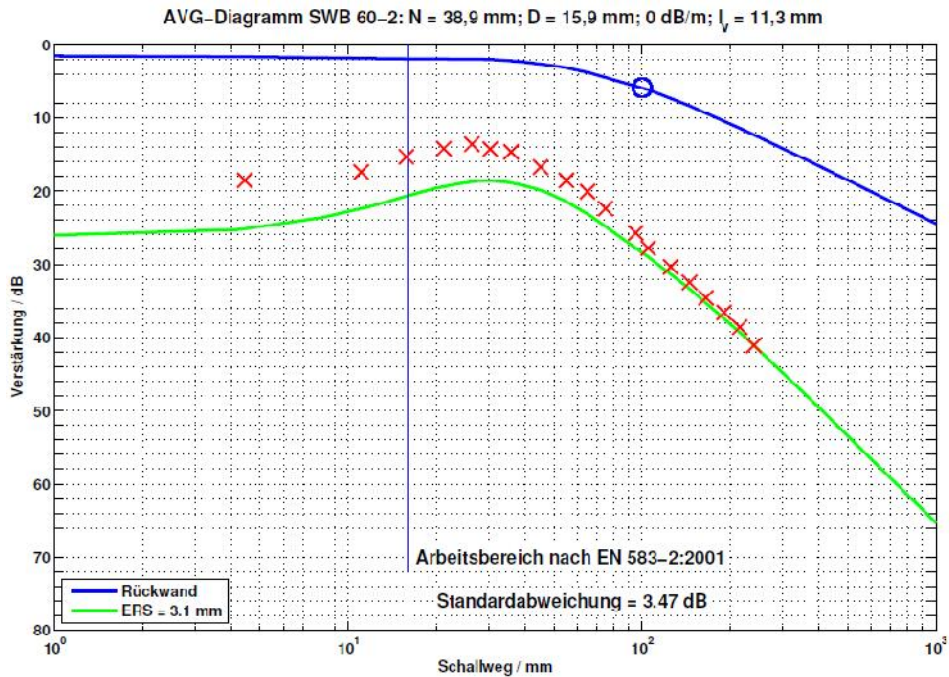
Außerdem wird auf die Berechnungsmethode für die Verzögerungszeiten bei mit diesen Wandlern ausgestatteten Gruppenstrahlern eingegangen.

Mit diesen neuartigen Gruppenstrahler-Prüfköpfen wurde eine intensive Validierung durchgeführt, die detailliert beschrieben wird.

## 1. AVG: Stand der Technik

Die AVG-Methode wurde in den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts für ebene, senkrecht einschallende Kreiswandler, die ein rotationssymmetrisches Schallfeld erzeugen, entwickelt. Später wurde die AVG-Methode auch auf Winkelprüfköpfe übertragen, die in fast allen Fällen mit Rechteckwandlern ausgestattet sind. Diese Prüfköpfe erzeugen jedoch kein rotationssymmetrisches Schallfeld. Eine Auswertung von Messungen mit diesen Prüfköpfen nach dem Stand der Technik über einen äquivalenten Kreiswandler führt zu Abweichungen bei der AVG-Bewertung (siehe Abbildung 1).





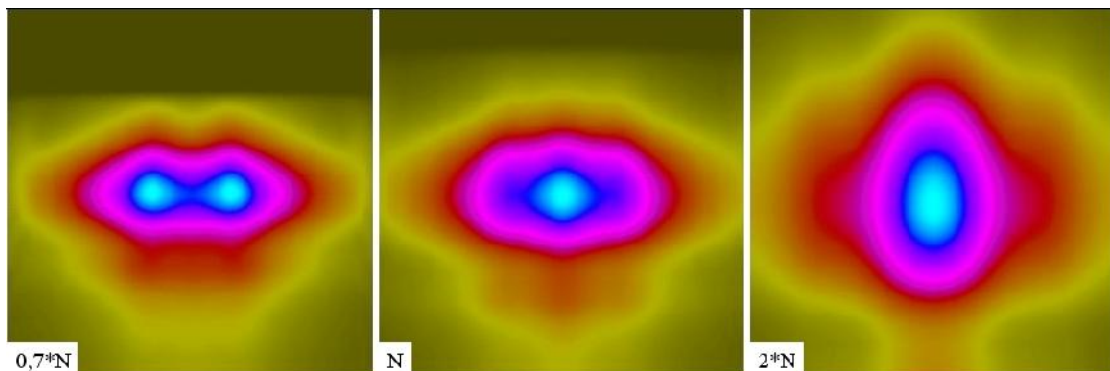
**Abbildung 1:** AVG-Auswertungen von Messungen mit einem SWB 60-2

Die Auswertung erfolgte nach dem Stand der Technik [1]. Für diesen 2-MHz-Prüfkopf wurde keine Schallschwächung berücksichtigt. Eine Auswertung unter Berücksichtigung der Schallschwächung zeigt ähnliche Abweichungen.

