

Herausforderungen bei der Prüfung von Schmiedeteilen durch Vorsatzkeile für Longitudinalwellenprüfköpfe

Daniel KOTSCHATE¹, Dirk GOHLKE¹, Paul DOBROVOLSKIJ², Johannes VRANA³ und Thomas HECKEL¹

¹Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

²Beuth Hochschule für Technik, Berlin

³Vrana GmbH, Rimsting

Kontakt E-Mail: daniel.kotschate@bam.de

Kurzfassung: Trotz moderner Sensortechnologien und Rekonstruktionsmethoden, findet die manuelle und automatisierte Ultraschallprüfung durch konventionelle Senkrecht- und Winkelprüfköpfe vielfach industriellen Einsatz. Um einen flexiblen Prüfeinsatz und die Prüfbarkeit von einfachen sowie komplexen Geometrien zu gewährleisten, werden dort oftmals Vorlaufkeile für die Winkelprüfung mit Longitudinalwellen angewendet um eine Anzeigenschräglage und deren Reflektivität auszugleichen bzw. zu verbessern. Durch den unterschiedlichen Aufbau, im Vergleich zu integrierten Scherwellen-Winkelprüfköpfen, können jedoch während der Prüfung Fehlanzeigen generiert werden. Diese fehlerhaften Anzeigen beruhen auf Mehrfachreflexionen und Wellenumwandlungen innerhalb des Vorlaufkeils, aufgrund der Geometrie und können im Feld nur bedingt von realen Anzeigen unterschieden werden. Dieser Beitrag zeigt die geometrische Betrachtung bei der Verwendung von Vorlaufkeilen und wurde experimentell durch die Bestimmung der Richtcharakteristik und dem Einsatz von elektrodynamischen Sonden validiert. Des Weiteren ermöglichen die so gewonnenen Abhängigkeiten einen vom Keilwinkel abhängigen Verstärkungsausgleich und somit eine korrekte Größenbestimmung durch einen geeigneten Vergleichsfehler.

1 Einführung

Dezentral liegende Anzeigen in rotationssymmetrischen Bauteilen oder allgemein schrägliegende Reflektoren können kritisch sein [1]. Daher sind in manchen Fällen Prüfungen mit einem Einschallwinkel größer 0° notwendig. Bei großen Winkeln (bis zum ersten kritischen Winkel - in Stahl 35 - 90°) kommen daher Scherwellen zum Einsatz. Bei kleineren Eintrittswinkeln treten Longitudinal- und Scherwellen gemeinsam auf. Dabei nimmt bei zunehmendem Winkel die Intensität der Longitudinalwelle ab und die der Scherwelle zu. Daher werden bei kleinen Winkeln (in Stahl 0 - 35°) üblicherweise Longitudinalwellenprüfköpfe mit Vorsatzkeilen verwendet. Durch die zusätzlich eingebrachte Grenzfläche treten, unter Berücksichtigung des Brechungsgesetzes, neben einer Anregung von Transversalwellen auch Mehrfachechos auf.



Durch die unterschiedlichen Laufzeiten können neben zulässigen, registrierpflichtigen und unzulässigen Anzeigen, auch weitere Anzeigen auftreten, welche durch den verwendeten Vorlaufkeil selbst erzeugt wurden. Des Weiteren nimmt, wie schon erwähnt, die Intensität der Longitudinalwelle mit zunehmendem Winkel ab. Daraus resultierend ergibt sich eine mögliche Unterbewertung eines Reflektors und somit eine abweichende Größenbestimmung. Ziel dieses Beitrages ist die Untersuchung und der Nachweis möglicher Mehrfachechofolgen und die Untersuchung der entstehenden Echoabfalls durch die Anregung von Transversalwellen.

