

Detektion und Evaluation von Inhomogenitäten im Volumen und an inneren Grenzflächen in polymeren Isoliersystemen mittels Ultraschall

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur
Philipp James Ludwig Walter
aus Düsseldorf

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Michael Vorländer

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Dezember 2006

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek der
RWTH Aachen online verfügbar.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler, der diese Arbeit ermöglichte. Sein Vertrauen, seine stete Unterstützung und wertvollen Ratschläge trugen wesentlich zum Gelingen der Arbeit bei.

Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Michael Vorländer danke ich für die Übernahme des Korreferats und für sein Interesse an der Arbeit.

Weiterhin richtet sich mein Dank an die Herren Dr. Christian Cornelissen und Torsten Wirz, die diese Arbeit durch viele fachlichen Diskussionen förderten und sich engagiert bei der Durchsicht der schriftlichen Ausfertigung zeigten.

Ich danke allen Mitarbeitern des Instituts für Hochspannungstechnik für die regen Diskussionen und ihre Unterstützung dieser Arbeit sowie allen Studenten, die als Diplomarbeiter, Masterarbeiter, Studienarbeiter und studentische Hilfskräfte zum Gelingen beigetragen haben.

Ich bedanke mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung der Arbeit im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Zustandsbewertung von Betriebsmitteln und Anlagen der elektrischen Energieversorgung“.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Mutter sowie bei meiner Lebensgefährtin Dr. Elena Kemper für ihr Verständnis, ihre Geduld und ihre Hilfe bedanken.

Aachen, im Dezember 2006
Philipp Walter

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Untersuchung des Potenzials der Ultraschalldiagnostik zur Zustandsbewertung von polymeren Isoliersystemen. Es werden als Schädigungsformen singuläre Fehlstellen im Isolervolumen sowie Inhomogenitäten an inneren Grenzflächen betrachtet, welche ein relevantes Schädigungspotenzial hinsichtlich der Isolationsfähigkeit aufweisen. Die Detektion solcher Inhomogenitäten und die Evaluation von den das Schädigungspotenzial bestimmenden Parametern, wie die Bestimmung der Größe eines singulären Fremdstoffeinschlusses und die Ermittlung einer Delamination an einer inneren Grenzfläche, sind in polymeren Isoliersystemen in der Vergangenheit mittels Ultraschall nicht ausreichend untersucht worden. In dieser Arbeit werden Verfahren für die Detektion und Evaluation der beschriebenen Fehlstellen vorgestellt.

Im Rahmen der Arbeit wird ein Ultraschall-Messsystem verwendet, welches die automatisierte Durchführung von Ultraschall-Messungen erlaubt. Die zu untersuchenden Prüfkörper werden in der Tauchtechnik vermessen, wobei Wasser zur Ankopplung verwendet wird. Mittels der entwickelten Software DISCUS wird eine Weiterverarbeitung und Auswertung der Messergebnisse erreicht.

Für die Bewertung der Größe einer detektierten Fehlstelle ist die Vergleichskörpermethode geeignet. Durch die Ermittlung der kugel- und kreisscheibenförmigen Ersatzreflektorgroße kann die voraussichtlich zu erwartende sowie die minimale Fehlergröße eines Lufteinschlusses, dessen Größe im Bereich von 0,2 mm bis 3 mm liegt, unabhängig von der Tiefenlage angegeben werden. Es werden Einflussgrößen auf die Größenbestimmung, wie die Art des betrachteten Silikonelastomers und die Temperatur, untersucht.

Eine Aussage über das Material einer Fehlstelle kann durch die Auswertung der Phasenlage der reflektierten Echoimpulse erreicht werden. Informationen über die Geometrie und Orientierung einer Fehlstelle können durch die Anwendung eines Winkelprüfverfahrens gewonnen werden. Als Bewertungsverfahren wird die Dynamik der Reflektivität über dem Einschallwinkel vorgestellt. Hierbei müssen zunächst Grenzflächeneffekte, wie die Abhängigkeit der Echodurchlässigkeit vom Einschallwinkel oder die Brechung an der Oberfläche des Elastomers, berücksichtigt werden. Es wird gezeigt, dass eine Unterscheidung zwischen flächigen und kugelförmigen Inhomogenitäten unter Angabe der Vorzugsrichtung möglich ist.

Hinsichtlich der Diagnostik von inneren Grenzflächen wird ein automatisiertes Verfahren entwickelt, welches auf einem normierten Korrelationsalgorithmus basiert und den an einer Delamination entstehenden Phasensprung durch Ermittlung des Ähnlichkeitsmaßes zwischen Echosignalen auswertet. Als Ergebnis liefert das Verfahren eine farbskalierte Korrelationskarte (K-Bild) der untersuchten Grenzfläche. Mittels des Verfahrens können an den Grenzflächen Silikon-Metall, Silikon-Epoxidharz und Epoxidharz-Metall in Abhängigkeit von der Dicke der über der Grenzfläche liegenden Schicht offene Delaminationen ab einer Größe von 1 mm sowie an der Grenzfläche angeordnete Fehlstellen ab einer Größe von 0,4 mm detektiert werden.

Die Analyse der Leistungsfähigkeit der bereitgestellten Verfahren zeigt somit, dass eine Vielzahl von relevanten Einflüssen auf das Schädigungspotenzial einer Inhomogenität in polymeren Isoliersystemen untersucht und bewertet werden kann.

Abstract

In this thesis, the appliance of ultrasonic diagnostics for the condition assessment of polymeric insulation systems is investigated. Especially, singular flaws in the insulation volume and inhomogeneities at inner material interfaces are regarded including a relevant risk potential concerning the isolation capability. The detection of such inhomogeneities and the evaluation of parameters that affect the risk potential like sizing of a singular flaw or determination of a delamination at an inner boundary are not well investigated yet. This thesis presents methods for the detection and evaluation of the inhomogeneities described above.

An ultrasonic measurement system is used that allows automated measurements applying the immersion technique with water as acoustic coupling material. The data processing and interpretation of the measurement results are done with the developed software DISCUS.

The reference block method is suited for sizing a detected and localised flaw. By evaluating the spherical and discoidal reference reflector size, the minimal and the expected dimension of an gas-filled void with a size in the range of 0,2 mm to 3 mm can be specified independent of the depth position. Furthermore, influencing parameters on the sizing result like kind of the regarded silicone rubber or temperature are analysed. Conclusions on the flaw material can be made by evaluating the phasing of the reflected ultrasonic impulses. Information of the flaw geometry and orientation are gained by setup the transducers in different angles. As an evaluation method, the dynamic of the reflectance over the intromission angle is presented. It can be shown that a differentiation between planelike and ball-shaped flaws is possible if the boundary specific effects are considered like dependence of intromission angle on the echo transmissibility or the refraction at the test piece surface.

Regarding the diagnostic of inner material interfaces, an automated method is developed basing on a correlation algorithm. The method evaluates the phase jump resulting at a delamination by calculating the similarity measure of echo impulses. As a result the method provides a colour scaled correlation map (K-Scan) of the investigated material interface. Thereby, open delaminations with a diameter of 1 mm can be detected automatically at interfaces such as silicone - metal, silicone - epoxy resin and epoxy resin - metal, in dependence of the layer thickness above the interface. In addition, singular flaws at interfaces with a size of 0,4 mm can be detected.

The capability analysis of the presented methods shows that a multitude of relevant influences on the risk potential of an inhomogeneity in polymeric insulation systems can be investigated and evaluated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	<i>Einführung in die Thematik</i>	<i>1</i>
1.2	<i>Stand des Wissens</i>	<i>3</i>
1.3	<i>Ziel der Arbeit.....</i>	<i>6</i>
2	Grundlagen der Isolierstofftechnik.....	7
2.1	<i>Polymere Isolierstoffe.....</i>	<i>7</i>
2.1.1	<i>Silikonelastomere</i>	<i>8</i>
2.1.2	<i>Verbundsysteme</i>	<i>13</i>
2.2	<i>Analyse möglicher Fehlerformen und deren Schädigungspotenzial.....</i>	<i>16</i>
2.2.1	<i>Singuläre Fehlstellen im Isolierstoff-Volumen.....</i>	<i>17</i>
2.2.2	<i>Inhomogenitäten an inneren Grenzflächen</i>	<i>24</i>
3	Grundlagen der Ultraschalldiagnostik	29
3.1	<i>Grundlagen der Ultraschallakustik</i>	<i>29</i>
3.1.1	<i>Schallfeldgrößen.....</i>	<i>29</i>
3.1.2	<i>Verhalten an Grenzflächen</i>	<i>31</i>
3.1.3	<i>Schallschwächung</i>	<i>33</i>
3.2	<i>Ultraschall-Diagnosetechnik</i>	<i>34</i>
3.2.1	<i>Impuls-Echo-Verfahren</i>	<i>35</i>
3.2.2	<i>Prüfköpfe und Abstrahlcharakteristik.....</i>	<i>37</i>
3.2.3	<i>Ultraschall-Bildgebung.....</i>	<i>40</i>
3.2.4	<i>Grundlagen der Signalverarbeitung.....</i>	<i>40</i>
3.3	<i>Methoden der Ergebnisevaluation.....</i>	<i>42</i>
3.3.1	<i>Bewertung hinsichtlich Größe und Geometrie</i>	<i>42</i>
3.3.2	<i>Bewertung hinsichtlich des Materials.....</i>	<i>49</i>
4	Material und Messeinrichtung	50
4.1	<i>Anforderungen an den Prüfprozess</i>	<i>50</i>
4.2	<i>Prüfkörper</i>	<i>52</i>
4.2.1	<i>Silikonelastomere</i>	<i>52</i>
4.2.2	<i>Verbundsysteme</i>	<i>53</i>

4.2.3 Akustische Eigenschaften	54
4.3 <i>Messsystem</i>	54
4.3.1 Prüfköpfe.....	55
4.3.2 Mechanische Messkomponenten.....	56
4.3.3 Software	57
5 Diagnostik von singulären Fehlstellen	59
5.1 <i>Detektion von singulären Fehlstellen</i>	59
5.1.1 Detektion von kugelförmigen Fehlstellen	60
5.1.2 Detektion von faserförmigen Fehlstellen	60
5.1.3 Auflösbarkeit von Fehlstellenstrukturen	62
5.2 <i>Evaluation von singulären Fehlstellen</i>	65
5.2.1 Analyse von geeigneten Prüfverfahren	65
5.2.2 Vergleichskörpermethode	68
5.2.3 Winkelprüfverfahren	81
6 Diagnostik von Inhomogenitäten an Grenzflächen	92
6.1 <i>Detektion und Evaluation von Delaminationen</i>	92
6.1.1 Verfahren zur automatisierten Grenzflächen-Bewertung.....	92
6.1.2 Ergebnis anhand einer Beispielkonfiguration.....	97
6.1.3 Analyse der Einflussparameter.....	100
6.2 <i>Detektion von Fehlstellen an einer Grenzfläche</i>	114
6.2.1 Prüfverfahren.....	114
6.2.2 Ergebnisse und Analyse der Leistungsfähigkeit.....	116
7 Zusammenfassung	121
Literaturverzeichnis.....	126
Anhang A: Ergänzungen zu Abschnitt 5.2.2.....	149
Anhang B: Abkürzungen und Formelzeichen	151

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Thematik

Polymere Isoliersysteme kommen in Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik in der Hoch- und Mittelspannungsebene heutzutage standardmäßig zum Einsatz. Insbesondere Silikonelastomere werden in zunehmenden Maße als elektrischer Isolierstoff eingesetzt [Kin03a]. Die Anforderungen an die Betriebsmittel und deren Isoliersysteme, insbesondere die Erwartung an die Lebensdauer, sind in der Vergangenheit zunehmend gestiegen. Die Ursachen liegen in einer höheren Auslastung und einer kompakteren Bauweise der Betriebsmittel, welche zu einer Zunahme der elektrischen, thermischen und mechanischen Beanspruchungen führen, sowie im Wechsel von der früheren zeitabhängigen Wartung zu einer zustandsabhängigen Wartung, wodurch einzelne Betriebsmittel deutlich länger im Betrieb bleiben [Goc03, Wiz02]. Bei Isoliersystemen wird eine hohe Qualität der Materialien verlangt, da bereits kleine Inhomogenitäten in den Isoliersystemen ein Schädigungspotenzial aufweisen können, so dass die Lebensdauer beeinträchtigt werden kann oder die Isolierfähigkeit vollständig versagt [Kin82, Küc05].

Im Bereich der polymeren Isolierstoffe lassen sich drei Gruppen von Schädigungsformen finden:

- *Fremdstoffe im Isolierstoffvolumen:*
Im Isolierstoffvolumen können Fremdstoffe auftreten. Diese zumeist lokal begrenzten singulären Inhomogenitäten können insbesondere Luft- oder Fremdkörpereinschlüsse darstellen (vgl. Abschnitt 2.1.1). Das Schädigungspotenzial dieser Schädigungsform wird neben der Lage im elektrischen Feld u.a. von der Größe, der Geometrie, der Orientierung und dem Material der Inhomogenität beeinflusst (vgl. Abschnitt 2.2.1).

- *Inhomogenitäten an Grenzflächen:*

Wenn das Betriebsmittel einen Materialverbund aufweist, können Inhomogenitäten an inneren und äußeren Grenzflächen auftreten. Innere Grenzflächen können von zwei Isolierstoffen oder von einem Isolierstoff und einem leitfähigen Material gebildet werden (vgl. Abschnitt 2.2.1). Eine Inhomogenität kann zum einen durch eine unzureichende Festigkeit des Materialverbunds gebildet werden. Zum anderen können Fehlstellen an der Grenzfläche durch Fremdstoffe an der Grenzfläche oder Unregelmäßigkeiten eines Grenzflächenmaterials verursacht werden (vgl. Abschnitt 2.2.2).

- *Volumenwirksame Einflüsse:*

Auf das Isoliersystem können volumenwirksame Einflüsse wirken. Darunter werden Fehlerformen zusammengefasst, welche nicht lokal deutlich begrenzt sind, sondern welche das Isoliermaterial als solches aufweist. Beispiele hierfür ist eine während der Herstellung entstehende inhomogene oder unvollständige Vernetzung, unregelmäßige Verteilung von Füllstoffen oder eine durch mechanische Belastung oder Alterung verursachte Versprödung.

Es gibt eine Reihe von Verfahren zur Bewertung des Zustandes von polymeren Isoliersystemen, wie beispielsweise die Messung der Spannungsfestigkeit, die Teilentladungsmessung, die Verlustfaktormessung, die Messung von Depolarisationsströmen sowie optische und chemische Untersuchungen der Isolierstoffe [Goc04, Kin82, Koe93, Küc05, Mar05]. Die genannten Verfahren weisen jedoch in der Regel Nachteile auf: entweder gestatten sie keine umfassende Untersuchung, da mit ihnen nur globale Aussagen über den Zustand des Betriebsmittels möglich sind oder sie liefern nur Ergebnisse, wenn ein Schädigungsprozess bereits eingesetzt hat, wie z.B. die Teilentladungsmessung [Kön93]. Es bleibt festzuhalten, dass bei den bekannten Verfahren zur Zustandbewertung von Isoliersystemen der Rückschluss auf die Anzahl, den Ort, die Art oder das Ausmaß der vorliegenden Schädigungsform nur eingeschränkt möglich ist.

Ein bewährtes Verfahren der zerstörungsfreien Materialprüfung ist die Ultraschalldiagnostik, welche jedoch bei Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik bislang kaum Anwendung findet. Ultraschall-Verfahren werden bereits seit Mitte des 20. Jahrhunderts in verschiedenen Bereichen der Technik erfolgreich verwendet. Wichtige Anwendungen betreffen beispielsweise die Werkstoffprüfung fester Körper, die Diagnostik in der Medizin, das Echolot-Verfahren in Gewässern sowie materialbearbeitende Verfahren wie das

Ultraschall-Schweißen oder -Reinigen [Deu97, Leh73]. In der Werkstoffprüfung haben sich Ultraschall-Verfahren vor allem zur zerstörungsfreien Untersuchung von Metallen oder Metallverbindungen, wie beispielsweise Schweißnähten, etabliert [Bli96, Car96, Kra86, Leh73].

Eine Zustandsbewertung mittels Ultraschall bietet eine Reihe von Vorteilen: Das Diagnoseverfahren ist nicht-destruktiv, so dass keine Schädigung des zu untersuchenden Prüfobjekts erfolgt. Das Verfahren bietet zudem die Möglichkeit einer Ortsauflösung, wodurch eine Bestimmung des Ortes und der Anzahl von Inhomogenitäten ermöglicht wird. Des Weiteren kann die Ultraschalldiagnostik bereits geringe Inhomogenitäten hochauflösend detektieren, wobei jedoch eine starke Abhängigkeit vom untersuchten Material, von der Inhomogenität und vom Prüfverfahren vorliegt. Durch die Anwendung der Ultraschalldiagnostik erscheint insgesamt bei vergleichsweise geringem Investitionsbedarf durch die Auswertung von Laufzeiten, Amplituden und Phasenlagen der Ultraschallsignale die Untersuchung eines breiten Spektrums von Inhomogenitäten möglich.