Es handelt sich hier nicht um ein herstellerspezifisches, sondern um ein generelles Problem. Die Autoren Xiang YAN, Jinchi ZHANG, Daniel KASS, Pierre LANGLOIS von Olympus NDT schreiben in ihrem Artikel DGS Sizing Diagram with Single Element and Phased Array Angle Beam Probe [2]:

*A recent investigation by GE Sensing & Inspection Technologies in Huerth, Germany has shown that the near field response from DGS diagram tends to underestimate the FBH amplitude compared to measurement results with single element angle beam probes [...]. This is also proved to be true in our model and measurement results shown later.*

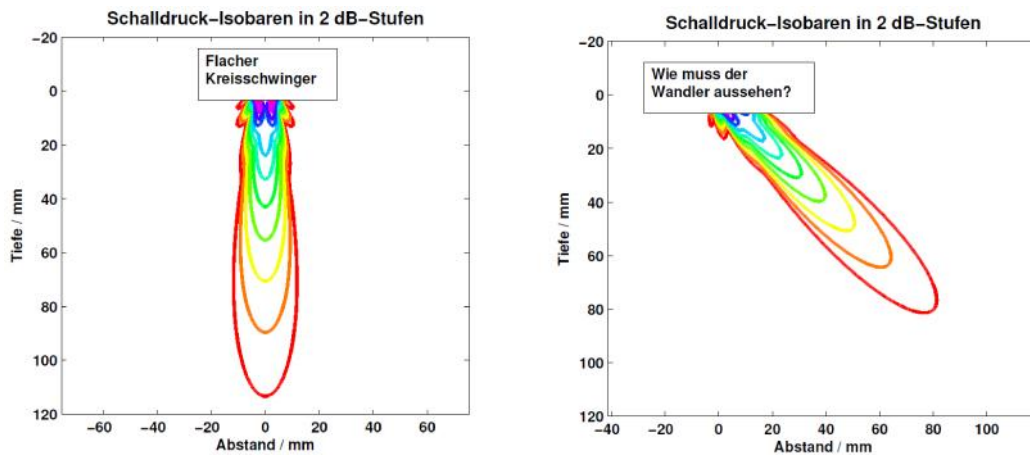
Diese Abweichungen sind der nicht vorhandenen Rotationssymmetrie der Schallfelder dieser Prüfköpfe geschuldet, da das allgemeine AVG-Diagramm von einer Rotationssymmetrie ausgeht [3]. Abbildung 2 zeigt den Schnitt senkrecht zur akustischen Achse durch das Schallfeld in verschiedenen Tiefen eines herkömmlichen Winkelprüfkopfes mit Rechteckwandler (CIVA-Simulation).



**Abbildung 2:** CIVA-Simulation eines Winkelprüfkopfes mit Rechteckwandler

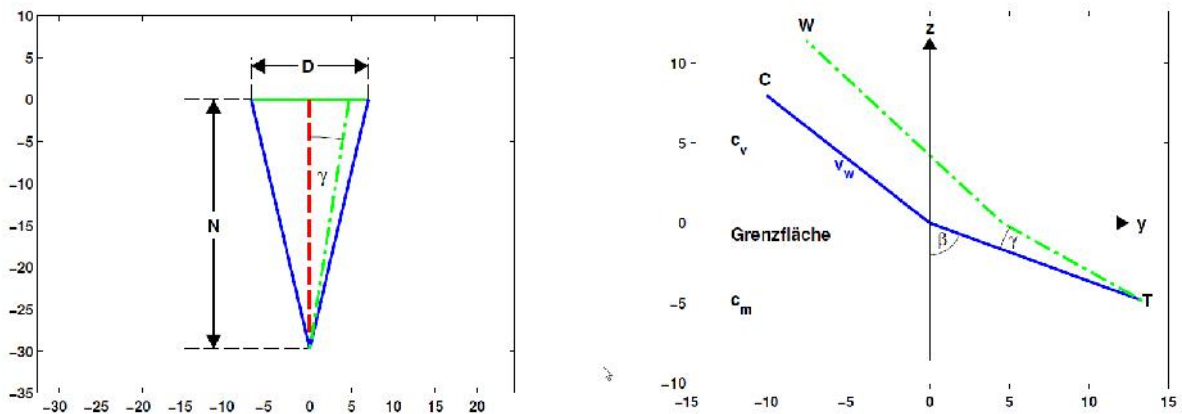
## 2. *trueDGS*<sup>®</sup>-Winkelprüfköpfe (Einschwinger)