2 Theoretische Beschreibung

Die Verwendung von Vorlaufkeilen lässt sich vereinfacht als Wellenausbreitung an einer Grenzfläche beschreiben. Da durch den angeschliffenen Keil die Welle nicht senkrecht auf die Grenzfläche auftrifft, erfolgt die Brechung an der Grenzfläche gemäß dem Brechungsgesetz nach Snellius beschrieben durch Gleichung (1). Somit lässt sich eine gezielte Änderung des Einschallwinkels β an der Grenzfläche Vorsatzkeil-Werkstück unter Kenntnis der Schallgeschwindigkeiten der beteiligten Teilschichten $c_{1,2}$ und einer geeigneten Wahl des geschliffenen Winkels α für den Vorsatzkeil und unter Anwendung des Brechungsgesetzes berechnen.

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{c_2}{c_1} \sin(\alpha) \right). \quad (1)$$

Für einen Senkrechtprüfkopf mit aufgeschraubtem Vorsatzkeil ist dieser Ansatz jedoch nur bedingt korrekt, da sich aufgrund der endlich ausgedehnten Keilgeometrie die Brechung an der Grenzfläche Keil-Werkstück periodisch fortsetzt. Diese periodische Fortsetzung erfolgt nach geometrischer Betrachtung für den Hauptstrahl mit dem Zusammenhang

$$\beta_n = (2n + 1) \times \sin^{-1} \left(\frac{c_2}{c_1} \sin(\alpha) \right), \quad (2)$$

wobei n die Ordnung des Winkels darstellt. Ein weiterer wichtiger Aspekt der höheren Winkel ist die damit resultierende Anregung von Transversalwellen. Abbildung 1 a) zeigt den geometrischen Zusammenhang zwischen Keilwinkel α und der generierten Serie von Einschallwinkeln β_n .

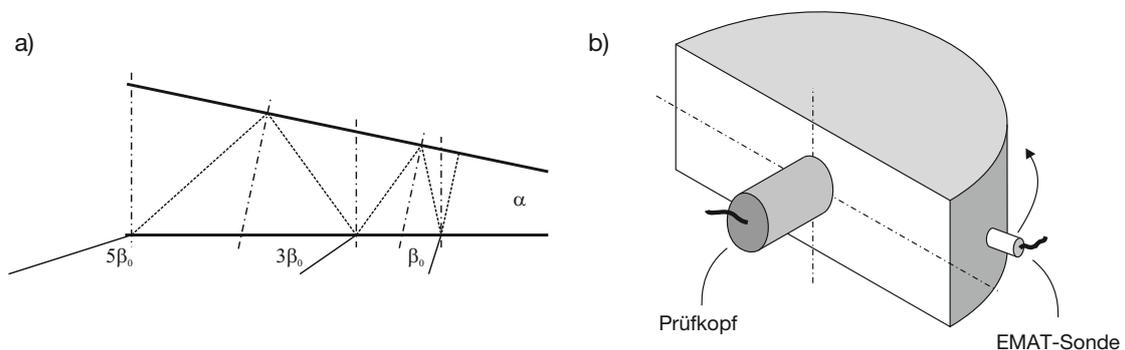


Abbildung 1. a) Schematische Darstellung und geometrische Beschreibung der höheren Winkel, erzeugt durch die Vorlaufkeilgeometrie. b) Experimenteller Aufbau mit Halbzylinder und EMAT-Sonde als Detektor.

Tabelle 1. Genutzte Materialparameter für die Simulation der Wellenausbreitung in Abb. 2.

	Keil	Stahl	Luft
Dichte ρ	1190 kg/m ³	7850 kg/m ³	1,24 kg/m ³
Schallgeschwindigkeit c_l	2320 m/s	5920 m/s	343 m/s
Schallgeschwindigkeit c_t	-	3320 m/s	-

Zur Simulation der Mehrfachechofolgen und der daraus resultierenden Nebenkeulen innerhalb der Richtcharakteristik wurde der Aufbau unter Nutzung der MATLAB-Toolbox *k-Wave* [2] nachgebildet und die Ausbreitung der akustischen Wellenpakete berechnet. Dabei wurden alle auftretenden Grenzflächenübergänge (Prüfkopf-Keil und Keil-Halbzylinder) geometrisch definiert und mit den entsprechenden Materialkennwerten gemäß Tabelle 1 versehen.