1.2 Stand des Wissens

Die Ultraschalldiagnostik wird im Bereich der Energietechnik bislang nicht standardmäßig zur Zustandsbewertung von polymeren Isoliersystemen eingesetzt, obwohl sie sich beispielsweise bei der Fehlstellendiagnostik von Keramik-Isolatoren und zur Überprüfung der Polyreaktionen bei dem Herstellungsprozess von Kunststoffen bewährt hat [Kra86, Sta04, Töp03].

In der Vergangenheit sind im Bereich der elektrischen Energietechnik zum einen einige Forschungsarbeiten an harten Polymeren, wie Polyethylen und Epoxidharze, durchgeführt worden [Auc90, Auc96, Mcg94, Smi03, Wat98]. Zum anderen wurde in der jüngeren Vergangenheit untersucht, inwieweit die Ultraschalldiagnostik mit moderner Messtechnik auch zur Zustandsbewertung von im Vergleich zu harten Polymeren hochdämpfenden elastomeren Isolierstoffen in Energiekabelsystemen Einsatz finden kann, wobei insbesondere das Material Silikonkautschuk betrachtet wird [Cor03a]. Ein Schwerpunkt dieser Forschungsarbeit lag auf der Untersuchung von volumenwirksamen Einflüssen. Es konnte gezeigt werden, dass eine unvollständige Vernetzung eines Silikonelastomers durch die veränderte Schallgeschwindigkeit nachweisbar ist. Bereiche inhomogener Vernetzung können durch einen höheren Rauschpegel detektiert werden. Ebenfalls kann eine mechanische

Beanspruchung, wie sie beispielsweise im Bereich der Kaltschrumpftechnik bei Kabelmuffen auftritt, durch Veränderungen der Schallgeschwindigkeit, welche aus Änderungen des Elastizitätsmoduls resultieren, nachgewiesen werden [Cor02].

Ein zweiter Schwerpunkt lag auf der Analyse von, insbesondere kugelförmigen, singulären Fehlstellen wie eingeschlossener Luftblasen. Es wurde gezeigt, dass solche Inhomogenitäten mittels Ultraschall automatisiert detektiert und lokalisiert werden können, wobei das Auflösungsvermögen in Silikon für relevante Fehlstellengrößen ($> 100 \mu\text{m}$) in relevanten Tiefen ($< 30 \text{ mm}$) als ausreichend angesehen wird. Zudem wird untersucht, welchen größenabhängigen, lichten Abstand eine Inhomogenität von der Grenzfläche aufweisen muss, um noch detektiert zu werden. Es wird eine Messmethode vorgestellt, mit der großvolumige Hochspannungsmuffen untersucht werden können, wobei die Ergebnisse zeigen, dass eine Anwendung der Ultraschalldiagnostik im Rahmen einer industriellen Qualitätskontrolle möglich ist [Cor04a, Wir06]. Die Integration der Ultraschallprüfung in den Prozessablauf könnte nach dem in Abbildung 1-1 gezeigten Schema erfolgen [Cor06]:

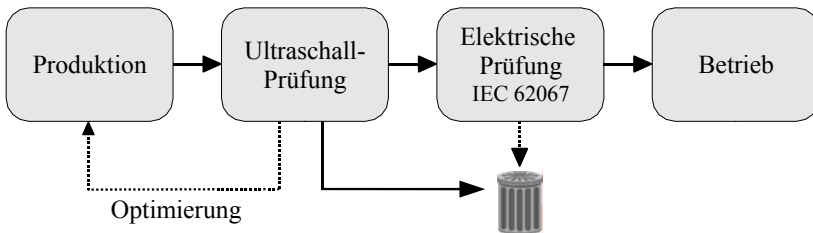


Abbildung 1-1: Integration der Ultraschallprüfung in den Prozessablauf

Standardmäßig wird jede Kabelmuffe nach der Produktion elektrisch getestet. Nur die Betriebsmittel, die diese elektrischen Stückprüfungen bestehen, werden in Betrieb genommen. Die elektrischen Tests sind jedoch sowohl zeit- als auch kostenintensiv. Ferner lassen sie aus den im Unterkapitel 1.1 genannten Gründen nur begrenzt eine Aussage über die Fehlerart zu, so dass eine Rückkopplung auf den Herstellungsprozess nur in begrenztem Maße möglich ist. Durch die Zwischenschaltung einer Ultraschallprüfung zwischen die Produktion und der elektrischen Prüfung könnte zum einen erreicht werden, dass Muffenkörper, bei welchen bereits mittels Ultraschall Inhomogenitäten diagnostiziert wurden, nicht mehr aufwändig elektrisch getestet werden müssen, sondern direkt aussortiert werden können. Zum anderen könnten aus dem Ergebnis der Ultraschall-

prüfung Rückschlüsse hinsichtlich der Fehlerart getroffen werden, so dass eine Optimierung des Produktionsprozesses möglich erscheint. Dieser Prozessablauf lässt sich auf viele Betriebsmittel übertragen. Je mehr Informationen hierbei über die Inhomogenitäten gefunden werden, umso mehr Vorteile können sich sowohl bei der Prognose der elektrischen Eigenschaften als auch bei der Optimierung des Herstellungsprozesses ergeben.

Werden Grenzflächen untersucht, kann sich die Bewertung neben der Diagnostik von Fehlstellen an Grenzflächen auf die Detektion von offenen Delaminationen beziehen. Wünschenswert wäre zudem die Ermittlung einer verminderten Haftfestigkeit, da diese ein Vorstadium einer offenen Delamination darstellt (vgl. Abschnitt 2.2.2) [Bau03].

Es wurden in der Vergangenheit einige Versuche durchgeführt, um die Qualität der Grenzfläche eines Materialverbundes, insbesondere die Haftfestigkeit, mit einem zerstörungsfreien Ultraschall-Prüfverfahren zu bestimmen, wobei vornehmlich die Amplitude und Phasenlage von Ultraschallimpulsen ausgewertet wurden [Alt63, Deu97, Kok04, Ric97, Rok93, Schi88]. Bislang ist es jedoch mit herkömmlichen Ultraschallverfahren nicht gelungen, eine gesicherte Aussage über die Haftfestigkeit zu erlangen.

Ein Ansatz liegt in der Verwendung von nichtlinearem Ultraschall, welcher auf der Erzeugung höherer Harmonischer an der kritischen Grenzfläche basiert [Faß96, Pan94, Rot03]. Der Effekt beruht darauf, dass bei der Durchschallung einer geklebten Grenzfläche eine monochromatische Ultraschallwelle auf Grund der Nichtlinearität der Materialien in Abhängigkeit von der Klebung Oberwellen erzeugt, welche im Frequenzbereich ausgewertet werden können. Allerdings leidet dieses Verfahren an praktischen und grundsätzlichen Einschränkungen [Net03].

Ein weiterer Ansatz zur Bestimmung der Haftfestigkeit ist die photothermisch modulierte Ultraschallreflexion, auch US-Lock-In-Thermografie genannt [Bau03, Net03, Zwe00]. Hierbei wird neben einem Laser, welcher die Grenzfläche periodisch thermoelastisch anregt, ein breitbandiger Hochfrequenz-Prüfkopf verwendet, welcher kurze Ultraschallimpulse mit Frequenzen im Bereich von 10 MHz bis 100 MHz aussendet. Auf Grund der hohen akustischen und thermischen Dämpfung in den untersuchten Polymeren erscheint eine Anwendung dieses Verfahrens wenig aussichtsreich.

1.3 Ziel der Arbeit

Ein wesentliches Ziel der Arbeit ist es, die Leistungsfähigkeit der Ultraschalltechnik hinsichtlich der relevanten Einflüsse auf das Schädigungspotenzial einer Inhomogenität in polymeren Isoliersystemen zu untersuchen und zu bewerten sowie Verfahren für die Detektion und Evaluation der Inhomogenitäten bereitzustellen. Um die industrielle Einsetzbarkeit zu gewährleisten, sollen die zu entwickelnden Prüfmethoden automatisierbar sein. Ferner sollen die Prüfmethoden hinsichtlich der Abhängigkeit von Parametern analysiert werden.

In Abschnitt 1.2 wird beschrieben, dass die Ultraschalldiagnostik im Ergebnis eine Aussage über den Zustand und die Qualität des Isoliersystems geben sollte, damit eine Prognose über dessen elektrische Eigenschaften ermöglicht wird. Für eine Prognose kommt im Rahmen der Fehlstellendiagnostik neben der Detektion und Lokalisation von Fehlstellen der Evaluation eine besondere Rolle zu. In den vorangegangenen Studien wurde insbesondere die Detektierbarkeit von kugelförmigen Fehlstellen untersucht. Weil in der Praxis auch faserförmige Fehlstellen wie Risse oder Treeingkanäle auftreten können, sollen die Untersuchungen auf diese Fehlstellengeometrie ausgeweitet werden. Zudem soll die Auflösbarkeit von Fehlstellenstrukturen ermittelt werden. Hinsichtlich einer Evaluation von singulären Fehlstellen in elastomeren Isolierstoffen sind bislang noch keine detaillierten Untersuchungen durchgeführt worden. Aus diesem Grund ist zu untersuchen, mit welchen Methoden eine Fehlstellenevaluation möglich ist. Diese Evaluation sollte im Ergebnis die Eigenschaften einer Fehlstelle liefern, die einen Einfluss auf das Schädigungspotenzial aufweisen. Somit sollen Mess- und Auswertungsmethoden bereitgestellt werden, welche eine Bewertung der detektierten Inhomogenitäten hinsichtlich Größe, Geometrie, Orientierung und Material ermöglichen.

In Abschnitt 1.1 wird beschrieben, dass neben singulären Inhomogenitäten und volumenwirksamen Einflüssen auch Inhomogenitäten an Grenzflächen eine Schädigungsform in Isoliersystemen darstellen können. Es soll untersucht werden, inwieweit die Ultraschalldiagnostik zur Zustandbewertung von Grenzflächen in polymeren Isoliersystemen eingesetzt werden kann. Hierbei steht neben der Diagnostik von Fehlstellen an der Grenzfläche die Untersuchung von Ablösungen des Materialverbunds im Vordergrund.

2 Grundlagen der Isolierstofftechnik

2.1 Polymere Isolierstoffe

Die elektrische Isolierstofftechnik kennt eine Vielzahl von Isolierstoffen, welche für unterschiedliche Anwendungen zum Einsatz kommen und in fünf Stoffgruppen unterschieden werden können [Küc05]: Gase (u.a. Luft, SF₆), Isolierflüssigkeiten (u.a. Mineralöl), anorganische Feststoffe (u.a. Keramik, Porzellan, Glas), Faserstoffe (u.a. Papier, Pressspan) und hochpolymere Kunststoffe.

Kunststoffe werden gebildet durch *Polyreaktionen* aus der Verbindung von Molekülen mit niedrigem Molekulargewicht (*Monomere*) zu Molekülen hohen Molekulargewichts (*Polymere*) [Schw05a]. Bei der Polyreaktion werden die *Polymerisation*, die *Polykondensation* und die *Polyaddition* unterschieden [Bey86, Mic01]. Die Vernetzung bei diesen Bildungsreaktionen bestimmt die Art des Kunststoffs. Kunststoffe lassen sich in drei Untergruppen teilen, nämlich in Thermoplaste (u.a. PE, PVC), Duroplaste (u.a. Epoxidharz (EP), VPE) und Elastomere (u.a. Silikonelastomere, EPDM) [Fra00]. Bei Thermoplasten besteht nur eine eindimensionale kettenförmige Vernetzung. Aus diesem Grund kann der Stoff reversibel schmelzen und bei Abkühlung erstarren [Joh04]. Duroplaste und Elastomere hingegen weisen eine mehrdimensionale raumnetzartige Vernetzung auf. Es ist kein reversibler Schmelzprozess möglich, da beim Erhitzen die Verbindungen irreversibel zerstört werden. Elastomere unterscheiden sich von Duroplasten dadurch, dass auf Grund von sehr weitmaschigen Verbindungen ein gummielastischer Stoff entsteht, welcher sich bei äußerer Krafteinwirkung in Grenzen reversibel dehnen lässt. Duroplaste hingegen sind engmaschig aufgebaut, wodurch ein harter, spröder Stoff entsteht [Mic92].

Im Rahmen dieser Arbeit werden im Wesentlichen Silikonelastomere sowie Verbundsysteme aus den Materialien Silikonelastomer, Epoxidharz und Metall untersucht.

2.1.1 Silikonelastomere

Arten von Silikonelastomeren

Vernetzter Silikonkautschuk (*silicone rubber*, *SIR*) weist als Grundgerüst Silizium-Sauerstoffketten auf [Fra89]. Diese Polymersiloxanketten tragen an den Siliziumatomen jeweils zwei organische Gruppen, die bei der Vulkanisation räumlich vernetzen. Bei den in der Isolierstofftechnik verwendeten Silikonkautschuken werden die Ketten vorzugsweise durch Methylgruppen (*Polydimethylsiloxan*) oder durch Methyl- und Vinylgruppen gesättigt [Bho88, Lam03, Schw05a].

In der elektrischen Energietechnik verwendete Silikonkautschuksysteme werden nach der Vernetzungsreaktion und der Anzahl der beteiligten Komponenten unterschieden [Jan99, Kin03a, Str97]:

- *RTV-1-Silikone* (raumtemperaturvernetzend):
 - kondensationsvernetzend (einkomponentig)
 - Vernetzungstemperatur: 10 - 125°C
- *RTV-2-Silikone* (raumtemperaturvernetzend):
 - additionsvernetzend (zweikomponentig)
 - Vernetzungstemperatur: 10 - 125°C
- *HTV-Silikone* (hochtemperaturvernetzend):
 - überwiegend peroxidisch vernetzend (einkomponentig) oder additionsvernetzend (zweikomponentig)
 - Vernetzungstemperatur: 110 - 300°C
- *LSR-Silikone* (liquid silicone rubber):
 - additionsvernetzend (zweikomponentig)
 - Vernetzungstemperatur: 110 - 200°C

Eigenschaften

Silikonelastomere weisen günstige elektrische, mechanische und chemische Eigenschaften auf, so dass sie als Werkstoff für Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik geeignet sind [Kin03a]. Die Eigenschaften sind für die unterschiedlichen Arten im Wesentlichen gleich, sie werden jedoch stark von Zusätzen und Füllstoffen beeinflusst [Küc05]. Silikonelastomere sind hitze- und kältebeständig, der Großteil der Eigenschaften ändert sich zudem über einen weiten Temperaturbereich (-60°C - +180°C) nicht wesentlich [Has91, Str97]. Die elektrischen Eigenschaften für ungefüllte Silikone sind in Tabelle 2-1 aufgeführt [Bey86, Cor03a, Kin82, Küc05].

Leitfähigkeit σ_{el}	Dielektrizitäts- zahl ϵ_r	Verlustfaktor $\tan \delta$	Durchschlag- feldstärke E_D
$10^{-13} - 10^{-11} \text{ [S/m]}$	2,7 - 3,8	1 - 10 [10^{-3}]	15 - 24 [kV/mm]

Tabelle 2-1: Elektrische Eigenschaften von Silikon

Silikonkautschuk ist alterungsbeständig, koronabeständig, lichtbogenfest, kriechstromfest und beständig gegen Ozon sowie UV-Strahlung [Han97, Huh00, Kle98, Küc05]. In Verbindung mit seiner intrinsischen hydrophoben Eigenschaft, durch welche die Oberfläche wasserabweisend wirkt und bei Kontakt mit Wasser nicht vollständig benetzt, ist das Material für Freiluftanwendungen geeignet [Bär03, Wu05]. Es ist schwer entflammbar und besitzt darüber hinaus den Vorteil, dass im Falle eines Aufbrechens der Ketten unter Energieanwendung keine elektrisch leitenden Ruß- oder Kohlestoffe, sondern nur nicht leitfähiges Siliziumdioxid zurückbleibt [Bri75, Has91]. Auf Grund der Weitmaschigkeit des Polymers besitzen Silikonelastomere eine Gas- und Feuchtigkeitsdurchlässigkeit [Kin82, Küc05]. Das Gas-Permeations-Vermögen ist vorteilhaft, weil somit beispielsweise bei Aufschiebegarnituren während der Montage entstandene Gaseinschlüsse auf Grund des Anpressdrucks des Silikons durch das Material herausgedrückt werden können [Lam03]. Silikonelastomere können zudem durch Füllstoffe (z.B. Rußpartikel) eine schwache elektrische Leitfähigkeit erhalten und somit als Feldsteuerelemente eingesetzt werden [Ste03b].