Um mit Winkelprüfköpfen rotationsymmetrische Schallfelder zu erzeugen, ergibt sich die in Abbildung 3 dargestellte Aufgabenstellung:



**Abbildung 3:** Aufgabenstellung für *trueDGS*<sup>®</sup>-Winkelprüfköpfe

Die Isobarendarstellung der Schallfelder wurde für die Transversalwelle in Stahl berechnet. Abbildung 4 verdeutlicht die Konstruktionsmethode:



**Abbildung 4:** Konstruktionsmethode

Die linke Seite der Abbildung 4 zeigt das Nahfeld eines Senkrechtprüfkopfes, berechnet für die Transversalwelle in Stahl. Zur Konstruktion eines *trueDGS*<sup>®</sup>-Winkelprüfkopfes wird zunächst der Durchmesser  $D$  und die Frequenz  $f$  des zur Konstruktion heran-gezogenen Senkrechtprüfkopfes gewählt. Für den zu konstruierenden Winkelprüfkopf wird der Einschallwinkel  $\beta$  und die Vorlauflänge  $v_w$  festgelegt. Die Laufzeit vom Wandler bis zum Nahfeldende des Senkrechtprüfkopfes wird ermittelt. Von dieser Laufzeit wird die Laufzeit im Vorlauf des Winkelprüfkopfes subtrahiert und der verbleibende Rest unter dem Einschallwinkel  $\beta$  abgetragen. Damit ist das Ende des Nahfeldes für den Winkelprüfkopf festgelegt (Punkt  $T$  in der rechten Darstellung der Abbildung 4). Im Weiteren wird die Laufzeit für einen kleinen Winkel  $\gamma$  im Senkrechtprüfkopf berechnet und unter dem gleichen Winkel  $\gamma$  für den Winkelprüfkopf abgetragen. Die Laufzeit im Prüfmaterial wird errechnet, die verbleibende Laufzeit liegt dann im Vorlauf des Winkelprüfkopfes. Damit ist ein weiterer Wandlerpunkt  $W$  (siehe Abbildung 4) festgelegt. Diese Berechnung wird für alle möglichen Winkel  $\gamma$  wiederholt, nicht nur in der Zeichenebene, sondern auch in der

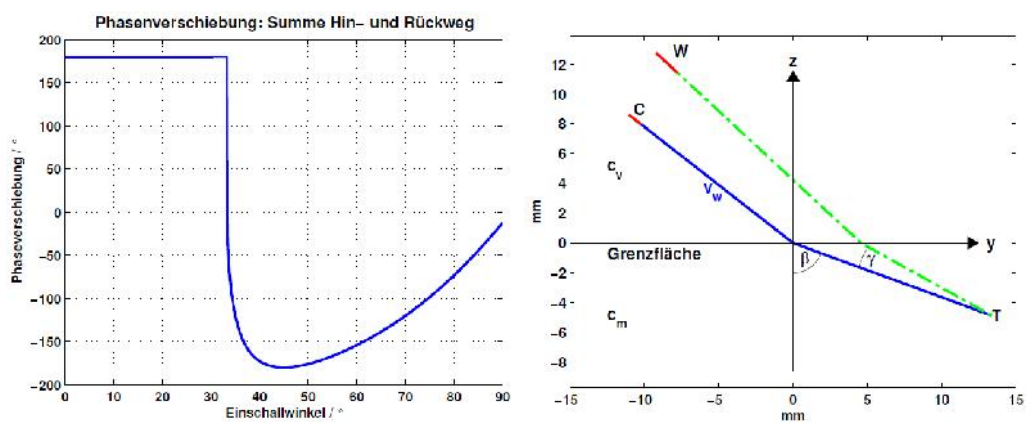
Ebene senkrecht dazu. Die entstehende Punktfolge muss allerdings noch angepasst werden.