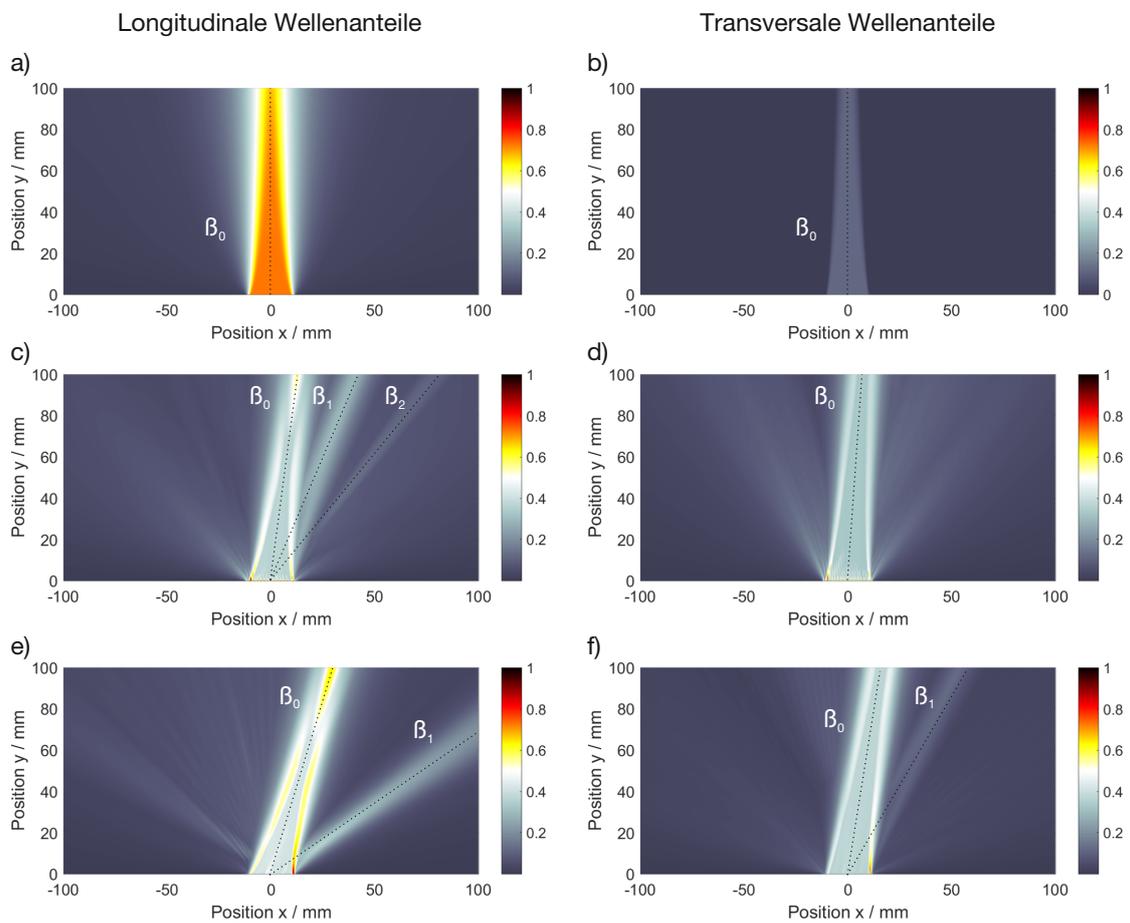


Abbildung 2. Simuliertes Druckfeld für longitudinale und transversale Wellenanteile und die Erzeugung höherer Winkel in Stahl. Die Keilwinkel variieren mit der Zeile. a) und b) zeigen einen Vorlaufkeil von 0°, c) und d) 2,74° und e) und f) einen Winkel von 6,21°. Die Simulation wurde unter Nutzung der MATLAB-Toolbox *k-Wave* [2] erstellt. Dabei erfolgte eine Normalisierung auf den Maximaldruck.