Die mechanischen Eigenschaften sind hinsichtlich einer Ultraschallprüfung von besonderem Interesse. Ungefüllte Silikone haben eine *Dichte* ρ_{Mat} im Bereich von 1 bis 1,5 g/cm³ [Cor03a, Fra00]. Die Härte (*Shore A*), welche nach der DIN EN ISO 868 mittels eines Kegelstumpfs ermittelt wird, der mit einer definierten Kraft in die Probe gedrückt wird, liegt im Bereich von 15 bis 80 [Joh04].

Elastomere reagieren auf Grund ihrer Elastizität nachgiebig auf äußere mechanische Spannungen. Bei einer *einachsigen Dehnungsbelastung* eines Werkstoffs tritt in der Regel eine Querkontraktion bei gleichzeitiger Volumenänderung auf. Das Querkontraktionsverhältnis μ (*Poissonnsche Zahl*) gibt das Verhältnis der relativen Querkontraktion zur relativen Dehnung an [Vog99]. Wenn keine Volumenänderung auftritt, weist das Querkontraktionsverhältnis den Maximalwert von $\mu = 0,5$ auf. Für Elastomere liegt μ zumeist im Bereich von 0,499 bis

0,499999 und somit nur geringfügig unter 0,5, so dass im Wesentlichen keine Volumenänderung bei einer einachsigen Dehnungsbelastung auftritt [Bic93].

Der *Elastizitätsmodul* E_m [N/mm^2] eines Materials lässt sich in der Regel aus dem *Spannungs-Dehnungs-Diagramm* ablesen, in welchem für die nicht zum Bruch des Materials führende relative Längenänderung die zugehörige notwendige mechanische Spannung σ [N/mm^2] aufgetragen ist. Die Kennlinien hängen für Kunststoffe in hohem Maße von der Zusammensetzung des Materials, der Temperatur, der Prüfgeschwindigkeit, der Prüfzeit sowie der Prüfkörperform und -größe ab [Mic92]. Mittels der Kennlinie lässt sich E als Steigung im linearen Bereich (Gültigkeitsbereich des Hooke'schen Gesetzes) für kleine ε ablesen [Jac05]. Bei Elastomeren ergibt sich allerdings nur in kleinen Teilbereichen ein lineares Verhalten [Schw05a]. Dies liegt im *Kriechverhalten* von Elastomeren begründet, welches die mit der Zeit fortschreitende und zum Teil irreversible Dehnung bei gleichbleibender Spannungsbelastung beschreibt (*Retardation*) [Nie91]. Der Kriechvorgang kann vereinfacht dadurch erklärt werden, dass die Makromoleküle auf Grund einer Lösung der zwischenmolekularen Kräfte voneinander abgleiten, so dass eine elastische Nachwirkung entsteht [Mic92]. Weil die Dehnung teilweise elastisch und teilweise plastisch-viskos ist, wird das Verhalten des Elastomers auch als *viskoelastisch* bezeichnet [Goh03, Mic92].

Verarbeitung und Verwendungen

Es gibt verschiedene Verfahren, um die im Rahmen der elektrischen Energietechnik verwendeten Silikonelastomere zu verarbeiten [Wac02]. Häufig verwendete Verfahren sind das Gießen, Spritzgießen und Extrudieren. Die Art der Verarbeitung hängt maßgeblich von der Art und Viskosität des Elastomers sowie von dem herzustellenden Bauteil ab, wobei die meisten Eigenschaften weitgehend unabhängig vom Verarbeitungsverfahren sind [Kind03a].

Gießen

Ein einfaches Herstellungsverfahren ist das Gießen, welches insbesondere bei RTV-2 und niedrigviskosen LSR-Kautschuken oder speziellen Arten (z.B. *XLR*, *Extra Liquid Rubber*) zum Einsatz kommt. Beim Gießen werden die Kautschuk-Grundkomponenten erst gemischt und anschließend in die in der Regel nach oben hin offene Form drucklos vergossen, in welcher das Silikon bei zumeist niedrigen Temperaturen bis 120°C vulkanisiert [Wac02]. Im Bereich der Isoliertechnik wird das Gießverfahren beispielsweise bei der Herstellung von Langstab- und Hohlisolatoren eingesetzt [Jan03, Küc05].

Spritzgießen

Das Spritzgießverfahren ist eines der Standardverfahren zur Herstellung von Formteilen für die Isoliertechnik (Abbildung 2-1). Es findet insbesondere bei zweikomponentigen HTV- und LSR-Kautschuken Einsatz. Das Spritzgießen umfasst mehrere Verfahrensschritte [Lim89, Mic01, Joh04]: Zunächst werden die beiden Komponenten in einem vorbereitenden Verfahrensschritt gemischt. Anschließend wird die Masse in einem *Plastifizieraggregat* in einer rotierenden Schnecke erwärmt und in eine homogenisierte, fließfähige Masse überführt. Diese kann durch eine Düse unter hoher Geschwindigkeit und hohem Druck in einen geschlossenen Werkzeughohlraum eingespritzt werden, bis ein festgelegtes Druckniveau erreicht ist. Der Werkzeughohlraum wird durch eine *Schließereinheit* gebildet und kann zum Entformen geöffnet werden. Die Schließereinheit bringt ferner zumeist über eine Hydraulikeinheit die nötige Werkzeughaltekraft auf. Vor dem Entformen verbleibt das Formteil eine definierte Zeit bei einer Temperatur von 120°C bis 180°C im Werkzeughohlraum, damit das Material vernetzen kann. Nach dem Entformen wird das abgekühlte Formteil entgratet. Die Vernetzungszeit kann je nach Bauteilvolumen bis hin zu mehreren Stunden dauern.

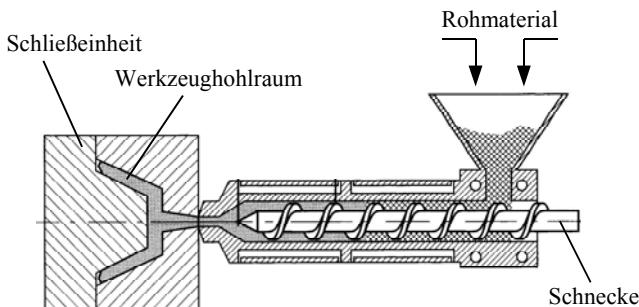


Abbildung 2-1: Spritzgießmaschine [aus Sti01]

Betriebsmitteln, die im Spritzgießverfahren hergestellt werden, treten in vielfältiger Ausgestaltung auf, beispielsweise als Ableiter im Käfigdesign (Abbildung 2-2) oder Muffenisolierkörper im Mittel- und Hochspannungsbereich [Ame03, Ste03a].

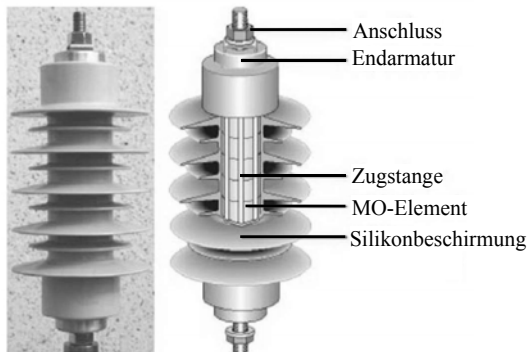


Abbildung 2-2: Mittelspannungs-Überspannungsableiter im Käfigdesign [aus Stei03]

Im Bereich der Kabelgarnituren werden häufig Feldsteuerelemente und Elektroden aus gerußtem Silikon verwendet. Diese können zunächst im Spritzgießverfahren hergestellt werden, anschließend werden sie in die Fertigungsform des Isolierkörpers eingebracht, in welcher sie von dem ebenfalls im Spritzgussverfahren eingebrachten Isoliermaterial umströmt werden [Car03].

Extrusion

Die Extrusion umfasst das Fertigen eines endlos geformten Kunststoffstrangs und wird u.a. bei der Fertigung von Kabeln aus Polyäthylen standardmäßig im Mittel- und Hochspannungsbereich eingesetzt (*Dreifachextrusion*) [Küc05]. Im Bereich der Silikonelastomere eignen sich auf Grund der hohen Viskosität insbesondere HTV-Silikone für die Extrusion. Hierbei wird ein in Abbildung 2-3 links dargestellter *Extruder* verwendet, der zumeist eine beheizbare *Schnecke* enthält, welche die Kunststoffformmasse fördert, unter Druck verdichtet, plastifiziert und homogenisiert [Lim89, Schw05b]. Sie verläßt den Extruder an der Werkzeugdüse, welche durch Querschnittsveränderungen die gewünschte Formgebung leistet [Fra00]. Das Vulkanisieren erfolgt anschließend zum Beispiel im Dampfrohr oder in Flüssigkeitsbädern [Schw05b].

Extrudierte Silikonelastomere finden beispielsweise bei der Ummantelung von GFK-Elementen (*glasfaserverstärkter Kunststoff*), bei der kontinuierlichen Herstellung von Muffenisolierkörpern im Mittelspannungsbereich oder bei Verbundisolatoren mit spiralförmig aufgebrachter Silikonhülle (Abbildung 2-3, rechts) Anwendung [Jan03, Sta03, Wac02].

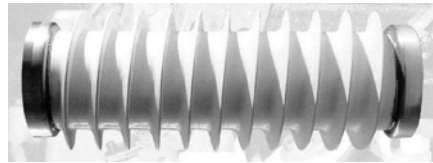
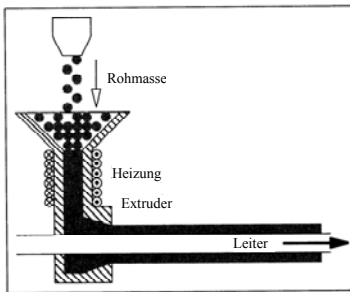


Abbildung 2-3: links: Kabel-Extruder [aus Küc05]; rechts: Spiralisolator [aus Jan03]

2.1.2 Verbundsysteme

Mit Verbundsystemen werden Systeme bezeichnet, die mindestens zwei Komponenten unterschiedlichen Materials enthalten und somit mindestens eine innere Grenzfläche aufweisen, welche stets eine potenzielle Schwachstelle des Isoliersystems darstellt (vgl. Abschnitt 2.2.2). Im Rahmen dieser Arbeit werden im Wesentlichen vier Verbundsysteme betrachtet, die in der elektrischen Energietechnik häufig zum Einsatz kommen:

- Silikonelastomer (schwach leitfähig) – Silikonelastomer (isolierend)
- Epoxidharz – Metall
- Silikonelastomer – Materialien auf Epoxidharzbasis
- Silikonelastomer – Metall

Im Folgenden werden Besonderheiten bei der Herstellung dieser Verbundsysteme sowie deren Anwendungen in der elektrischen Isoliertechnik beschrieben.

Silikonelastomer (schwach leitfähig) – Silikonelastomer (isolierend)

Schwach leitfähige Silikonelastomere werden häufig als Feldsteuertrichter (*Deflektoren*) verwendet, wobei die Leitfähigkeit des Silikonelastomers durch Rußstoffe erreicht werden kann. Die Herstellung kann in einem einstufigen (Mehrfachextrusion) oder in einem mehrstufigen Verfahren (Spritzgießverfahren) erfolgen (vgl. Abschnitt 2.1.1) [Kur03].

Epoxidharz – Metall

Dieser Materialverbund ist sehr häufig in der Isoliertechnik anzutreffen. Metalle wie Aluminium und Kupfer bilden zumeist die elektrisch leitfähigen Elemente eines Betriebsmittels und Epoxidharze verbindet als Isolierstoff gute elektrische Eigenschaften mit mechanischer Stabilität sowie gutem Adhäsionsvermögen [May88]. Epoxidharze werden zumeist als *Gießharze* verwendet. Sie werden aus einem *Reaktionsharz* und einem *Härter* hergestellt, deren Mischung eine Polyadditionsvernetzung hervorruft. Es können weitere Bestandteile wie Füllstoffe oder Beschleuniger hinzugemischt werden, welche die Eigenschaften signifikant beeinflussen können [Bey86, Bit98]. Beispielsweise kann durch die Zugabe von *Mikrohohlkugeln* ein leichtes, aber mechanisch stabiles Verbundsystem auf Epoxidharzbasis mit guten elektrischen Eigenschaften erreicht werden [Trö05]. Nach dem Mischen der Komponenten wird die Masse in einer Form vergossen, wobei die Metallelemente sich bereits in der Form befinden. Der Verguss erfolgt zumeist unter Vakuum, um das Ausgasen des Materials zu ermöglichen und somit die Gefahr von Luft einschließen zu verringern. Ein besonderes Verfahren ist das *Druck-Gelie-Verfahren*, bei welchem die Masse unter Druck in eine vorgewärmte Form eingebracht wird [Küc05]. Nach dem Verguss steigt die Viskosität der Masse an, bis zunächst ein Gelzustand und abschließend eine duroplastische Aushärtung erreicht ist [Jah69]. Bei der Härtung wird auf Grund der *exothermen Reaktion* Wärme freigesetzt, ferner entsteht ein *chemischer Reaktionsschwund*.

Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik, die den Materialverbund Epoxidharz-Metall aufweisen, treten in vielfältiger Ausgestaltung auf, beispielsweise bei Motoren, Generatoren, Schaltern, Kabelgarnituren, Spulen und Gießharztransformatoren [Bey83, Pes98, Str99].

Silikonelastomer – Materialien auf Epoxidharzbasis

Ein weiterer wichtiger Materialverbund ist der Verbund zwischen Silikonelastomeren und Epoxidharzen bzw. Materialien auf Epoxidharzbasis, insbesondere glasfaserverstärktem Kunststoff. Faserverstärkte Werkstoffe weisen neben der Beibehaltung der guten elektrischen Eigenschaften eine sehr hohe mechanische Stabilität bei geringem Gewicht auf [Bey83, Mic90]. Die Fasern werden als Faserbündel (*Roving*), Gewebe oder Matten in die Epoxidharzmatrix eingebracht [Schw05b]. Die stab- oder rohrförmigen faserverstärkten Elemente weisen zumeist eine äußere Randschicht aus reinem Epoxidharz auf, so dass nur dieses die makroskopische Grenzfläche zum aufzubringenden Silikonelastomer bildet [Hom95].

Problematisch ist, dass Silikon eine geringe Adhäsionsneigung auf Epoxidharzen zeigt [Hom95]. Aus diesem Grund muss das ausgehärtete Harz vor dem Aufbringen des Silikonelastomers vorbehandelt werden [Kur03]. Es werden *Silan-Haftvermittler* oder *Primer* verwendet, welche dünn auf die durch Schlichten, Reinigung und Entfettung vorbehandelte Epoxidharzoberfläche durch Tauchen, Aufpinseln oder Sprühen aufgetragen und anschließend eingebrannt werden [Ana00]. Die Funktion von Silan-Haftvermittlern, die aus Molekülen mit zwei unterschiedlich aktivierbaren Molekülzweigen aufgebaut sind, besteht darin, dass die eine Seite des Moleküls mit den Molekülen auf der Harzoberfläche zu einer festen Verbindung und die andere Seite mit den Silikonelastomer-Molekülen reagiert, so dass eine dauerhafte und hydrolysefeste chemische Verbindung hergestellt wird [Küc05, Tom90]. Insofern muss der Haftvermittler auf die jeweils verwendeten Komponenten abgestimmt sein [Ana00].

In der Isoliertechnik wird der Materialverbund zumeist derart verwendet, dass das GFK-Werkstoff die Funktion eines mechanischen Trägerelements und das Silikonelement die Funktion einer Ummantelung zum Schutz gegen äußere Einflüsse und zur Verlängerung des Kriechwegs übernimmt. Solche Anordnungen können beispielsweise bei Verbundisolatoren (Abbildung 2-4), die große Zugkräfte aufnehmen müssen, oder als Käfig bei Überspannungsableitern (vgl. Abbildung 2-2) gefunden werden [Gor99, Loo88].

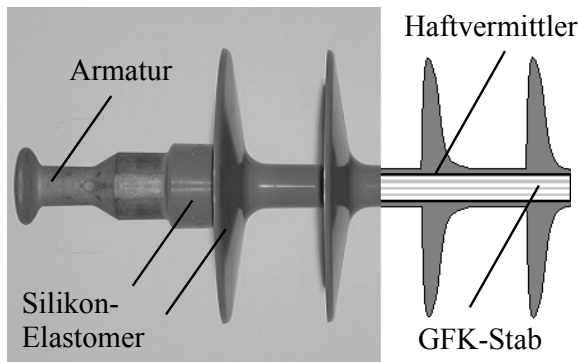


Abbildung 2-4: Verbundisolator

Weitere Anwendungen ergeben sich durch die Elastizität des Silikonelastomers. So können beispielsweise die im Untermaß gefertigten Schirme eines Verbundisolators im geweiteten Zustand auf den GFK-Stab aufgeschoben werden, so

dass die Haftfestigkeit durch den Anpressdruck unterstützt wird [Küc05]. Zum anderen kann das Silikonelastomer unter Druck gegen das Harz gepresst werden. Dies wird beispielsweise in Kabelendverschlüssen oder Komponentenmuffen (Abbildung 2-5) verwendet, bei denen ein *Feldsteuerkonus*, welcher aus einem elastomeren Isolierkörper mit einem integrierten Deflektor besteht, mit Hilfe von Federn in den Gießharzisolator hineingepresst wird, wobei während der Komponentenherstellung auf Formentreue und Oberflächengüte geachtet werden muss [Ame03, Kau05, Pes98].