## 2.1 Notwendige Anpassungen

Es sind drei Anpassungen notwendig:

- Winkelabhängige Phasenverschiebung
- Vorhaltewinkel
- Flächenkorrektur

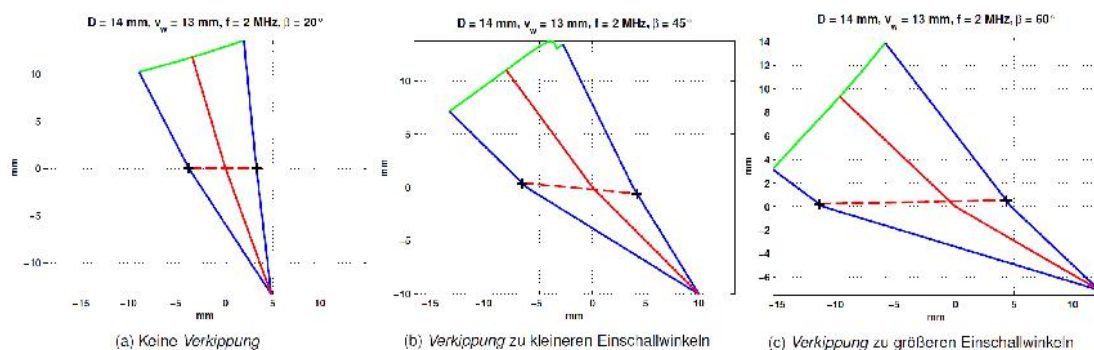
Für jeden Schallstrahl in der Berechnung muss die winkelabhängige Phasenverschiebung für Hin- und Rückweg des Schalls beim Übergang an der Grenzfläche berücksichtigt werden (siehe Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Berücksichtigung der winkelabhängigen Phasenverschiebung

Die berechneten Vorlaufängen müssen um die winkelabhängige Phasenverschiebung verlängert werden. Diese Verlängerung ist auf der rechten Seite der Abbildung 5 exemplarisch in rot dargestellt.

Die unterschiedlichen Phasenverschiebungen der Randstrahlen führen zu einem *Verkippen* des Schallfeldes, das bei der Berechnung der *trueDGS*<sup>®</sup>-Winkelprüfköpfe berücksichtigt werden muss (siehe Abbildung 6).



**Abbildung 6:** Vorhaltewinkel

Nach der Berücksichtigung dieser beiden Anpassungen ergibt sich eine Punktfolge, die den gesuchten Wandler für den zu konstruierenden Winkelprüfkopf definiert (siehe Abbildung 7):



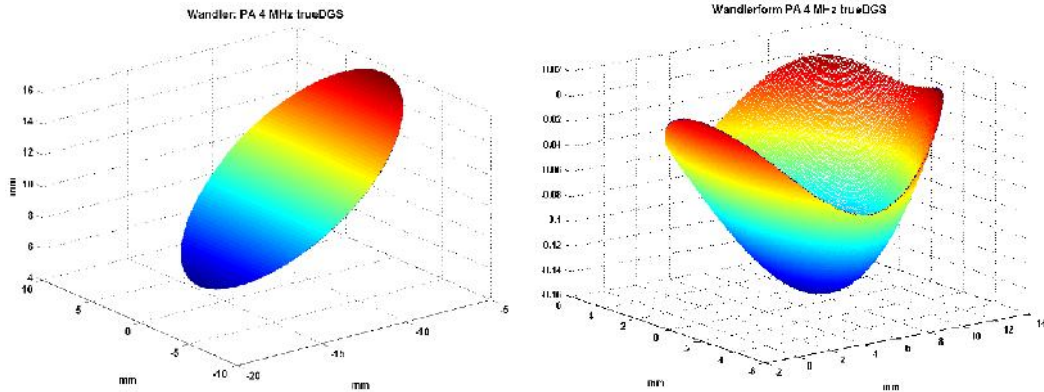


Abbildung 7: trueDGS-Wandler

Die linke Seite der Abbildung 7 zeigt den Wandler des berechneten Winkelprüfkopfes. Die Wandlerform auf der rechten Seite der Abbildung 7 resultiert aus einer Koordinatentransformation: Zunächst wurde der Wandler in den Ursprung des Koordinatensystems verschoben und dann so gedreht, dass die Haupttrichtung entlang der X-Achse verläuft. Die rechte Seite der Abbildung 7 zeigt das Ergebnis bei erheblich gespreizter Z-Achse. Die Wandler von *trueDGS*<sup>®</sup>-Winkelprüfköpfen sind 3-dimensional gekrümmt.