Abbildung 2 zeigt dabei die angeregten longitudinalen und transversalen Druckfelder im Medium Stahl für die Winkel $\alpha = 0^\circ, 2,74^\circ$ und $6,21^\circ$. Auffällig sind dabei die erzeugten Nebenkeulen und die zunehmende Amplitude der Druckverteilungen für die transversalen Wellenfelder für $\alpha = 2,74^\circ$ und $6,21^\circ$. Bei kleineren Winkeln (Teilabbildung c)) sind neben der Hauptkeule auch Winkel höherer Ordnung für die longitudinalen Wellenanteile deutlich zu erkennen und auch die Intensität des transversalen Anteils nimmt zu.

3 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentelle Validierung der im vorherigen Abschnitt durch Simulation gewonnenen Ergebnisse erfolgte durch die Bestimmung der Richtcharakteristik für die entsprechenden Wellenanteile. Dabei wurden für beide Fragestellungen (Mehrfachreflexionen und Amplitudenabfall) die Untersuchung unter Hilfenahme eines vorhandenen Messaufbaus zur Charakterisierung von Kontakttechnikprüfköpfen [3] durchgeführt. Die Messung der akustischen Wechselwirkung erfolgte durch eine EMAT-Sonde der Fa. WAZAU, welche nach anschließender Vorverstärkung durch eine 12-Bit Digitizer-Karte der Fa. National Instruments digitalisiert wurde. Die akustische Anregung erfolgte dabei durch eine Ultraschalleinschubkarte der Fa. Socomate. Durch die Nutzung eines motorisierten Arms wird ein Winkelbereich von -90 und 90° entlang eines Halbzylinders abgebildet und somit alle ausgesendeten akustischen Emissionen aufgezeichnet. Zur messtechnischen Validierung der theoretischen Beschreibung der erzeugten Mehrfachreflexionen, wurden Vorsatzkeile im Bereich 0 und 35° aus Rexolite[®], bezogen auf die mechanischen Parameter des B2S, verwendet. Das Messprinzip beruht auf einem konstanten Schallweg $s > N$ von 100 mm (siehe Abb. 1 b)). Somit werden auch auftretende, durch Mehrfachbrechung der einfallenden Longitudinalwelle an der Grenzfläche Keil-Werkstück resultierende Wellenfronten, detektiert. Für den getrennten Nachweis von Longitudinal- und Transversalwellen wurden unterschiedliche Sonden mit unterschiedlichem Aufbau genutzt. Dabei entscheidet die Wicklungsrichtung der Spule um den verbauten Permanentmagneten über die richtungsabhängige Empfindlichkeit der Sonde.

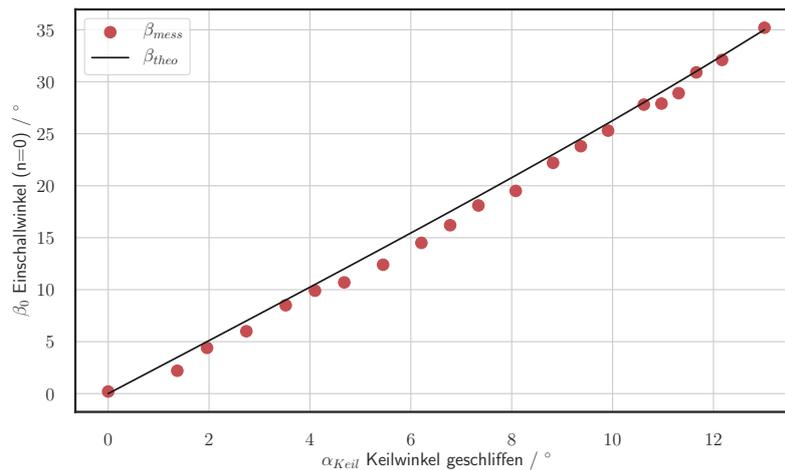


Abbildung 3. Resultierender Einschallwinkel β_0 und theoretisch berechneter Einschallwinkel über angeschliffenen Keilwinkel α . Für die Berechnung wurde Gleichung (2) unter Verwendung der Materialkennwerte aus Tabelle 1 genutzt.