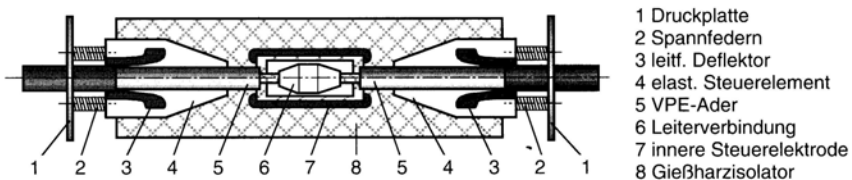


Abbildung 2-5: Kabel-Verbindungs-muffe in Komponentenbauweise [aus Pes98]

Silikonelastomer – Metall

Bei der Herstellung des Verbunds zwischen Silikonelastomer und Metall bestehen prinzipiell ähnliche Schwierigkeiten wie bei dem Verbund aus Silikonelastomer und Epoxidharz [Hom05]. Aus diesem Grund muss auch hier ein Haftvermittler für die vorbehandelte Metalloberfläche verwendet werden [Ana00, Bro89, Mro97]. In der Praxis tritt diese Grenzfläche beispielsweise bei der Umhüllung der Elektroden von Verbundisolatoren (vgl. Abbildung 2-4), im Armaturenbereich oder bei der Umhüllung der Metalloxidscheiben von Überspannungsableitern auf (vgl. Abbildung 2-2).

2.2 Analyse möglicher Fehlerformen und deren Schädigungspotenzial

Die vorgestellten Werkstoffe und Betriebsmittel müssen eine gute Verarbeitungsqualität aufweisen, damit sie die hohen elektrischen Anforderungen im Betrieb erfüllen. Kleine Fehler in Isoliersystemen können zum Versagen der Isolierfähigkeit und somit zum Ausfall des gesamten Betriebsmittels führen. Aus diesem Grund kommt der Diagnostik von Isoliersystemen eine besondere Bedeutung zu.

Es können in Isoliersystemen drei Fehlerarten voneinander unterschieden werden: Fehlstellen im Isolierstoff-Volumen, Inhomogenitäten an Grenzflächen und volumenwirksame Einflüsse. Unter volumenwirksamen Einflüssen werden Fehlerformen zusammengefasst, welche das Material als solches aufweist. Beispiele hierfür ist eine während der Herstellung entstehende fehlerhafte inhomogene Vernetzung oder eine durch mechanische Belastung oder Alterung verursachte Versprödung. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Fehlerform nicht untersucht, es kann jedoch auf vorangegangene Studien verwiesen werden [Cor03a]. Die Kenntnis des Schädigungspotenzials einer Fehlerform ist wichtig, um überprüfen zu können, ob die Diagnostik alle relevanten Informationen erfassen kann, um eine detaillierte Bewertung des Zustands des Isoliersystems bereitstellen zu können.

2.2.1 Singuläre Fehlstellen im Isolierstoff-Volumen

In polymeren Isolierstoffen können unterschiedliche Arten von singulären Fehlstellen auftreten, beispielsweise *Luft-* und *Fremdstoffeinschlüsse* oder *Risse*. Diese Fehlerformen haben unterschiedliche Ursachen, welche im Folgenden beschrieben werden. Sie haben gemein, dass sie Schwachstellen des Isoliersystems darstellen und Schädigungen hervorrufen können, welche im Gegensatz zu flüssigen oder gasförmigen Isolierstoffen bei Feststoffen in der Regel irreversibel sind. Das Schädigungspotenzial dieser Fehlerformen führt dazu, dass eine hohe Fertigungsqualität der Betriebsmittel erreicht werden muss, um die Isolationsfähigkeit während der gesamten Lebensdauer des Betriebsmittels zu gewährleisten.

Lufteinschlüsse

Entstehung

Gaseinschlüsse stellen in polymeren Isolierstoffen eine häufig anzutreffende Fehlerform dar. Sie können während der Formfüllung entstehen, wobei prinzipiell gilt, dass die Formfüllung großvolumiger Teile fehleranfälliger ist [Mro97]. In der Anfangsphase des Einspritzvorgangs liegt eine turbulente Strömung vor, welche umso ausgeprägter ist, je kleiner der Durchmesser der Düse und je geringer die Viskosität des Materials ist. Lufterinschlüsse können auf Grund der turbulenten Strömung des mit großem Druck eingespritzten Materials entstehen oder durch fehlerhafte Vernetzungstemperaturprofile verursacht werden [Mro97, Ku03]. Fehlerhafte Einspritzdrücke führen zu einer meist aufgerissenen und zerklüfteten Fließfront [Sti01]. Während zu niedrige Drücke dazu führen, dass das Material nicht porenfrei verdichtet ist, senken zu hohe Drücke die Viskosität, wodurch das Material in kleinste Spalte fließen kann und es zu

Gratbildungen kommt [Joh04]. In jedem Fall muss eine in Abbildung 2-6 dargestellte *Freistrahlbildung* vermieden werden, bei welcher der Strahl porös und aufgebrochen ist [Lim89].

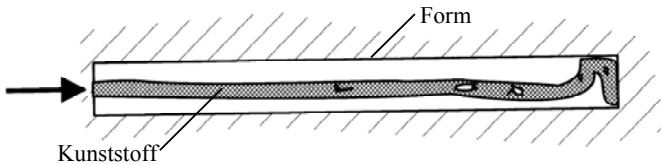


Abbildung 2-6: Freistrahlbildung [aus Sti01]

Verbesserungen werden erreicht, wenn die Form vor dem Einfüllen evakuiert wird oder wenn ein nichtlineares Einspritzgeschwindigkeitsprofil verwendet wird [Mro97, Sti01]. Gaseinschlüsse können bei Polymeren ferner auf Grund von chemischen Nebenreaktionen (*Reaktionsgase*) oder durch Materialzersetzung wegen lokaler Überhitzung entstehen [Joh04, Sti01]. Bei der Verarbeitung von Elastomeren kommt erschwerend hinzu, dass die Aufbereitung der Massen auf Grund der Zusatzstoffe bis zur Verarbeitung reicht und somit nur schwer reproduzierbar ist, woraus Chargenschwankungen resultieren [Sti01]. In Abbildung 2-7 sind Lufteinschlüsse in einem aufgeschnittenen, im Labor hergestellten Prüfkörper aus Silikonelastomer dargestellt.

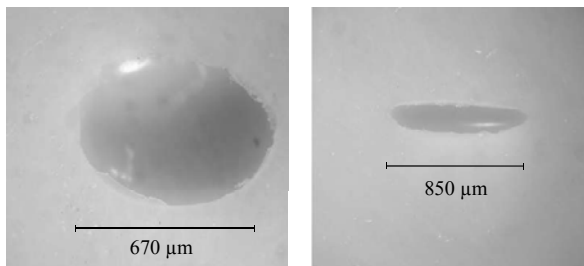


Abbildung 2-7: Lufteinschlüsse in SIR

Schädigungspotenzial

Über den Einfluss von Hohlräumen in Polymeren auf die elektrische Festigkeit von Isolierstoffen gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen [Ben66, Kur93, Schr85]. In Lufteinschlüssen, welche eine niedrigere Dielektrizitätszahl

aufweisen als polymere Isolierstoffe, liegt auf Grund des Effekts der *Feldverdrängung* in der Regel ein höheres elektrisches Feld und somit eine höhere Beanspruchung vor, als in dem umgebenden Isoliermaterial. Für kugelförmige Hohlräume ergibt sich die Feldstärke im Inneren der Kugel nach der Gleichung [Küc05]:

$$E_i = E_0 \cdot \frac{3 \varepsilon_a}{(\varepsilon_i + 2 \varepsilon_a)} \quad (2.1)$$

mit:

E_0 : äußeres homogenes Feld

ε_i : Dielektrizitätszahl innerhalb der Kugel

ε_a : Dielektrizitätszahl außerhalb der Kugel

Aus der Gleichung geht hervor, dass im Fall eines Lufteinschlusses ($\varepsilon_i = 1$) in einem Silikonelastomer ($\varepsilon_a = 3$) der Faktor der Feldstärkeüberhöhung mit dem Wert von 1,29 verhältnismäßig niedrig ist. Weil allerdings die elektrische Festigkeit in Luft (Durchschlagfeldstärke: $\hat{E}_D \approx 30 \text{ kV/cm}$) geringer ist als in Silikonelastomeren (vgl. Tabelle 2-1), kann es zum Einsatz von *Teilentladungen (TE)* kommen. Teilentladungen sind Vorentladungen, die nicht direkt zum Durchschlag führen (Abbildung 2-8).

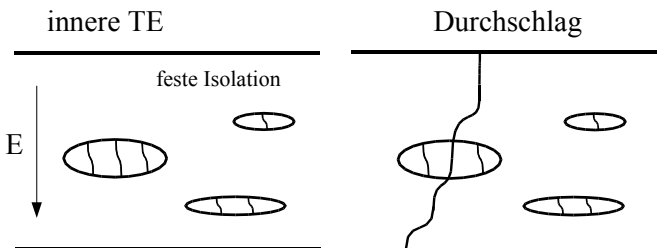


Abbildung 2-8: TE und Durchschlag [nach Küc05]

Dauerhafte TE zerstören lokal irreversibel das Polymer durch die Ausbildung von schwach leitfähigen TE-Kanälen (*Electrical Treeing*), welche die elektrische Festigkeit solange reduzieren, bis ein Durchschlag der gesamten Isolationsstrecke auftritt.

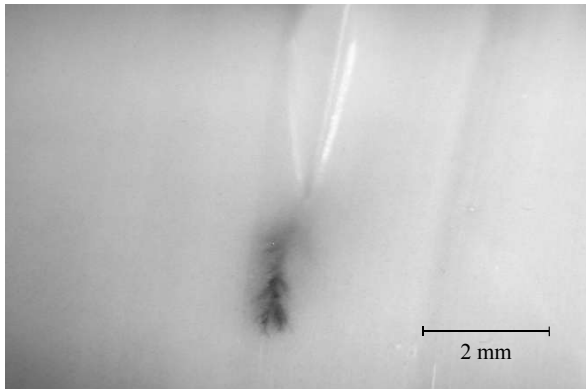


Abbildung 2-9: Electrical Treeing in SIR

Teilentladungsmessungen in Silikon-Prüfkörpern zeigen, dass Teilentladungen eine hohe destruktive Wirkung auf das Material haben, so dass eine oberhalb der Einsatzspannung einmal gezündete Entladung innerhalb relativ kurzer Zeit zum Durchschlag führen kann. Aus diesem Grund ist die Verästelung des Electrical Trees eher gering (vgl. Abbildung 2-9).

Zahlreiche Studien haben sich mit den Einflüssen des Hohlraums auf das Teilentladungsverhalten beschäftigt. Es ist festzuhalten, dass bei gleicher Lage im umgebenden elektrischen Feld insbesondere die *Größe*, *Geometrie* und *Orientierung* der Fehlstelle eine Relevanz aufweisen.

Größe

Prinzipiell gilt, dass größere Fehlstellen ein intensiveres Teilentladungsverhalten und eine niedrigere Einsatzspannung U_{ein} verursachen [Bur03, Fis78, Kur93, Küb78]. Abbildung 2-10 zeigt im Vergleich den Einfluss von sphärischen Kavitäten in Polymeren auf die scheinbare Ladung. Der im Diagramm dargestellte kubische Anstieg der gemessenen Ladung mit dem Kugeldurchmesser wird auf ein quadratisches Anwachsen der Kapazitätsflächen und eine lineare Zunahme der Zündspannung zurückgeführt [Küb78].

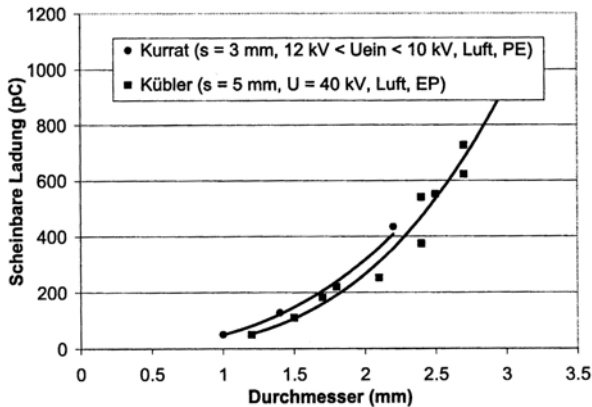


Abbildung 2-10: Einfluss des Durchmessers von sphärischen Luftpinschlüssen in PE und EP bei einer Schlagweite s von 3 mm bzw. 5 mm auf die scheinbare Ladung [aus Bur03]

Geometrie und Orientierung

Durch optische Untersuchungen konnte belegt werden, dass die Orientierung und die Geometrie einer gasförmigen Fehlstelle einen wesentlichen Einfluss auf die Wechselwirkung von Teilentladung und Isolierstoff hat [Eng98]. Abbildung 2-11 zeigt das Teilentladungsverhalten von Fehlstellen in Abhängigkeit von der Geometrie und Orientierung, wobei vorausgesetzt wird, dass zwei unterschiedliche Teilentladungsmechanismen (*Gasentladungen* und *Oberflächenentladungen* / *Gleitentladungen*) auftreten.

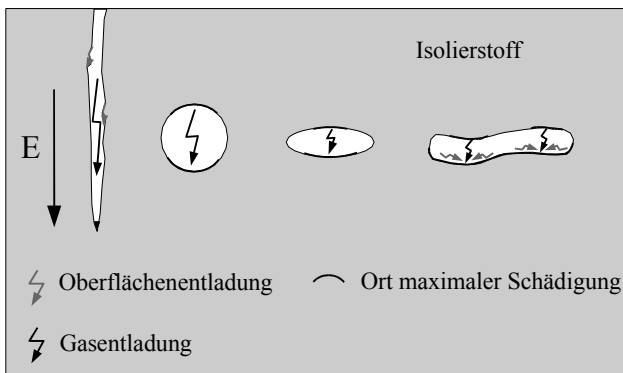


Abbildung 2-11: Teilentladungsmechanismen in Feststoffen [nach Eng98]

Die Abbildung 2-11 verdeutlicht, dass in länglichen Fehlstellen, welche quer zum elektrischen Feld orientiert sind, andere Schädigungsmechanismen als in parallel zum Feld ausgerichteten Hohlräumen wirken. So können bei ersterer Ausgestaltung zugleich Gasentladungen und Gleitentladungen auftreten, welche ihre schädigende Energie direkt an das Dielektrikum übertragen [Eng98]. Das Schädigungspotenzial erhöht sich zudem mit Abnahme des Verhältnisses von vertikaler, zum elektrischen Feld parallel ausgerichteter Halbachse zur horizontalen Halbachse, gleichzeitig steigt die Einsatzfeldstärke [Fis78, Yas67]. Einen Einfluss hat ferner die Oberflächenbeschaffenheit des Hohlraums, wobei in Silikonelastomeren in vorteilhafter Weise zumeist glattwandige Lufteinschlüsse auftreten (vgl. Abbildung 2-7).

Mittels der *Teilentladungsdiagnostik* können Fehlstellen im Isolierstoff durch die phasenaufgelöste Messung der *scheinbaren Ladung* sowie der Einsetzspannung nachgewiesen werden, wobei mit einer hochsensiblen Messtechnik kleinste elektrische Umladevorgänge während der TE detektiert werden. Der unmittelbare Rückschluss aus den Messergebnissen auf den physikalischen Fehler und den Fehlerort im Isoliermaterial ist allerdings nicht gegeben, weil die Teilentladungsmesstechnik nur eine integrale Zustandsbewertung liefert [Kön93, Küc05].

Fremdstoffeinschlüsse

Entstehung

Während der Herstellung können Feststoffeinschlüsse in das Isolierstoffvolumen gelangen. Die Fremdstoffe können durch Umgebungs- oder Formverschmutzungen in das Isoliermaterial gelangen. Umgebungs-Verschmutzungen können durch eine staubfreie Reinraumtechnik vermieden werden [Joh04]. Formverschmutzungen können dadurch entstehen, dass beim Entformen Rückstände des Materials auf der Werkzeugoberfläche verbleiben [Hof99, Men83]. Diese können beim folgenden Füllvorgang durch den hohen Einfülldruck von den Wänden gelöst werden. Bei mehrkomponentigen Isoliersystemen können Fremdstoffe ferner durch verschmutzte Oberflächen von den in die Form eingelegten Elementen in den Isolierstoff eingebracht werden.