Aufgrund der Tatsache, dass die hier beschriebene Konstruktionsmethode nicht flächeninvariant ist, muss für die AVG-Bewertung noch eine weitere Anpassung vorgenommen werden (siehe Abbildung 8).

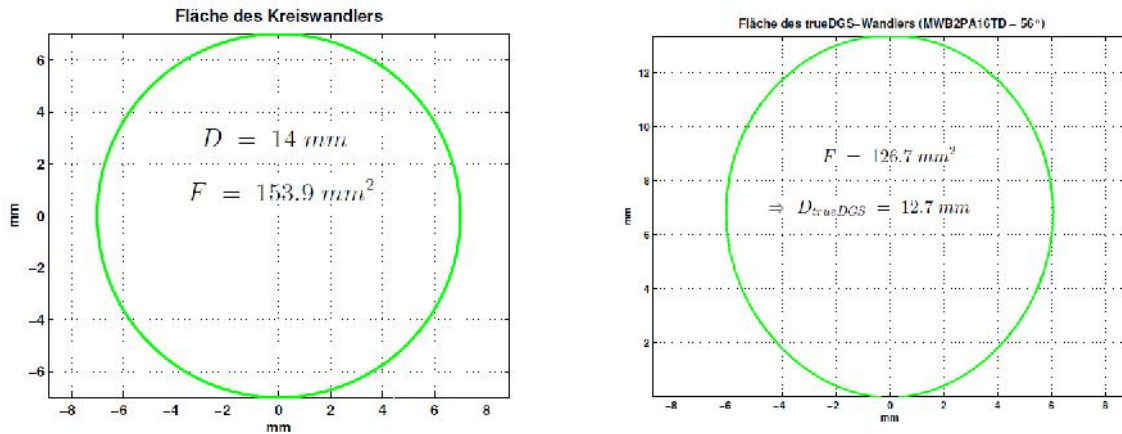


Abbildung 8: Links Fläche des Kreiswandlers, rechts Fläche des *trueDGS*<sup>®</sup>-Wändlers

Für die AVG-Auswertung muss der Durchmesser eines zum *trueDGS*<sup>®</sup>-Wandler flächengleichen Kreiswandlers herangezogen werden. Abbildung 9 zeigt die hohe AVG-Genauigkeit eines *trueDGS*<sup>®</sup>-Winkelprüfkopfes.