3.1 Nachweis von Mehrfachreflexionen im Vorlaufkeil

Durch die hohe Anzahl von Vorlaufkeilen stellte sich die exakte Positionierung des Prüfkopfs in Kombination mit dem Vorlaufkeil anspruchsvoll heraus. Für die Kontrolle der theoretisch berechneten Einschallwinkel β unter den gegebenen geschliffenen Keilwinkeln α und der korrekten Positionierung des Schallaustrittspunktes erfolgte durch die Vermessung der Richtcharakteristik für jeden Keilwinkel. Dazu wurde der verwendete Prüfkopf (B2S) in Kombination mit dem Vorlaufkeil mit seinem Schallaustrittspunkt im Mittelpunkt des Halbzylinders positioniert und das Maximum der resultierenden Richtcharakteristik ermittelt. Abbildung 3 zeigt die Übereinstimmung der theoretisch berechneten Werte unter Nutzung von Gleichung (1) und der bestimmten Richtcharakteristiken der Hauptkeule über den Keilwinkel aufgetragen. Nach Ausrichtung erfolgte unter Anwendung der Empfindlichkeits- und Entfernungsjustierung und stellte sicher, dass der Schallaustrittspunkt zu jedem Punkt auf der Mantelfläche einen identischen Abstand aufweist. Dabei ist festzustellen, dass die höheren Nebenmaxima für kleinere Winkelwerte ($\beta \leq 6^\circ$) sich innerhalb der Richtcharakteristik der Druckwellenanteile (gebildet über den Maximalwert des Zeitsignals) nicht von der Hauptkeule, sich aber hinsichtlich ihrer Laufzeit im A-Bild zeitlich trennen lassen. Die resultierende Hauptkeule erscheint aufgrund der Datenerfassung in diesem Winkelbereich divergenter. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wurde die zeitliche Trennung durch eine laufzeitabhängige Fensterung im Zeitbereich realisiert.