Schädigungspotenzial

Kritisch sind insbesondere elektrisch leitfähige Einschlüsse wie Metallspäne oder Partikel von leitfähigen Polymeren mit geringer dielektrischer Festigkeit, wobei letztere auf Grund der verminderten Leitfähigkeit in der Regel ein

geringeres Schädigungspotenzial als Metallpartikel aufweisen. Leitfähige Fremdteilchen führen zu lokalen Feldüberhöhungen sowie zu Sprüngen der Dielektrizitätszahl [Bur03]. Bei kugelförmigen leitfähigen Fehlstellen tritt im Homogenfeld eine lokale Feldstärkeüberhöhung bereits um den Faktor 3 ein [Küc05]. Weicht die Fehlstelle von der Kugelform ab, kann dieser Wert noch erheblich ansteigen, wodurch eine enorme lokale elektrische Beanspruchung des Isoliermaterials auftritt. Aus diesem Grund sind leitfähige Fremdstoffeinschlüsse in Isolierstoffen unbedingt zu vermeiden. Abbildung 2-12 links zeigt einen leitfähigen Partikel einer Leitschicht in EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer).

In Polymeren können Verunreinigungen (*Keime*) zudem bei Vorliegen von Feuchtigkeit durch eine fortschreitende Kettenaufspaltung des Polymers zu *ECT-Durchschlügen* (electro-chemical-tree) führen [Schne93].

Nicht elektrisch leitfähige polymere Fremdstoffe haben in der Regel ein deutlich geringeres Schädigungspotenzial als leitfähige Einschlüsse. Es können allerdings Probleme auftreten, wenn das Fremdmaterial deutlich schlechtere elektrische Eigenschaften wie eine geringere elektrische Festigkeit aufweist, insbesondere bei Fehlern, welche aus einem lokal schlecht vernetzten Bereich oder von lokalen Überhitzungen (*Brennern*) stammen. Bei größeren dielektrischen Partikeln mit einer höheren Dielektrizitätszahl tritt zudem der Effekt der Feldverdrängung ins Volumen hinein auf, welcher zu Feldstärkeüberhöhungen im Isoliermaterial führt [Küc05]. Abbildung 2-12 rechts zeigt einen Kunststoffpartikel in Silikon.

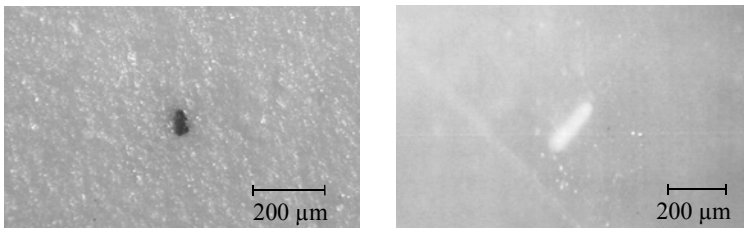


Abbildung 2-12: Fremdeinschlüsse in EPDM (links) und SIR (rechts)

Neben dem bereits dargestellten Schädigungspotenzial tritt bei Einschlüssen im Isolierstoff durch das Fremdmaterial eine neue Grenzschicht mit den in Abschnitt 2.2.2 dargestellten Problemen auf.

Spalten und Risse

Entstehung

Risse treten naturgemäß selten in Elastomeren, sondern eher in Harzen oder GFK-Materialien auf, weil diese Materialien auf Grund ihrer Bruchzähigkeit bei auftretenden Spannungen Rissbildung neigen [Bit98, Wal03]. Mikrorisse können jedoch auch in Silikonelastomeren entstehen, wenn diese beispielsweise durch eine starke Dehnung zwecks Erhöhung des Anpressdrucks übermäßig mechanisch beansprucht werden (vgl. Abschnitt 2.1.2) [Oes97]. Zudem können Schnittschädigungen während der Montage von Betriebsmitteln auftreten [Cor03b, Schne93].

Schädigungspotenzial

Spalten und Risse weisen ein größeres Schädigungspotenzial auf, wenn sie parallel zum elektrischen Feld orientiert sind, weil ein Teil der Isolationsstrecke durch eine Grenzfläche sehr geringer elektrischer Festigkeit mit tangentialer Beanspruchung überbrückt wird (vgl. Abbildung 2-11) [Küc05]. Spalten und Risse, welche quer zum elektrischen Feld orientiert sind, erfahren den Effekt der Feldverdrängung und neigen deshalb zu einem Teilentladungsverhalten, welches einen Erosionsdurchschlag hervorrufen kann.

2.2.2 Inhomogenitäten an inneren Grenzflächen

Grenzflächen werden unterschieden in innere und äußere sowie makroskopische und mikroskopische Grenzflächen [Schü99]. Als äußere Grenzflächen werden solche Grenzflächen bezeichnet, welche einen Übergang zur Umgebung darstellen. Diese Grenzflächen können sowohl mit elektrischen als auch mit optischen Methoden untersucht werden und werden deswegen im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt. Makroskopische innere Grenzflächen treten beispielsweise bei einer Schichtung von Isolierungen oder bei Übergängen von einer Elektrode zur Isolierung auf [Schu99]. Mikroskopische innere Grenzflächen werden z.B. bei faserverstärkten Verbundstoffen vom Übergang einer Faser zum Matrixmaterial gebildet [Ger05, Sei99]. Solche Übergänge sind jedoch deutlich kleiner als die Wellenlängen der verwendeten Ultraschall-Impulse (vgl. Abschnitt 4.3.1), weswegen sie im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden.

Im Folgenden werden die Entstehung und das Schädigungspotenzial von Inhomogenitäten an makroskopischen inneren Grenzflächen beschrieben. Es lassen sich im Wesentlichen zwei Arten von Inhomogenitäten unterscheiden, nämlich Fehlstellen wie Protrusionen oder Lufteinschlüsse an einer Grenzfläche und

Delaminationen (Ablösungen) zwischen den die Grenzflächen bildenden Komponenten.

Fehlstellen an Grenzflächen

Fehlstellen an Grenzflächen können durch das Vorhandensein eines Fremdstoffes, insbesondere eines Gases, oder durch eine Materialunregelmäßigkeit einer Grenzschicht gebildet werden. Das Schädigungspotenzial unterliegt ähnlichen Betrachtungen wie im Isolierstoffvolumen liegende Fehlstellen.

Gaseinschlüsse

Die Entstehung von Gaseinschlüssen in elastomeren Isolierstoffen wird in Abschnitt 2.2.1 beschrieben. Häufig finden sich solche Gaseinschlüsse an Grenzflächen, beispielsweise wenn die Luft während des Vernetzungsvorgangs aufsteigt und an Grenzflächen anschlägt oder weil während des Einspritzvorgangs durch ein fehlerhaftes Fließverhalten Gaseinschlüsse an Grenzflächen gebildet werden.

Das Schädigungspotenzial von Lufteinschlüssen mit Hochspannungselektrodenkontakt ist im Regelfall größer als bei einem Lufteinschluss gleicher Größe im Isolierstoffvolumen, weil in diesem Fall Ladungsträger direkt von der Elektrodenoberfläche in den Lufteinschluss emittiert werden können, wodurch ein Durchschlag begünstigt wird.

Protrusionen

Unebenheiten der Oberfläche eines Materials an der Grenzfläche können zu deutlichen Feldstärkeüberhöhungen führen. Sie weisen in jedem Fall ein Schädigungspotenzial auf, wenn das betreffende Material elektrisch leitfähig ist. In Kabeln können zum Beispiel Protrusionen an der inneren oder äußeren Leitschicht auftreten [Schu99, Wos05]. Durch diese nur schwer mit elektrischen Verfahren zu detektierenden Fehler an den Elektroden tritt begünstigt durch die Entstehung von Raumladungen eine deutliche lokale Feldüberhöhung auf, so dass bereits Entladungen bei solchen Spannungen auftreten können, bei denen die Betriebsfeldstärke keine Entladungen erwarten ließe [Küc05].

Delaminationen

Der Begriff Delamination wird für Ablösungen verwendet, welche auf Grund einer mangelnden Haftfestigkeit der Materialkomponenten entstanden sind. Solche Delaminationen sind bei dem Verbund Epoxidharz-Metall von anderer

Natur als bei dem Verbund SIR-Epoxidharz/Metall. Sie werden deshalb getrennt voneinander betrachtet.

Grenzfläche Epoxidharz-Metall

Bei der Verarbeitung des Verbundes Epoxidharz-Metall und im Betrieb der diesen Verbund enthaltenen Betriebsmittel sind innere mechanische Spannungen unvermeidlich [Bit98]. Dabei werden Spannungen, welche auf Grund eines Reaktionsvolumenschwunds während der Härtung des Harzes auftreten, von thermomechanischen Spannungen unterschieden, welche während des Betriebes auftreten (vgl. Abschnitt 2.1.2). Der Reaktionsvolumenschwund bei der Härtung kann bei Reinharzen bis zu 3 % betragen, durch die Zugabe von Füllstoffen kann dieser Wert auf bis zu 0,5 % gesenkt werden [Kin82]. Thermomechanische Spannungen treten immer dann in Erscheinung, wenn sich die Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien unterscheiden [May88]. Reine Epoxidharze haben hierbei im Vergleich zu Metallen deutlich höhere Ausdehnungskoeffizienten. Füllstoffe sowie die geeignete Wahl des Metalls, beispielsweise die Verwendung von Aluminium statt Kupfer, können diese Differenz zwar reduzieren, jedoch nicht ausschließen [Bey83]. Die durch die Formänderungskräfte entstandenen inneren Spannungen können zu Ablösungen führen, bei denen eine dünne, zumeist parallel zur Grenzfläche verlaufende Gasschicht eingeschlossen wird.

Durch das Vorhandensein einer Gasschicht kann zum einen unmittelbar die elektrische Festigkeit reduziert werden (vgl. Abschnitt 2.2.1). Zum anderen können Ablösungen in Epoxidharz während des Betriebs örtlich wachsen. Dies ist besonders kritisch, wenn die Ablösung zu Beginn in einem Bereich mit einer nur geringen elektrischen Feldbelastung – im ungünstigsten Fall sogar im feldfreien Raum – vorliegt, so dass die Detektion mit elektrischen Prüfverfahren unmittelbar nach der Herstellung erschwert bzw. unmöglich ist. Während des Betriebs kann eine solche Ablösung in Bereiche hereinwachsen, in welchen eine deutliche höhere Feldbelastung vorliegt, so dass in diesem Fall die notwendige elektrische Festigkeit eventuell nicht mehr gegeben ist.

Grenzfläche SIR-Epoxidharz/Metall

In Abschnitt 2.1.2 wird beschrieben, dass Silikonelastomere nur eine geringe Neigung zeigen, auf Materialien wie Epoxidharz bzw. GFK oder Metallen zu haften. Aus diesem Grund werden auf die Grenzfläche abgestimmte Haftvermittler (Primer) zur Verbesserung der Adhäsion verwendet. Es können jedoch während der Herstellung Haftungsfehler auftreten, beispielsweise verursacht

durch unzureichende Reinigung der Grenzfläche, durch fehlenden oder unvollständig aufgetragenen Primer oder durch falsche Temperaturprofile während des Vernetzungsprozesses [Gor99, Kur03].

Eine schlechte Haftfestigkeit stellt für die Grenzschicht SIR-Epoxidharz in elektrischer Hinsicht keine unmittelbare Schädigung dar. Untersuchungen haben sogar gezeigt, dass Grenzflächen, welche ohne Haftvermittler hergestellt wurden, eine höhere Durchschlagfestigkeit aufweisen als entsprechend mit einer Grundierung vorbehandelte Grenzflächen, solange keine Delaminationen vorliegen [Hom95]. Diese können jedoch im Falle mangelnder Haftfestigkeit insbesondere durch thermische oder mechanische Belastungen auftreten. Eine so entstandene offene Ablösung kann zum einen zu einer signifikanten Abnahme der dielektrischen Festigkeit der Grenzfläche bereits bei Vorhandensein einer Luftschicht einer Schichtdicke von weniger als 50 µm führen [Tak05]. In ungünstigen Fällen kann durch unzureichende Haftung ein Durchschlag entlang dieser inneren Grenzschicht erfolgen [Sek04]. Zum anderen kann sich bei mangelhafter Haftfestigkeit insbesondere bei Freiluftisolierungen Feuchtigkeit an der Grenzfläche ansammeln, welche auf Grund des Quellvermögens durch das Silikon diffundiert [Hom95, Möh05]. Durch Feuchtigkeit an der Grenzfläche wird ein *Hydrolyseprozess* in Gang gesetzt, welcher zu Delaminationen führen oder vorhandene Delaminationen vergrößern kann [Küc05]. Wechselwirkungen des Wassers mit dem Verbundsystem können zudem eine stark erhöhte Leitfähigkeit und ausgeprägte Grenzflächenpolarisation bewirken, welche zu erhöhten dielektrischen Verlusten bis hin zur Gefahr eines Wärmedurchschlags führen [Kin03b]. Bei Verbundisolatoren begegnet man diesen Problemen durch eine ausreichende Schichtdicke der Schirmhülle, durch eine gute Abdichtung zwischen dem GFK-Element, der Schirmhülle und den Metallarmaturen sowie durch die Verwendung einer hydrolysebeständigen Harzmatrix und eines hydrolysebeständigen Haftvermittlers in Verbindung mit säurefesten Glasfasern [Hom95, Kuh97].

Ähnliche Problemstellungen ergeben sich bei der Betrachtung der Grenzfläche SIR-Metall [Hom95]. Im Bereich von Freiluft-Verbundisolatoren kann beispielsweise durch eine mangelnde Haftfestigkeit zwischen Silikonhülle und Metallarmatur Feuchtigkeit von den Enden des Isolators her eindringen und durch Unterwanderung der Schirmhülle die Grenzfläche wie oben geschildert beeinflussen [Gor99, Hom95].

Auch bei aufgeschobenen Silikonelementen, welche nur durch den Anpressdruck mit dem Epoxidharz bzw. Metall verbunden sind, darf aus den oben beschriebenen Gründen keine Gasschicht zwischen den Materialkomponenten vorliegen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Bei solchen Grenzflächen sind insbesondere der Anpressdruck und die Rauheit der Kontaktflächen von Bedeutung [Kau05, Oes97]. Durch hohe Anpressdrücke und begünstigt durch das Gasdurchlässigkeitsvermögen des Silikonelastomers kann erreicht werden, dass bei der Montage hereingebrachte Luftschichten entweichen [Bär05]. Ferner kann durch das Aufbringen eines geeigneten Gleitmittels (z.B. Silikonpaste) die Gefahr von Lufteinschlüssen verringert werden, jedoch zeigt sich, dass insbesondere bei rauer Substratoberfläche das Silikon nur vermindert in der Lage ist, große Profilunterschiede auszugleichen und Luftschichten aus der Grenzfläche zu drücken [Oes97].

3 Grundlagen der Ultraschalldiagnostik

Die Ultraschalldiagnostik ist ein bewährtes Mittel der zerstörungsfreien Materialprüfung. Sie eignet sich insbesondere zur Fehlstellendiagnostik, wobei Fehlstellen detektiert, lokalisiert und in einem gewissen Umfang auch bewertet werden können. In diesem Kapitel werden Grundlagen der Ultraschallakustik, Ultraschall-Diagnosetechnik sowie in der Praxis verwendete Methoden zur Bewertung von detektierten Inhomogenitäten beschrieben.