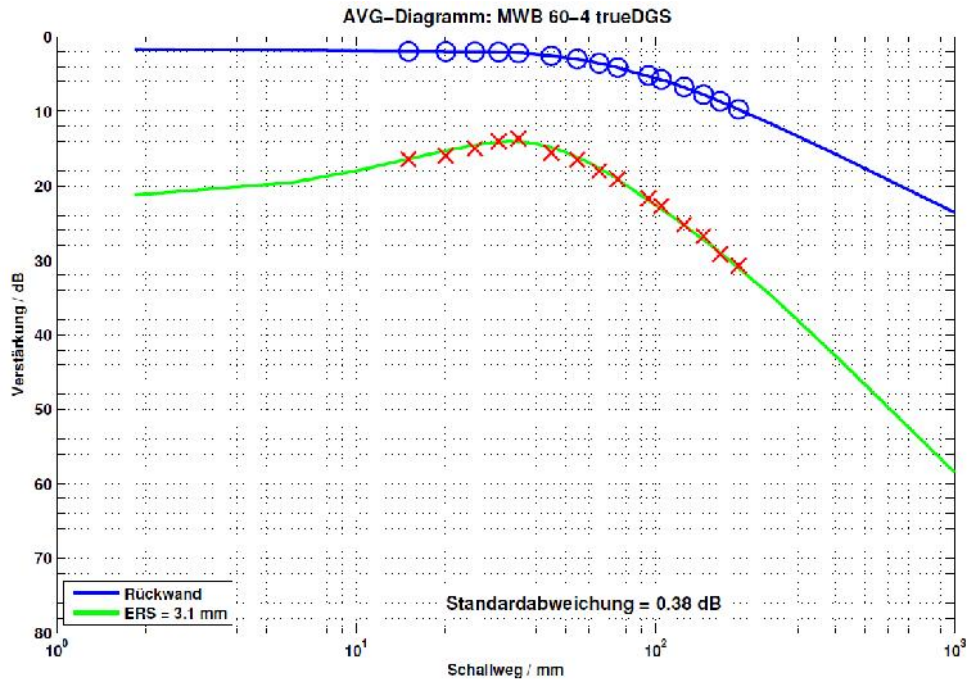


Abbildung 9: AVG-Bewertung für einen trueDGS®-Winkelprüfkopf

Auch die *trueDGS*®-Winkelprüfköpfe wurden einer CIVA-Simulation unterzogen. Diese Simulation kann allerdings nur als Näherung angesehen werden: Der Wandler wurde als 2D-Matrixwandler beschrieben, wobei die nicht auf der Fläche liegenden Elemente deaktiviert wurden und die Krümmung über Verzögerungszeiten berücksichtigt wurde. Abbildung 10 zeigt das Ergebnis dieser Simulation. Die Rotationssymmetrie ist trotz der Näherung gut erkennbar.

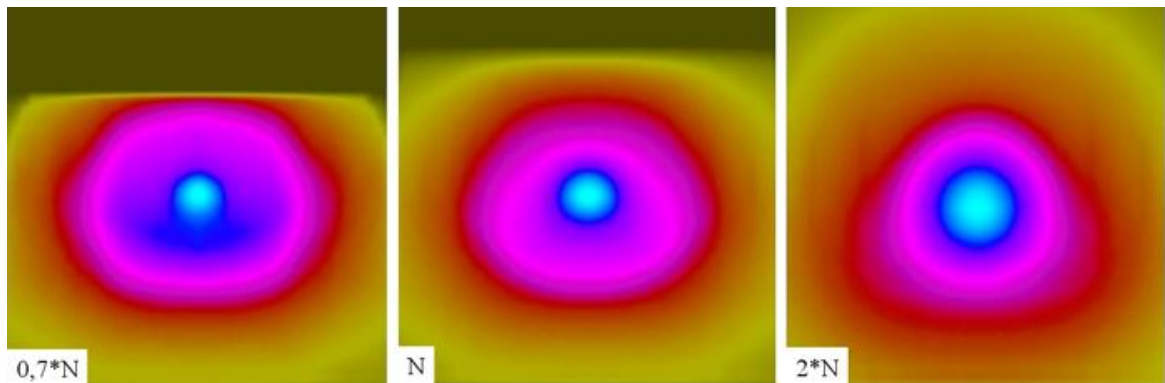


Abbildung 10: CIVA-Simulation eines trueDGS-Winkelprüfkopfes

### 3. *trueDGS*®-Gruppenstrahler

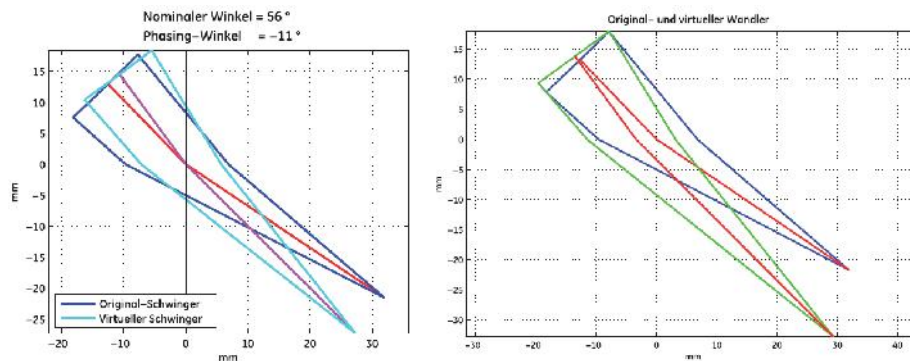
Zur Berechnung von *trueDGS*®-Gruppenstrahlern werden zunächst Längsschnitte des Nahfeldes für den Original- und den virtuellen Wandler berechnet. Die Berechnung ist so angelegt, dass die akustischen Achsen der Längsschnitte durch den Koordinatenursprung verlaufen. In einem weiteren Schritt müssen diese Schnitte mathematisch verschoben werden. Bei einem negativen Steuerwinkel müssen die oberen Ecken von Original- und virtuellem Wandler zusammenfallen und der untere

Randstrahl des virtuellen Wandlers muss durch den unteren Eckpunkt des Originalwandlers verlaufen. Für positive Steuerwinkel muss entsprechend vorgegangen werden.