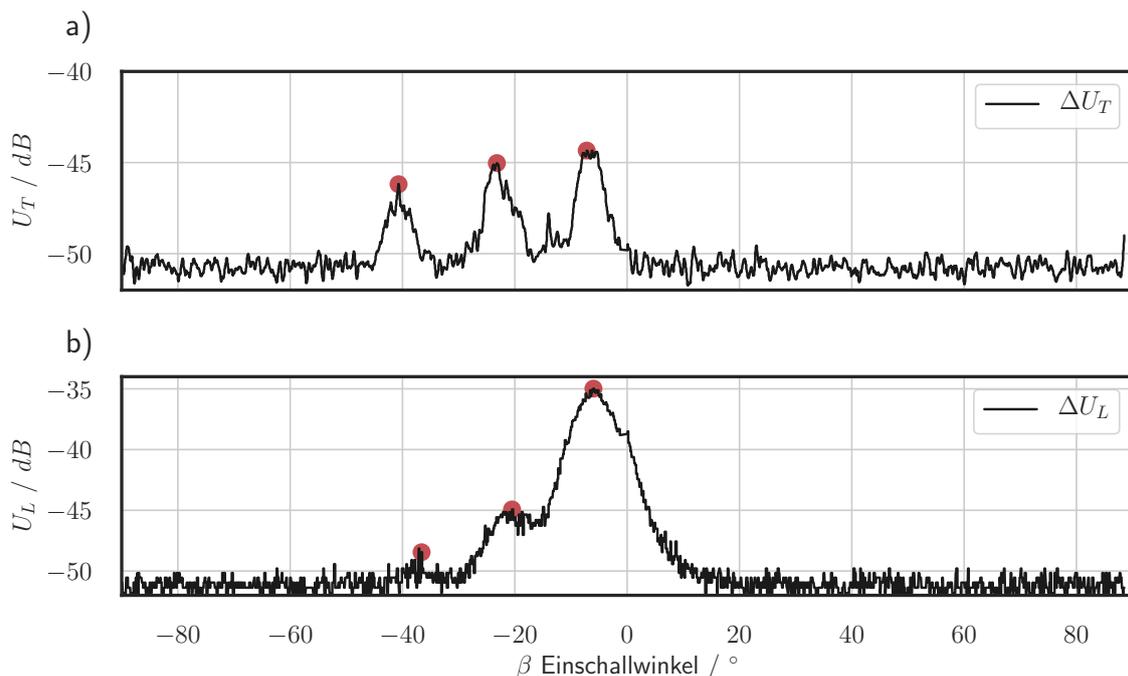


Abbildung 4. a) Richtcharakteristik der Schwerwellenanteile für einen Keilwinkel ($\alpha = 7^\circ$) mit den Einschallwinkeln $\beta_{n=0,1,2} = 7,2^\circ, 23,2^\circ$ und $40,7^\circ$.
b) Richtcharakteristik der Druckwellenanteile für eine Keilwinkel ($\alpha = 2,74^\circ$) und den, aus der Mehrfachreflexion heraus, erzeugten Haupt- und Nebenmaxima ($\beta_{n=0,1,2} = 6^\circ, 20,5^\circ$ und 36°).

Abbildung 4 a) zeigt die angeregten Schwerwellenanteile für einen Vorlaufkeil $\alpha = 7^\circ$ und die angeregten höheren Winkel mit einem geringeren Amplitudenabfall. Die Anzahl der detektierten Maxima wurde hier allein durch die Aufnahmelänge begrenzt. So das davon auszugehen ist, dass mit höherer Aufnahmelänge auch weitere höhere Winkel zu detektieren sind. Abbildung 4 b) zeigt exemplarisch eine aufgenommene Richtcharakteristik für einen Vorlaufkeil $\alpha = 2,74^\circ$ und die resultierenden longitudinalen Wellenanteile. Neben der Hauptkeule bei 6° sind noch weitere Winkel ($20,5^\circ$ und 36°) mit geringer Amplitude -10 dB und -13 dB detektierbar. Dabei lassen sich die detektierten Winkelwerte durch Gleichung (2) unter Berücksichtigung eines geringen Fehlers genau vorhersagen.

3.2 Winkel- und wellenabhängige Empfindlichkeit

Wie in Abschnitt 2 beschrieben und per Simulation berechnet wurde, nehmen die longitudinalen Wellenanteile mit steigendem Winkel an Intensität ab und die transversalen Wellenanteile treten stärker hervor. Gemäß Brechungsgesetz Gleichung (1) ergibt sich, unter Berücksichtigung, der Schallgeschwindigkeit von transversal und longitudinal ausbreitender Wellen in Teilgebiet 2 (Stahl), die Möglichkeit der Anregung der entsprechenden Wellenart. Wird nun von einer rein longitudinal angeregten Welle im Prüfkörper ausgegangen, ergibt sich aufgrund der Anregung von Transversalwellen eine entsprechende Unterbewertung eines Reflektors. Um die Auswirkung näher quantifizieren zu können, wurden die unterschiedlichen Wellenanteile durch die Nutzung von unterschiedlichen EMAT-Sonden erfasst [4] und die Amplitude $U_{L,T}(\beta_0)$ ausgewertet und in Abbildung 5 dargestellt.