3.1 Grundlagen der Ultraschallakustik

3.1.1 Schallfeldgrößen

Schall breitet sich in Stoffen als mechanische Welle aus, welche aus Schwingungen der einzelnen Stoffteilchen aufgebaut ist. In fluiden Medien wie Flüssigkeiten und Gasen breitet sich der Schall als Longitudinalwelle aus. In Festkörpern existieren zusätzlich auch Transversalwellen, wie Schub- oder Biege- wellen. Für alle Wellen gilt die Beziehung:

$$c = \lambda \cdot f \quad (3.1)$$

mit:

c : Schallgeschwindigkeit [m/s]

λ : Wellenlänge [m]

f : Frequenz [Hz]

Die Schallgeschwindigkeit c ist eine Materialkonstante des Mediums. In Festkörpern gilt für die Schallgeschwindigkeit c_L der Longitudinalwelle [Koc96, Kut83]:

$$c_L = \sqrt{\frac{E_m}{\rho_{Mat}} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}} \quad (3.2)$$

mit:

E_m : Elastizitätsmodul des Stoffes

ρ_{Mat} : Dichte des Stoffes

μ : Poissonsche Querkontraktionszahl

Für die Schallgeschwindigkeit c_T der Transversalwelle gilt [Kra86, Kut88]:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho_{Mat}}} = c_L \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}} \quad (3.3)$$

mit:

G : Schubmodul des Stoffes [N/m²]

In Materialien, welche nicht die Fähigkeit besitzen, Schubkräfte zu übertragen, weisen die Transversalwellen keine nennenswerten Reichweiten auf [Kra86]. Dies trifft für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten elastomeren Materialien zu. Hinzu kommt, dass insbesondere bei Kunststoffen die Transversalwelle stärker gedämpft wird als die Longitudinalwelle [Kra86]. Aus diesen Gründen existieren weder durch Messungen ermittelbare noch in der Literatur angegebene Werte für die Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle in elastomeren Materialien [Deu97]. Da im Rahmen dieser Arbeit zudem ausschließlich die Tauchtechnik eingesetzt wird, bei der die Schallankopplung über eine Wasservorlaufstrecke erfolgt (vgl. Abschnitt 3.2.1), kommt der Longitudinalwelle bei den durchgeführten Untersuchungen die bedeutende Rolle zu.

Die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle ist insbesondere bei Kunststoffen temperaturabhängig, wobei sie im Regelfall mit steigender Temperatur abnimmt [Ber49, Deu97]. Für Polyethylen ($c = 1950$ m/s bei 20°C) wird beispielsweise eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit von 8 m/s je Grad Temperaturerhöhung angegeben [Kra86].

Aus der Schallgeschwindigkeit und der Dichte des Materials berechnet sich die *Schallimpedanz* Z [Ns/m³] des Mediums:

$$Z = \rho_{Mat} \cdot c \quad (3.4)$$

Die Schallimpedanzen und Schallgeschwindigkeiten der in dieser Arbeit verwendeten Materialien sind in Abschnitt 4.2.3 aufgeführt.

Der *Schalldruck* p [N/m^2] ist der lokale Druck, der durch die akustische Longitudinal-Welle im Medium in genau einem Raumpunkt erzeugt wird (auch *Schallwechseldruck*). Ein solcher Druck ist eine ungerichtete und daher skalare Größe. In der Akustik wird für den Druck häufig die logarithmische Skalierung in Dezibel verwendet, und die Bezeichnung *Schalldruck-Pegel* L [dB] verwendet. Die Größe Dezibel wird verwendet, um Verhältnisse zwischen verschiedenen gemessenen Schalldrücken p_1 und p_2 auszudrücken [Schle92]:

$$L = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_1}{p_2} \right) dB \quad (3.5)$$

3.1.2 Verhalten an Grenzflächen

Im Rahmen der Ultraschalldiagnostik treten eine Vielzahl von Grenzflächen auf, die der Schall durchläuft. Trifft eine ebene Schallwelle senkrecht auf eine ebene Grenzfläche, so dringt ein Teil der Welle in das Medium ein, der andere Teil wird an der Grenzfläche reflektiert. Durch Bezug der Schalldrücke p_R und p_T der reflektierten und transmittierten Welle auf den Schalldruck p_E der einfallenden Welle ergeben sich der *Reflexionsfaktor* R und der *Transmissionsfaktor* T an der Grenzfläche:

$$R = \frac{p_R}{p_E} \quad T = \frac{p_T}{p_E} \quad (3.6)$$

Die Faktoren R und T können ebenso über die Schallimpedanzen Z_1 und Z_2 der beiden angrenzenden Medien bestimmt werden:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad T = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.7)$$

Trifft eine Schallwelle unter einem auf das Lot bezogenen Winkel α_{ein} auf eine Grenzfläche, so wird die durchtretende Welle gebrochen und verlässt die

Grenzfläche unter dem Winkel β_{aus} . Der Grad der Brechung ergibt sich aus den Schallgeschwindigkeiten c_1 und c_2 der die Grenzfläche bildenden Medien. Es gilt das zur Optik analoge Brechungsgesetz [Scho50]:

$$\frac{\sin \alpha_{ein}}{\sin \beta_{aus}} = \frac{c_1}{c_2} \quad (3.8)$$

Bei schrägem Schalleinfall kann zudem ein Modenwandel auftreten, bei dem sich eine Wellenart in eine andere umformt. So wird bei einem schrägen Schalleinfall von einer Flüssigkeit in einen Feststoff neben einer Longitudinalwelle auch eine Transversalwelle im Feststoff erzeugt, soweit der Feststoff die Ausbreitung dieser Wellenart zulässt. Weil die Schallgeschwindigkeiten der Moden verschieden sind, ergeben sich je nach Mode unterschiedliche Brechungswinkel β_L und β_T .

Neben der im Brechungsgesetz enthaltenen Abhängigkeit der Wellenrichtung liegt ferner eine Abhängigkeit der Schalldruckamplituden der reflektierten und transmittierten Longitudinal- und Transversalwellen vom Einschallwinkel vor. Es ergeben sich komplexe Zusammenhänge, welche insbesondere von der Art des Mediums sowie den Wellenarten beeinflusst werden. Zu berücksichtigen ist ferner, dass bei dem in der Ultraschalldiagnostik angewendeten Verfahren der Impulseechotechnik in Verbindung mit der Tauchtechnik (vgl. Abschnitt 3.2.1) der Schall einmal die Grenzfläche *flüssig/fest* in der einen Richtung und einmal in der anderen Richtung durchläuft. Es wird aus diesem Grund die *Echodurchlässigkeit* verwendet, welches bei der beschriebenen Grenzfläche *flüssig/fest* aus dem Produkt der winkelabhängigen Transmissionsfaktoren gebildet wird. Die Echodurchlässigkeit $E_{||}$ von einer Flüssigkeit mit der Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit c in einen Feststoff mit der Dichte ρ_f und den Schallgeschwindigkeiten der Transversal- und Longitudinalwelle c_T und c_L wird für den Longitudinalwellenanteil im Feststoff durch folgende Gleichung beschrieben [Kra86]:

$$E_{||} = \frac{4}{B^2} \cdot \frac{\rho c}{\rho_f c_L} \cdot \frac{\cos \beta_L \cdot \cos^2 2\beta_T}{\cos \alpha} \quad (3.9)$$

mit der Abkürzung:

$$B = \left(\frac{c_T}{c_L} \right)^2 \sin 2\beta_L \sin 2\beta_T + \cos^2 2\beta_T - \frac{\rho c}{\rho_f c_L} \frac{\cos \beta_L}{\cos \alpha} \quad (3.10)$$

Die Echodurchlässigkeit hängt somit selbst dann von der Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle ab, wenn nur die Longitudinalwelle im Feststoff betrachtet wird. In der Praxis treten zudem Effekte auf, welche nicht durch die für ebene Wellen gültige Gleichung berücksichtigt werden [Kra86]. Insbesondere wenn Schallimpulse und begrenzte Schallbündel verwendet werden, treten Frequenzeffekte auf, welche die Echodurchlässigkeit beeinflussen. Ferner kann die Schallbündelform durch Rauigkeiten der Werkstoffoberfläche verändert werden. Wie bereits gezeigt, lassen die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Elastomere keine Transversalwellen zu. Aus den beschriebenen Gründen kann die Gleichung im Rahmen dieser Arbeit nicht für die Berechnung der winkelabhängigen Echodurchlässigkeit verwendet werden. Sie wird deshalb für das untersuchte Silikonelastomer (vgl. Kapitel 4) empirisch ermittelt.

3.1.3 Schallschwächung

Die bisherigen Betrachtungen gelten für die Schallausbreitung in einem verlustfreien Medium. In einem realen Medium tritt jedoch eine hauptsächlich durch *Streuung* und *Absorption* verursachte Schallschwächung der Longitudinalwelle auf [Schme98]. Die Streuung resultiert aus Unregelmäßigkeiten im strukturellen Aufbau eines anisotropen Werkstoffes (z.B. Korngrenzen in Metallen oder Fasern in Verbundstoffen) [Deu97]. Bei ungefüllten Kunststoffen liegt jedoch nur ein untergeordneter Einfluss der Streuung vor. Die Absorption beinhaltet die direkte Umwandlung von Schallenergie in Wärme, wofür zahlreiche Prozesse ursächlich sein können [Ste93]. Bei Kunststoffen liegt insbesondere im Vergleich zu Metallen eine hohe Absorption vor, da die Molekülketten ihre Gestalt und Lage nicht unmittelbar an neue Spannungs- und Dehnungszustände, welche von Schallwellen verursacht werden, anpassen können. Es tritt eine elastische Nachwirkung als Relaxationsprozess auf, welche sich bei allen viskoelastischen Materialien zeigt [Kut88]. Eine schnelle Schwingung verliert hierdurch mehr Energie als eine langsame, wodurch die Absorption proportional zur Frequenz zunimmt [Koc96, Kra86]. Auf die theoretische Beschreibung der Schwächung bei Transversalwellen und Körperschallwellen höherer Ordnung, welche im Rahmen dieser Arbeit von untergeordneter Bedeutung sind, wird verzichtet; eine Beschreibung dieser Mechanismen findet sich in [Kra86, Kut88].

Durch die Definition eines geeigneten frequenzabhängigen Schwächungskoeffizienten, der die Absorption und die Streuung in Feststoffen beinhaltet, lässt sich der Schalldruck p_d einer ebenen Longitudinal-Welle über der durchlaufenden Wegstrecke s bezüglich des Ausgangsschalldrucks p_0 darstellen als [Car96]:

$$p_d = p_0 \cdot e^{-\alpha_s \cdot s} \quad (3.11)$$

mit:

α_s : Schwächungskoeffizient [$1/mm$]

Die ausgeprägte Frequenzabhängigkeit der Dämpfung spielt eine bedeutende Rolle, wenn gepulste Ultraschallsignale verwendet werden. Solche Impulse weisen ein zumeist gaußförmiges Frequenzspektrum auf. Auf Grund der größeren Dämpfung von höheren Frequenzanteilen gegenüber niedrigen Frequenzanteilen entsteht eine Verzerrung im Frequenzspektrum, welche sich im Zeitbereich in einem „Zerfließen“ des Impulses äußert. Ähnlich zu dem Effekt der Dispersion, welche die Frequenzabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit bei höheren Wellentypen wie beispielsweise Plattenwellen beschreibt, wird der Impuls umso breiter und verformter, je länger er in dem dämpfenden Material läuft [Kra86].

Neben der Frequenzabhängigkeit der Absorption liegt ferner eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit vor. In der Regel nimmt die Schwächung mit steigender Temperatur zu, insbesondere bei Kunststoffen [Deu97, Kra86].

3.2 Ultraschall-Diagnosetechnik

Für die Ultraschallprüfung werden Ultraschallwellen zunächst mittels eines *Sende-Prüfkopfs* in das zu prüfende Objekt eingekoppelt. Die Wellen breiten sich im Prüfobjekt aus und werden beim Austritt aus dem Prüfobjekt mittels eines *Empfänger-Prüfkopfs* detektiert, wobei insbesondere die drei primären Messgrößen *Schalldruckamplitude*, *Phase* und *Laufzeit* bestimmt werden [Cor03a, Kra86]. Die einzelnen Prüfverfahren werden im wesentlichen unterschieden zwischen Impulsverfahren und stationären Verfahren sowie zwischen Durchschallungs- und Reflexionsverfahren:

Impulsverfahren verwenden Schallimpulse mit einer Länge von wenigen Wellenlängen, wohingegen *stationäre Verfahren* eine kontinuierliche Schallwelle verwenden (auch: *Dauerschall*) [Ste93].

Bei *Durchschallungsverfahren* befindet sich das Prüfobjekt zwischen dem Send- und Empfangsprüfkopf. Materialinhomogenitäten wirken als abschattendes Hindernis, weshalb auch die Bezeichnung *Abschattungsverfahren* verwendet wird [Kra86].

Reflexionsverfahren (auch: *Echoverfahren*) liegt zu Grunde, dass Schallwellen an Materialgrenzflächen reflektiert werden (vgl. Abschnitt 3.2.1). Dabei werden sie nicht nur an den Werkstoffrändern, sondern auch an Grenzschichten und Inhomogenitäten innerhalb des Werkstückes reflektiert [Ber00]. Die reflektierte Welle wird detektiert und ausgewertet. Reflexionen treten allerdings nur dann auf, wenn die Schallwellenlänge λ kleiner als die reflektierende Struktur ist. Technische Ultraschall-Prüffrequenzen liegen etwa im Bereich von 0,02 - 100 MHz [Deu97]. Bei der Wahl der Ultraschallfrequenz gilt es stets abzuwägen, ob tiefe oder hohe Frequenzen verwendet werden [Kra86]. Die Verwendung von tiefen Frequenzen führt durch die größere Wellenlänge zu einer schlechteren Auflösung und Fehlererkennbarkeit. Hohe Frequenzen führen zu einer höheren Dämpfung (vgl. Abschnitt 3.1.3) und somit zu einer geringeren Eindringtiefe.

Im Rahmen dieser Arbeit kommt ausschließlich das Impuls-Echo-Verfahren zur Anwendung, welches in der Ultraschalldiagnostik als weitaus bedeutendstes Verfahren betrachtet wird [Koc96, Kun04].

3.2.1 Impuls-Echo-Verfahren

Die Abbildung 3-1 links zeigt einen typischen Anwendungsfall des Impuls-Echo-Verfahrens. Ein Prüfkopf emittiert Schallimpulse, welche in einen Prüfkörper eindringen. Innerhalb des Prüfkörpers wird der Impuls an einer Fehlstelle und an einer Grenzfläche reflektiert und kann vom Prüfkopf, welcher in dieser Anordnung zugleich die Funktion des Empfänger-Prüfkopfs übernimmt, detektiert werden. Die Tiefenlage der Inhomogenität und der Grenzfläche kann bei Kenntnis der Schallgeschwindigkeit c des Materials über die Messung der Zeit Δt zwischen dem Aussenden und dem Empfang des Impulses bestimmt werden. Die Tiefe s ergibt sich bei lotrechtem Schalleinfall aus der Gleichung:

$$s = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (3.12)$$

In Abbildung 3-1 rechts ist der zu der in Abbildung 3-1 links gezeigten Anordnung zugehörige zeitliche Verlauf der detektierten Echoamplituden gleichgerichtet dargestellt.

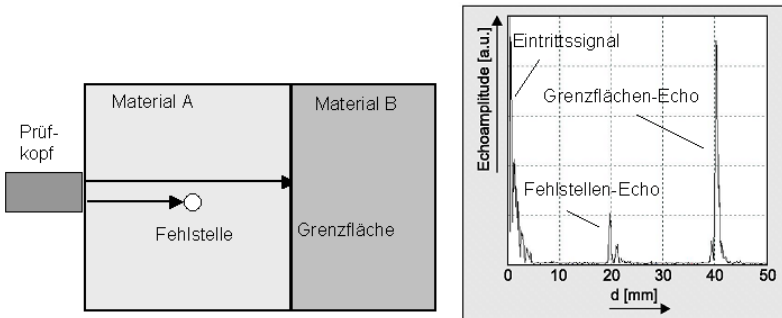


Abbildung 3-1: Allgemeiner Prüfaufbau und zugehöriges Impulsecodiagramm (A-Scan)

Der in Abbildung 3-1 rechts dargestellte Amplituden/Laufstrecken-Graph wird als *Impulsecodiagramm* (auch: *A-Scan*, *A-Bild*) bezeichnet. Es sind die reflektierten Echosignale der Fehlstelle und der Grenzfläche erkennbar. Zudem entsteht systembedingt und auf Grund von Reflexionen an der Oberfläche des Prüfkörpers ein *Eintrittssignal* [Ber00]. Das Eintrittssignal wird durch die verwendete Einkoppeltechnik beeinflusst. Während des Prüfvorgangs kann der Prüfkopf auf das Werkstück aufgesetzt werden (*Kontakttechnik*) [Deu97]. Um eine bessere Anpassung der Schallimpedanzen zu erreichen und somit Eintrittsreflexionen zu verringern, wird eine Ankoppelpaste verwendet [Car96]. Ein Nachteil der Kontakttechnik besteht darin, dass die Reproduzierbarkeit von Messungen nur mit großem Aufwand gewährleistet ist. Vor allem der Anpressdruck des Prüfkopfes auf die Oberfläche, der Winkel des Prüfkopfes zur Oberfläche und die Koppelpastenmenge gehen als veränderliche Parameter in die Messung ein. Bei der *Tauchtechnik* berührt der Wandler den Prüfkörper nicht, weil die Ankopplung über eine Wasservorlaufstrecke erfolgt, wodurch die Notwendigkeit der Ankoppelpaste entfällt [Kra86]. Entweder kann der zu untersuchende Prüfkörper in Wasser eingetaucht werden oder es wird eine Düse verwendet, welche den Prüfkörper lokal benetzt (*Fließwassertechnik*) [Szi82]. Eine Variation dieser Technik ist die *Pfütztechnik*, bei welcher der Prüfkörper nur gering in das Wasser eingetaucht ist und von unten von einem Prüfkopf beschallt wird [Ben02]. Durch die konstanten Einkopplungsbedingungen erleichtert die Tauchtechnik eine automatisierte Messdurchführung. Aus diesen

Gründen werden im Rahmen dieser Arbeit die Schallimpulse ausschließlich über eine Wasservorlaufstrecke in die Prüfkörper eingekoppelt.