Die Verschiebung wird durch die Lösung eines nichtlinearen Gleichungssystems mit den folgenden Variablen realisiert:

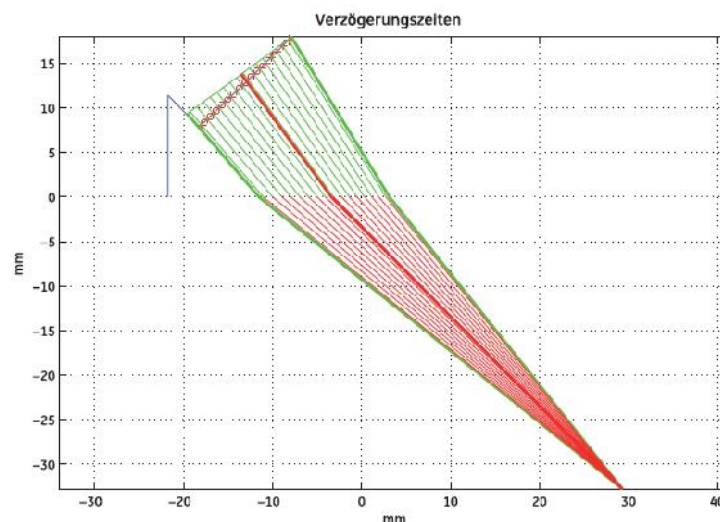
- Durchmesser des zur Konstruktion herangezogenen Kreiswandlers
- Vorlauflänge für den virtuellen Wandler
- Schallaustrittspunkt des virtuellen Wandlers.

Abbildung 11 zeigt die Längsschnitte vor und nach der Verschiebung.



**Abbildung 11:** Längsschnitte vor und nach der Verschiebung

Nach erfolgter Verschiebung können die Verzögerungszeiten berechnet werden. Es werden die Mittelpunkte der Elemente des Originalwandlers unter Berücksichtigung des Brechungsgesetzes mit dem Ende des Nahfelds verbunden und bis zum Schnitt mit dem virtuellen Wandler verlängert. Die Strecken zwischen Original- und virtuellen Wandler werden, basierend auf der Schallgeschwindigkeit im Vorlaufmaterial, in die Verzögerungszeiten umgerechnet (siehe Abbildung 12).