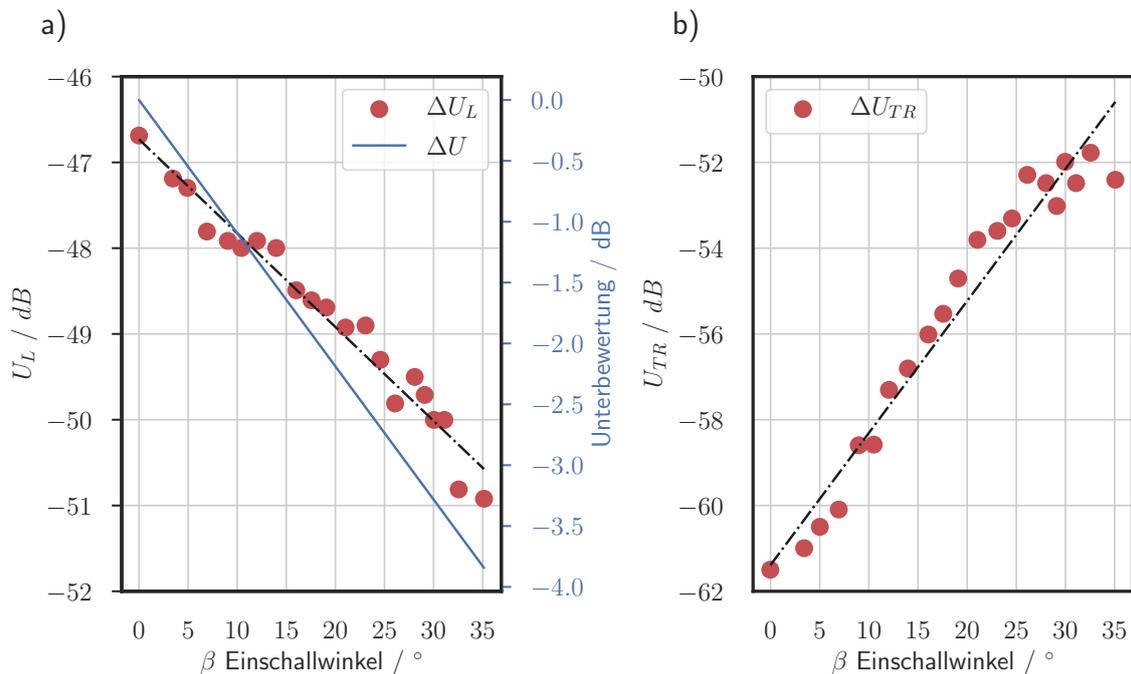


Abbildung 5. Abhängigkeit des eingekoppelten (a) Longitudinal- und (b) Transversalwellenanteils β_0 für alle vermessenen Keilwinkel und Unterbewertung (a).

Unter Berücksichtigung der Kurvenverläufe in Abb. 5 erfolgt die erwartete Zunahme der transversalen und eine Abnahme der longitudinalen Anteile. Für eine entsprechende Korrektur der Amplitude kann von einem nahezu linearen Verlauf ausgegangen werden. So ergibt sich bei einem Einschallwinkel von 35° ein Amplitudenfehler von 4 dB in der Größenbestimmung. Durch die Abnahme der Intensitäten kann unter Verwendung der Größengesetze die Unterwertung eines Reflektors berechnet werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Vorlaufkeilen zur winkelabhängigen Amplitudenbewertung von schrägliegenden Reflektoren besonders für kleine Keilwinkel ($\beta \leq 6^\circ$) ohne Berücksichtigung einer winkelabhängigen Amplitudenkorrektur durchgeführt werden kann, da der Fehler hinsichtlich der Größenbestimmung kleiner als 0,5 dB liegt. Für den Einsatz von größeren Keilwinkeln ergibt sich die Notwendigkeit einer zusätzlichen, in erster Näherung linearen, Vorverstärkung während der Prüfung. Für die Charakterisierung von Prüfköpfen mit langen Vorlaufstrecken, Vorlaufkeilen oder SE-Prüfköpfen wurde die Erhebung der Messdaten durch eine zeitliche Fensterung verbessert.

5 Danksagung

Die Autoren möchten der Fa. Siemens für die Bereitstellung der Vorsatzkeile und Herrn Rainer Boehm für die fruchtbaren Diskussionen danken. Die dargestellten Messungen wurden im Rahmen der Bachelorarbeit von P. Dobrovolskij aufgenommen.

Literatur

- [1] J. Vrana, A. Zimmer, H. Lohmann, and W. Heinrich. Evolution of the Ultrasonic Inspection over the Past Decades on the Example of Heavy Rotor Forgings. In *19th World Conf. Non-Destructive Test.*, 2016.
- [2] Bradley E. Treeby and B. T. Cox. k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields. *J. Biomed. Opt.*, 2010.
- [3] Daniel Kotschate, Silvia Meinig, and Thomas Heckel. Bestimmung der Richtcharakteristik von Senkrecht- und Winkelprüfköpfen in Kontakttechnik. In *DGZfP Jahrestagung 2015*, Salzburg, Austria, 2015.
- [4] Hermann Wüstenberg. Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall. Technical Report 27, 1974.