Die Höhe der Echoamplitude von Reflektoren ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Neben den bereits angesprochenen Einflüssen des Prüfaufbaus (Ankopplung, Einschallwinkel), des Prüfkörpers (Dämpfung, Schallimpedanz, Oberflächenrauigkeit) und des Reflektors (Größe, Geometrie, Orientierung, Oberfläche, Lage im Schallfeld, Schallimpedanz) liegt auch eine Abhängigkeit vom Prüfkopf (Mittenfrequenz, Bandbreite, Durchmesser, Schallfeld, Empfangsfilter) vor, der im folgenden Abschnitt eingeführt wird.

3.2.2 Prüfköpfe und Abstrahlcharakteristik

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Ultraschall-Prüfköpfe beinhalten ein Piezoelement, welches einen elektromechanischen Wandler darstellt [Kra01, Mas54]. Bei einer elektrischen Anregung sendet es einen Ultraschallimpuls aus und entsprechend wird beim Empfang eines Ultraschallsignals ein elektrisches Signal generiert [Kut88, Leh73]. Dadurch ist es möglich, dass ein Prüfkopf als Sender und Empfänger arbeitet, wobei er alternierend sendet und empfängt.

Die kreisrunden Prüfköpfe verhalten sich wie Kolbenstrahler, welche das gleiche Schallfeld erzeugen, wie eine gleichgroße Lochblende, durch die eine ebene Welle fällt (*Babinet Theorem*) [Kra86]. Auf Grund von Interferenzen entsteht eine Abstrahlcharakteristik, welche hauptsächlich von der Fläche des schwingenden Elements und der Prüffrequenz abhängt. Bei einer kontinuierlichen Welle folgt der Schalldruck p in Ausbreitungsrichtung z entlang der Achse, die senkrecht auf dem Mittelpunkt des Schwingers steht (*akustische Achse*), der folgenden Gleichung [Bli96, Kra86]:

$$p = p_0 \cdot 2 \sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot [\sqrt{(D_s/2)^2 + z^2} - z] \right) \quad (3.13)$$

mit:

D_s : Schwingerdurchmesser des Senders

Die Abbildung 3-2 zeigt den grafischen Verlauf des Betrages von Gleichung 3.13. Auf Grund von konstruktiver und destruktiver Interferenzen weist der Schalldruckverlauf entlang der akustischen Achse bis zu einer Stelle N Minima und Maxima auf. Ab der Stelle N nimmt er mit $1/z$ ab [Kra86, Schle73b].

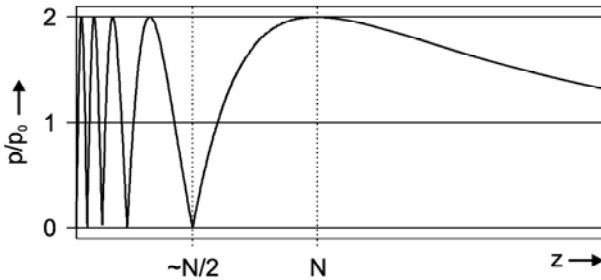


Abbildung 3-2: Schalldruckverlauf eines Kolbenstrahlers entlang der akustischen Achse [aus Kra86]

Die Stelle N wird als *Nahfeldlänge* bezeichnet. Sie trennt das *Nahfeld* ($0 < z \leq N$) vom *Fernfeld* ($z > N$) und berechnet sich zu [Fre65]:

$$N = \frac{D_s^2}{4 \cdot \lambda} = \frac{D_s^2}{4} \cdot \frac{f}{c} \quad (3.14)$$

Die Nahfeldlänge ist somit vom Schwingerdurchmesser, von der Schallgeschwindigkeit und der Frequenz abhängig. In der Praxis ist auf Grund des Einflusses des Schwingerrands der tatsächlich im Prüfkopf wirksame, sogenannte *effektive Schwingerdurchmesser* etwas kleiner als der mechanische [Deu 97, Kra86].

Der mit $1/z$ proportionale Abfall des Schalldrucks im Fernfeld ergibt sich daraus, dass sich die Schallwellen für große Entfernungen wie Kugelwellen verhalten, wohingegen sie sich im Nahfeld annähernd wie ebene Wellen verhalten [Schle73b].

Eine gebräuchliche, schematische Darstellung des Schallfelds zeigt Abbildung 3-3.

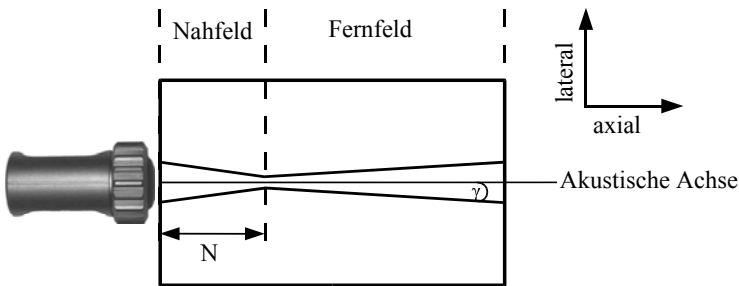


Abbildung 3-3: Schallfeld eines Ultraschall-Prüfkopfs

Es ist der auf Grund der Interferenzen konvergierende Nahfeld-Bereich und der mit dem *Öffnungswinkel* γ divergierende Fernfeld-Bereich des Schallbündels erkennbar. Die Kegelränder geben die *Halbwertsbreite* an, bei welcher der Schalldruck um 6 dB bezüglich der akustischen Achse abgefallen ist [Deu97].

Bei der Verwendung von Schallimpulsen an Stelle von kontinuierlichen Schallwellen verringern sich die Druckschwankungen im Nahfeld deutlich. Im Fernfeld treten im Wesentlichen keine Änderungen auf [Kra86, Thu90]. Die Verringerung der Nahfeldinterferenzen ist darauf zurückzuführen, dass die Impulse die von verschiedenen Punkten des Wandlers den Beobachtungspunkt erreichen, nicht mehr interferieren, wenn sie kürzer als ihr Wegunterschied sind [Kra86]. Zur Vermeidung von Interferenzen ist somit die Verwendung von kurzen Impulsen sinnvoll. Schallimpulse werden aus einer Überlagerung von Wellenzügen unterschiedlicher Frequenz generiert, wodurch sich ein Frequenzspektrum mit einer als *Nennfrequenz* bezeichneten Mittenfrequenz ergibt [Kra01]. Kürzere Impulse werden erreicht, indem Prüfköpfe mit einer hohen *Bandbreite* B verwendet werden [Deu97]. Die Bandbreite stellt den Bereich der Frequenzen im Echoimpuls dar, deren Amplitude gegenüber der maximalen Amplitude der Nennfrequenz um höchstens 6 dB abgefallen ist [Kra01].

Die Kenntnis der Prüfkopfeigenschaften und der Abstrahlcharakteristik ist von wichtiger Bedeutung für die in Abschnitt 3.3.1 vorgestellten Verfahren zur Bewertung von singulären Fehlstellen.

3.2.3 Ultraschall-Bildgebung

Ziel der Ultraschalldiagnostik ist häufig die Darstellung des Volumens eines an sich undurchsichtigen Prüfkörpers. In Abschnitt 3.2.1 wurde bereits das A-Bild vorgestellt, welches eine Darstellung der detektierten Echoamplituden an einem Punkt darstellt. Eine aussagekräftigere Darstellung wird durch ein punktweises Abtasten (Scanning) auf der Prüfkörper-Oberfläche erreicht. Bei der *C-Bild*-Darstellung wird der Prüfkopf zweidimensional über die Prüfkörper-Oberfläche bewegt. An jedem Messpunkt wird die höchste Echoamplitude zwischen Eintrittssignal und Rückwandecho aufgenommen, wobei jedem Echo je nach seiner Höhe eine Helligkeit oder eine Farbe zugeordnet wird [Cor03a, Leh73]. Somit liefert das C-Bild ähnlich einem Röntgenbild eine zweidimensionale Wiedergabe der Fehlerverteilung. Ein C-Bild wird beispielsweise in Abbildung 5-3 gezeigt.

Die Darstellung der Fehlertiefe leistet das zweidimensionale *D-Bild*, für welches die Laufzeiten der höchsten Echos an jedem Punkt in eine Tiefe umgerechnet werden [Deu97]. Mit leistungsfähigen Computern lassen sich ferner dreidimensionale Bilder erstellen, bei welchen durch die Verwendung von Isobaren eine räumliche Vorstellung der Fehlerverteilung im Prüfkörpervolumen gewonnen werden kann [Wir06].

Die beschriebenen Darstellungen haben allesamt den Nachteil, dass die laterale Auflösung wegen der in Abbildung 3-3 dargestellten Schallfeld-Divergenz der Prüfköpfe schlecht ist [Kra86]. Dies bedeutet, dass Inhomogenitäten im Bild größer erscheinen, als sie physikalisch sind.

3.2.4 Grundlagen der Signalverarbeitung

Aufgabe der Signalverarbeitung im Rahmen der Ultraschalldiagnostik ist die Aufbereitung der gemessenen Ultraschall-Daten. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass das Signal-Rausch-Verhältnis durch geeignete Verwendung von Filtern (z.B. Tiefpassfilter, Korrelationsfilter, Gauß- und Laplacefilter) verbessert werden kann [Men98, Ste00, Wal05a].

Im Folgenden wird die in dieser Arbeit verwendete und aus der Nachrichtentechnik bekannte Korrelationsfunktion eingeführt.

Mittels Korrelationsfunktionen kann die Ähnlichkeit zweier zeitabhängiger Signale $f(t)$ und $g(t)$ beschrieben werden. Ausgangspunkt für ein Ähnlichkeitsmaß ist das Differenzsignal $\Delta(t)$ der Signale, welches für den Fall, dass $f(t)$ und $g(t)$ Energiesignale darstellen, ebenfalls ein Energiesignal ist [Ohm05]. Die

Energie von $\Delta(t)$ kann als Maß für die Abweichung verwendet werden. Damit das Ähnlichkeitsmaß von der Amplitude der verglichenen Signale unabhängig wird, werden die Signale $f(t)$ und $g(t)$ auf ihre Energien E_f und E_g normiert. Die Energie $E_{\Delta n}$ des Differenzsignals der normierten Signale $f_n(t)$ und $g_n(t)$ berechnet sich zu:

$$\begin{aligned} E_{\Delta n} &= \int_{-\infty}^{\infty} [f_n(t) - g_n(t)]^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} f_n^2(t) dt + \int_{-\infty}^{\infty} g_n^2(t) dt - 2 \int_{-\infty}^{\infty} f_n(t) \cdot g_n(t) dt \\ &= 2 - 2 \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot g(t) dt}{\sqrt{E_f E_g}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Hieraus wird als Ähnlichkeitsmaß der normierte Korrelationskoeffizient ρ_{fg} für Energiesignale definiert:

$$\rho_{fg} = 1 - \frac{E_{\Delta n}}{2} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot g(t) dt}{\sqrt{E_f E_g}} \quad (3.16)$$

Das Ähnlichkeitsmaß liefert einen Vergleich über den Verlauf der Signale unabhängig von deren absoluten Amplituden und Energien und bewertet die Ähnlichkeit mit einem Wert zwischen $+1$ und -1 [Lük92].

- Das Ähnlichkeitsmaß liefert den Wert $+1$ für die größte Ähnlichkeit, wenn die Signale durch Multiplikation mit einem positiven, reellen Faktor auseinander hervorgehen (*gleichläufige Signale*).
- Das Ähnlichkeitsmaß liefert den Wert -1 für die geringste Ähnlichkeit, wenn die Signale durch Multiplikation mit einem negativen, reellen Faktor auseinander hervorgehen (*gegenläufige Signale*).
- Das Ähnlichkeitsmaß liefert den Wert 0 , wenn die Signale keine Ähnlichkeit aufweisen (*orthogonale Signale*) [Wen05].

Um die Signale unabhängig von einer Verschiebung auf der Zeitachse vergleichen zu können, wird die normierte Korrelationsfunktion $\rho_{fg}(\tau)$ verwendet:

$$\rho_{fg}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot g(t + \tau) dt}{\sqrt{E_f E_g}} \quad (3.17)$$

Die normierte Korrelationsfunktion $\rho_{fg}(\tau)$ wird im Falle unterschiedlicher Funktionen $f(t)$ und $g(t)$ auch als *Kreuzkorrelationsfunktion* und $\rho_{ff}(\tau)$ als *Autokorrelationsfunktion* bezeichnet [Grü05]. Das Maximum der *Kreuzkorrelationsfunktion* $\rho_{fg}(\tau)$ liefert das maximale Ähnlichkeitsmaß der Funktionen $f(t)$ und $g(t)$.

Die Korrelationsfunktion muss für die digitale Auswertung auch in zeit- und wertdiskreter Form Gültigkeit besitzen, um für die diskretisierten Ultraschallsignale anwendbar zu sein. Die Gleichung der normierten Korrelationsfunktion für endliche, zeitdiskrete Signale $f(t_n)$ und $g(t_n)$ mit diskreter Verschiebungsvariablen τ_m lautet [Lük92]:

$$\rho_{fg}(\tau_m) = \frac{\sum_{t_n=-N}^N f(t_n) \cdot g(t_n + \tau_m)}{\sqrt{\sum_{t_n=-N}^N f^2(t_n) \cdot \sum_{t_n=-N}^N g^2(t_n)}} \quad (3.18)$$

3.3 Methoden der Ergebnisevaluation

Neben der Detektion und der Lokalisation von Inhomogenitäten kommt der Evaluation eine besondere Rolle zu (vgl. Unterkapitel 1.3). Diese Bewertung bezieht sich bei singulären Fehlstellen insbesondere auf die Größe, die Geometrie und die Orientierung, da von diesen Größen das Schädigungspotenzial der Fehlstelle in einem Isoliersystem beeinflusst wird. Ebenfalls ist relevant, ob es sich bei dem Fehlstellenmaterial um ein Gas oder einen Feststoff, insbesondere um ein leitfähigen Feststoff, handelt (vgl. Abschnitt 2.2.1).

3.3.1 Bewertung hinsichtlich Größe und Geometrie

Im Abschnitt 3.2.3 wird beschrieben, wie ein Bild aus Ultraschallmessdaten gewonnen werden kann. Allerdings ist auch mit aufwändigen Abbildungsverfahren wegen der unzureichenden lateralen Auflösung keine gute Fehlerbewertung erreichbar, so dass eine Bestimmung der Fehlergröße aus dem Bild heraus zumeist nicht möglich ist [Kra86]. Für die Fehlerbewertung in der Praxis spielt

die Erfahrung des Prüfers eine wesentliche Rolle: Bei der manuellen Prüfung ermöglichen bereits das Anschallen der Fehlstelle aus verschiedenen Richtungen, die Bewertung der Echoform oder das Verhalten des Fehlstellenechos bei Verschiebung des Prüfkopfes (*Echodynamik*) dem erfahrenen Prüfer, eine Fehlstellenbewertung vorzunehmen [Ber00]. Für eine automatisierte Bewertung ist dies ungleich schwieriger. Im Folgenden sollen Verfahren beschrieben werden, die eine Bewertung der Fehlstellen ermöglichen. Die Analyse der Anwendbarkeit der Verfahren zur Zustandsbewertung von singulären Fehlstellen in elastomeren Isolierstoffen erfolgt in Abschnitt 5.2.1.

Je nach Fehlergröße werden unterschiedliche Verfahren zur Größenbestimmung verwendet, wobei „große“ und „kleine“ Reflektoren unterschieden werden. Ein Reflektor ist „klein“, wenn er vollständig innerhalb des Schallbündels liegt und analog dazu „groß“, wenn dies nicht der Fall ist [Kra59, Leh73, Schie70]. Die Abbildung 3-4 zeigt einen großen und einen kleinen Reflektor. Ob ein Reflektor groß oder klein ist, hängt folglich nicht nur von der tatsächlichen Größe ab, sondern auch von der Lage des Reflektors im Schallfeld des Prüfkopfs.