**Abbildung 12:** Berechnung der Verzögerungszeiten

### 3.1 Erreichte AVG-Genauigkeit

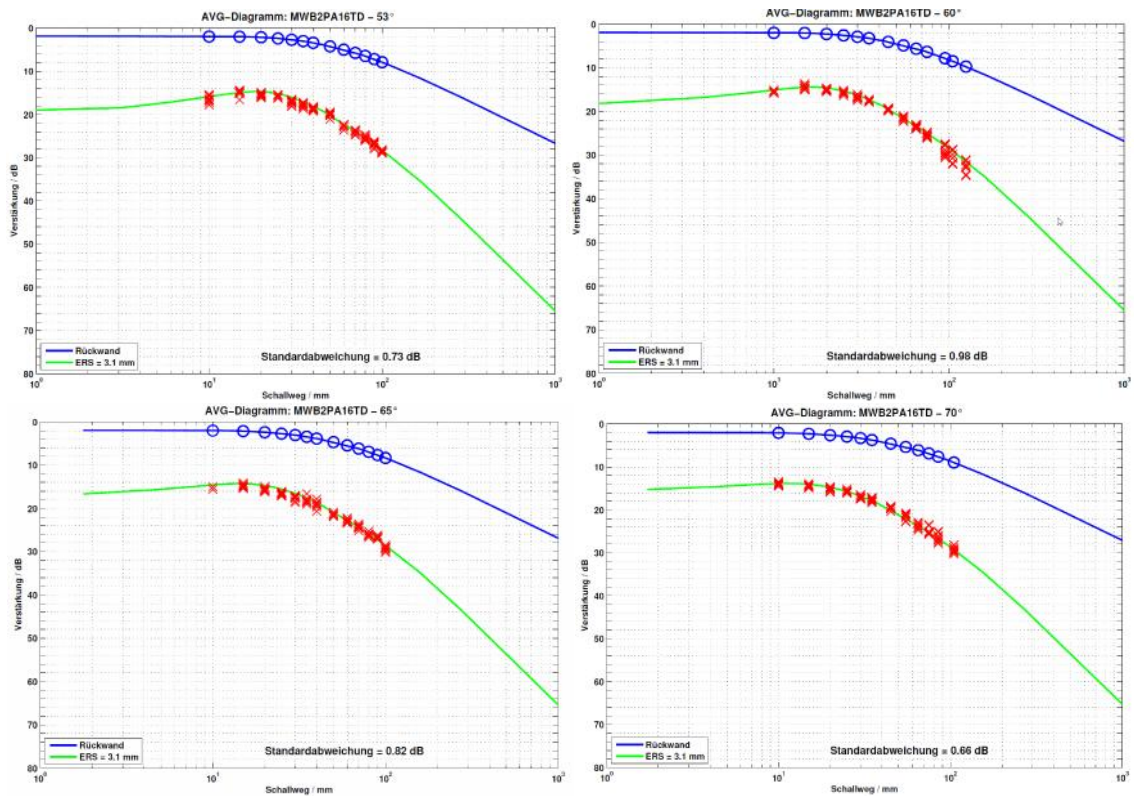


Abbildung 13: AVG-Genauigkeit beispielhaft bei 53°, 60°, 65° und 70°

Alle Messungen wurden von verschiedenen Prüfern mit verschiedenen Gruppentrahlern manuell durchgeführt. Die erreichte AVG-Genauigkeit ist hoch, wobei systematische Abweichungen nicht erkennbar sind.

### 4. Gekrümmte Ankoppelflächen

Die hier beschriebene Konstruktionsmethode kann auch bei gekrümmten Ankoppelflächen angewendet werden, solange diese mathematisch beschrieben werden können. Die fokussierende oder defokussierende Wirkung der gekrümmten Ankoppelfläche wird gewissermaßen herausgerechnet. Abbildung 14 zeigt ein Beispiel zur Kompensierung der Oberflächenkrümmung für eine Radsatzvollwelle der Bauart 013 der DB [4].

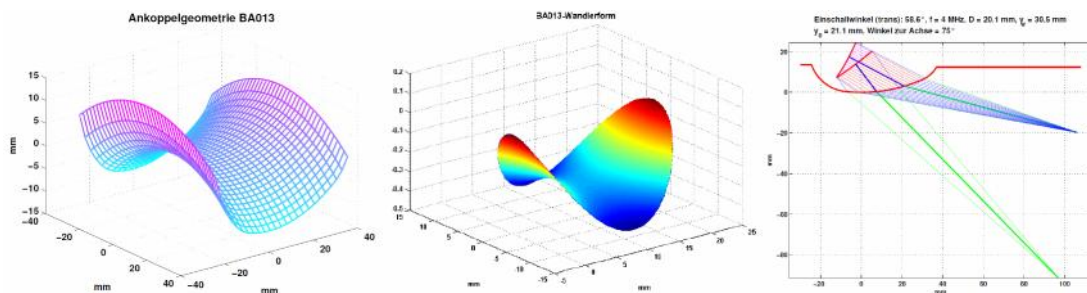


Abbildung 14: Beispiel für eine Radsatzvollwelle



Die unterschiedliche Skalierung der Z-Achsen ist zu beachten. Für die Berechnung der Verzögerungszeiten musste ein spezieller *Solver* entwickelt werden, da sich bei jeder Verschiebung auch der Einschallwinkel und die Vorlauflänge verändert.

## 5. Zusammenfassung

*trueDGS*<sup>®</sup>-Winkelprüfköpfe als Einschwinger oder Gruppenstrahler erreichen eine für Winkelprüfköpfe bisher nicht erreichte AVG-Genauigkeit. Die Schallfelder sind komplett modelliert und können einfach weiteren Berechnungen unterzogen werden, da die Schallfelder denen von Kreiswandlern entsprechen.

## Referenzen

- [1] Krautkrämer J., Krautkrämer H.: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, Fünfte, völlig überarbeitete Auflage, 1986
- [2] Yan X., Zhang J., Kass D., Langlois P.: DGS Sizing with Single Element and Phased Array Angle Beam Probe, Olympus, Waltham, MA, ndt.net November 2010
- [3] DIN EN 583.2001: Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Teil 2: Empfindlichkeits und Entfernungsjustierung; Deutsche Fassung EN 583-2:2001
- [4] Kleinert W., Chinata P. K.: *Automatisierte Prüfung von Eisenbahnvollwellen unter besonderer Berücksichtigung der Geometrieinflüsse*, DGZfP-Jahrestagung 2014 (Mi.3.A.2), Potsdam
- [5] Kleinert, W., Oberdörfer Y., Splitt G.: *The Ideal Angle Beam Probe for DGS Evaluation*, 10<sup>th</sup> ECNDT, Moskau 2010