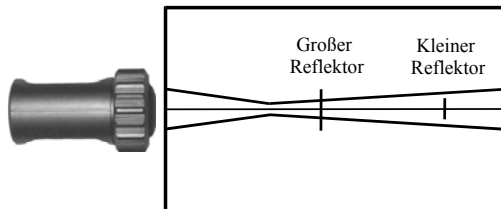


Abbildung 3-4: Unterscheidung „großer“ und „kleiner“ Reflektor

Half-Beam-Technique

Das Ermitteln der Reflektorgröße bei einem großen Reflektor ist verhältnismäßig einfach und genau. Das am häufigsten verwendete Verfahren ist die Half-Beam-Technique oder 6-dB-Methode [Ber00, Bli96, Schle73a]. Hierbei wird der Prüfkopf ausgehend von der Position des Echomaximums solange in einer Ebene verschoben, bis die Echoamplitude auf die Hälfte abgefallen ist. Dies entspricht einer Abnahme der Echoamplituden um 6 dB. Diese so gefundenen Positionen kennzeichnen den Reflektorrand, aus welchem die Reflektorgröße resultiert. Dem liegt zu Grunde, dass die akustische Achse an genau diesen Positionen über dem Rand des Reflektors liegt (Abbildung 3-5) und somit bei einer geraden Fehlstellenkontur nur noch die Hälfte des Schallbündels an der Fehlstelle reflektiert wird.

Bei dem Versuch, einen kleinen Reflektor mit dieser Methode abzutasten, wird anstatt der Größe des Reflektors nur etwa der Durchmesser des Schallfeldes an dieser Stelle ermittelt [Ber00]. Deswegen lässt sich die 6-dB-Methode bei kleinen Fehlstellen nicht anwenden.

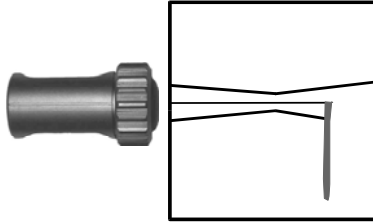


Abbildung 3-5: Half-Beam-Technique

Amplitudenverfahren

Eine Möglichkeit der Fehlerbewertung für kleine Reflektoren liegt in der Auswertung der reflektierten Echoamplitude. Dem liegt zu Grunde, dass ein „kleiner“ Reflektor mit einem größeren Durchmesser eine höhere Echoamplitude liefert als ein „kleiner“ Reflektor mit einem kleineren Durchmesser und gleicher Geometrie sowie Orientierung. Verfahren, welche die maximale Echohöhe eines Reflektors auswerten, dürfen nur angewendet werden, wenn die zu bestimmende Abmessung kleiner als die Halbwertsbreite des Schallbündels ist [DIN01a].

Es sollen zunächst kreisscheibenförmige Reflektoren betrachtet werden, welche senkrecht zur Schallstrahlrichtung liegen. In der Praxis werden dazu Flachbodenbohrungen verwendet, welche in den Boden eines Prüfkörpers gebohrt werden. Ferner soll ein dämpfungsfreier Werkstoff betrachtet werden. Es gilt, dass sich bei Kreisscheiben-Reflektoren, die sich in derselben Tiefe befinden, die Echohöhen p_{Echo} proportional zur Fläche der Reflektoren F_r , folglich proportional zum Quadrat ihrer Durchmesser D_r verhalten [Ber00, Kra86]:

$$p_{Echo} \sim F_r \sim D_r^2 \quad (3.19)$$

Diese Proportionalität kann theoretisch hergeleitet werden:

Wenn sich der Reflektor im Nahfeld befindet, ist die Schallwelle annähernd eben (vgl. Abschnitt 3.2.2). Trifft die Schallwelle auf den Reflektor, so wird bei einem Reflexionsfaktor von 1 die Welle am Reflektor verlustfrei reflektiert. Von

dem Reflektor kommt somit ein seiner Oberfläche entsprechendes Echo zurück [Ber00]. Im Fernfeld basiert diese Proportionalität auf Gleichung 3.13, welche für große Entfernungen z zu folgender Gleichung vereinfacht werden kann [Kra86]:

$$p_r = p_0 \frac{\pi \cdot D_s^2}{4 \cdot \lambda \cdot z} \quad (3.20)$$

Der Druck p_r ist der Druck auf der akustischen Achse des Senders an der Position des Reflektors. Für kleinere Fehlstellen ist dies in guter Näherung der Druck an jedem Punkt der Oberfläche des Reflektors. Trifft diese Schallwelle nun auf die ebene Kreisscheibe, so wird der Schall daher so reflektiert, als ob die Kreisscheibe ein Kolbenschwinger wäre. Die Kreisscheibe sendet eine Schallwelle mit dem Druck p_r aus Gleichung 3.20 aus [Kra59, Tie71a]. An der Stelle des Prüfkopfs ergibt sich unter Berücksichtigung des Reflexionsfaktors R mit Verwendung der Nahfeldlänge N folglich der Druck:

$$p_{Echo,Scheibe} = R \cdot p_r \frac{\pi \cdot D_s^2}{4 \cdot \lambda \cdot z} = R \cdot p_0 \frac{\pi^2 \cdot D_s^2 \cdot D_r^2}{16 \cdot \lambda^2 \cdot z^2} = R \cdot p_0 \frac{\pi^2 \cdot N^2 \cdot D_r^2}{D_s^2 \cdot z^2} \quad (3.21)$$

Neben Kreisscheibenreflektoren sind auch die Echoamplitudenverhältnisse von anderen Geometrien hergeleitet worden [Erm72, Gin02]. Davon soll hier nur der Kugel-Reflektor wiedergegeben werden. Im Fernfeld gilt für die zu Gleichung 3.21 entsprechende Echoamplitude [Tie71b]:

$$p_{Echo,Kugel} = R \cdot p_0 \frac{\pi \cdot D_s^2 \cdot D_r}{16 \cdot \lambda \cdot z^2} = R \cdot p_0 \frac{\pi \cdot N \cdot D_r}{4 \cdot z^2} \quad (3.22)$$

Das Verhältnis von Fehlstellenecho zu Bezugsecho ist nun nicht mehr proportional zum Quadrat des Durchmessers des kreisscheibenförmigen Reflektors, sondern direkt proportional zum Durchmesser. Diese Proportionalität gilt auch im Nahfeld [Erm72].

Die beschriebenen Zusammenhänge werden bei der *AVG-Methode* (Amplituden-Verstärkung-Größe) angewendet und der *Vergleichskörpermethode*. Bei der AVG-Methode werden prüfkopfspezifische Diagramme verwendet, durch welche sich kreisscheibenförmige Ersatzreflektorgößen ermitteln lassen [Ber00, Bli96, Kra86]. Bei der Vergleichskörpermethode wird die Fehlergröße durch

Vergleich mit Musterfehlern in einem realen Vergleichskörper ermittelt [Ber00, Bli96, Gra64]. Dazu wird ein Vergleichskörper benötigt, der aus demselben Material hergestellt sein muss wie das zu prüfende Werkstück. Ferner sollte eine vergleichbare Oberflächenbeschaffenheit vorliegen. In diesem Vergleichskörper sind künstliche Reflektoren enthalten. Meist beinhaltet der Vergleichskörper Flachboden- oder Querbohrungen einer konstanten Größe, die in verschiedenen Tiefen angeordnet sind. Die Echoamplituden dieser bekannten Reflektoren können mit der Echoamplitude des Reflektors im Prüfkörper verglichen werden, so dass dadurch eine Fehlergrößenermittlung möglich ist. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass Material- und Prüfparameter beim Vergleich nicht mitberücksichtigt werden müssen [Ber96]. Nachteilig an beiden Verfahren ist, dass nur eine senkrechte, zweidimensionale Projektion des Volumens gewonnen wird, so dass weder die Geometrie noch die Orientierung einer Fehlstelle bestimmt werden kann.

Durch die Verwendung von Winkeln können auch Informationen über die axiale Ausdehnung der Fehlstelle gewonnen werden. Bei der manuellen Prüfung kann von einem erfahrenen Prüfer die Dynamik der Reflektivität über dem Einschallwinkel ausgewertet werden [DIN01a, Mil87]. Dem liegt zu Grunde, dass sich die Echoamplitude eines flächigen Reflektors in Abhängigkeit vom Einschallwinkel anders verhält als die Echoamplitude eines kugelförmigen Reflektors (Abbildung 3-6), so dass über die Dynamik der Reflektivität eine Aussage über die Geometrie möglich ist.

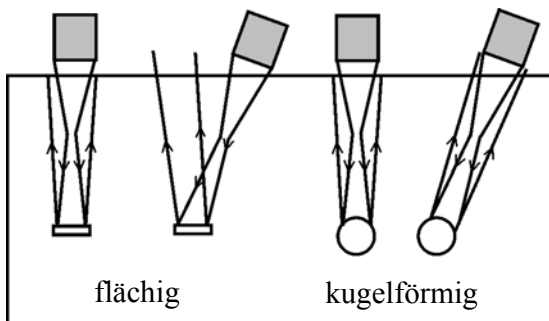


Abbildung 3-6: Dynamik der Reflektivität über dem Einschallwinkel

Laufzeitverfahren

Neben der Auswertung der Echoamplitude kann auch die Echolaufzeit zur Fehlerbewertung herangezogen werden. Beim *ALOK-Verfahren* (Amplituden-Laufzeit-Orts-Kurven) wird eine Fehlstelle ausgehend von 0° unter verschiedenen Winkeln beschallt [Gro81, Mil97]. Bei den definierten Winkel wird ein zweidimensionaler Scan aufgenommen (*Verbundabtastung*).

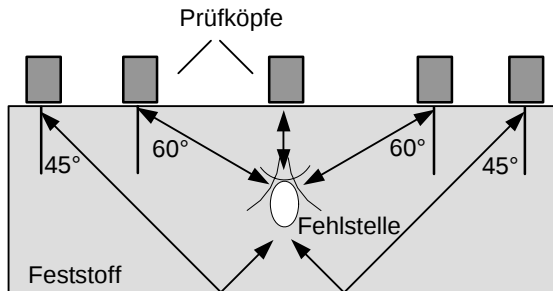


Abbildung 3-7: Prinzip der Verbundabtastung

Bei jedem Scanning wird die maximale Amplitude und die zugehörige Laufzeit ermittelt. Wird für jeden Winkel die maximale Amplitude über der zugehörigen Prüfkopf-Position aufgetragen, so ergibt dies die *Amplituden-Ortskurve* (AOK). Mittels der Kurven ist eine Rekonstruktion der Fehlerberandung möglich. Hierzu wird bei jeder Position ein Kreis mit dem Radius r aus der durch die Laufzeit ermittelten Tiefe konstruiert. Die Verbindung der Schnittpunkte der Kreise stellt eine Näherung für die Fehlerberandung dar [Kra86]. Um jedoch auch die Fehlerberandung der zum Prüfkopf abgewandten Seite zu erhalten, müssen die Reflexionen der Rückwand (siehe Abbildung 3-7) mitberücksichtigt werden, wobei die Oberflächen des Prüfobjektes keine Unregelmäßigkeiten aufweisen dürfen [Deu97].

Spezialverfahren

Neben den bereits beschriebenen Methoden existieren eine Vielzahl von Verfahren für spezielle Anwendungen, über die ein kurzer Überblick gegeben wird.

- Die *akustischen Tomographie*, stellt ein Durchschallungsverfahren dar, wobei ursprünglich für die Röntgentomografie entwickelte Methoden für die Fehlerbewertung verwendet werden [Deu97, Gan01].

- Eine Verbesserung der lateralen Auflösung kann durch die Verwendung von *fokussierten Schallbündeln* erreicht werden [DIN01a]. In Abschnitt 3.2.2 wurde gezeigt, dass jeder Prüfkopf einen natürlichen Fokusbereich hat. Dieser Fokus kann durch Vorsatz von Linsenkörpern verändert werden. Eine Fokusverschiebung wird auch bei der aufwändigeren Gruppenstrahler-Technik erreicht, welche Phased-Array-Prüfköpfe verwendet. Diese bestehen aus mehreren, rasterförmig angeordneten Wandlern, welche einzeln angesteuert werden können, wodurch ein Schwenken des resultierenden Schallbündels sowie die Fokusverschiebung gesteuert werden können [Oel05, Wal00].
- Das *TOFD-Verfahren* (time of flight diffraction) basiert auf der Beugung von winklig eingeschallten Ultraschallimpulsen am oberen und unteren Rand einer Fehlstelle [DIN01b, Mon00]. Die resultierenden Laufzeitunterschiede zwischen dem am oberen sowie unteren Ende gebeugten Impuls können mit einem zweiten Prüfkopf detektiert werden und stellen ein Maß für die Fehlstellenausdehnung in axialer Richtung dar. Das Verfahren ist gut für die Bewertung von Rissspitzen mit klarer axialer Ausdehnung geeignet, weswegen es vorwiegend bei der Schweißnahtprüfung eingesetzt wird [Boe01, Deu95].
- Es existieren ferner Verfahren (*LLT-Verfahren*, *Satellite Pulse Technique*), welche auf der Wellenumwandlung von Longitudinal- und Transversalwellen bei der Reflexion der Ultraschallimpulse an Fehlstellen (vgl. Abschnitt 3.1.2) basieren [Hof89, Kra86, Schle96].
- Bei der *Mehrfrequenzprüfung* wird versucht, durch Anwendung mehrerer Prüffrequenzen Informationen über die Fehlergröße und Geometrie zu erhalten [Deu97, Cro84]. Solche Verfahren basieren zumeist darauf, dass sich die Reflexionseigenschaften einer Fehlstelle mit der Prüffrequenz ändern, so dass durch eine Frequenzanalyse Rückschlüsse auf den Reflektor getroffen werden können.
- Des Weiteren existieren verschiedene Bewertungs-Verfahren, welche auf *mathematischen Modellen* basieren, so dass rechnergestützt eine Fehlerevaluation ermöglicht wird. Bekannte Beispiele sind das *SAFT-Verfahren* (Synthetic Aperture Focusing Technique) und die *akustische Holografie* [Deu97, Lan05, Schu96, Schmi00]. Im Rahmen dieser Arbeit werden mathematische Verfahren nicht weiter betrachtet, es beschäftigen sich jedoch parallel laufende Studien mit der Anwendung und Weiterentwicklung mathematischer Modelle zur Zustandsbewertung von Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik [Wir06].

3.3.2 Bewertung hinsichtlich des Materials

Die Bestimmung des Materials einer Fehlstelle mittels Ultraschall ist im Allgemeinen nicht zu verwirklichen. Insbesondere können bei Impulsreflexionen an Objekten unterschiedlichen Materials keine Veränderungen im Frequenzspektrum festgestellt werden [Rüm96]. Es ist jedoch möglich, über das Vorzeichen des Reflexionsfaktors zu ermitteln, ob die Schallimpedanz des Materials der Fehlstelle größer oder kleiner ist als die zumeist bekannte Schallimpedanz des die Fehlstelle umgebenden Materials. Durch die sich ergebende Aussage, ob das Material der Fehlstelle schallweicher oder schallhärter ist, kann ein Rückschluss auf das Fehlstellenmaterial erfolgen. Ferner ist die Art der auftretenden Fehlstellen in einem Betriebsmittel begrenzt, so dass zum Teil auf Grund von Erfahrungswerten aus der Information der Fehlstellenposition ein Rückschluss auf das Fehlstellenmaterial gezogen werden kann.

4 Material und Messeinrichtung

4.1 Anforderungen an den Prüfprozess

Das Ziel der Arbeit ist die Anwendung der Ultraschalldiagnostik für die Zustandsbewertung von polymeren Isoliersystemen. Aus dieser Vorgabe ergeben sich spezielle Anforderungen an den Prüfprozess, die im Folgenden betrachtet werden.

Prüfkörper

Um verschiedene Formen von Inhomogenitäten in Isoliersystemen untersuchen zu können, ist es notwendig, Messungen an laborgefertigten Prüfkörpern durchzuführen. Diese Prüfkörper sollten ein realitätsnahes Modell für die Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik darstellen. Insofern werden Materialien verwendet, welche als Isolierstoff in der Energietechnik zum Einsatz kommen. Ferner muss ein unter Laborbedingungen verarbeitbares Material verwendet werden. In einfacher Weise lassen sich RTV-2-Silikone reproduzierbar verarbeiten, weswegen diese im Rahmen der Arbeit standardmäßig untersucht werden (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Bei der Untersuchung von Verbundsystemen wird ein transluzentes Epoxidharz verwendet, um die Grenzflächen zusätzlich optisch beobachten zu können. Das Epoxidharz kann auch als Modell für GFK-Elemente verwendet werden, da es bei diesen die makroskopische Grenzfläche zum Silikonelastomer bildet (vgl. Abschnitt 2.1.2). Als Metalle werden zumeist Aluminium und Kupfer verwendet, da diese in der elektrischen Energietechnik standardmäßig als stromführende Materialien verwendet werden.

Sensorik

Bei der Auswahl der Sensorik muss auf der einen Seite berücksichtigt werden, dass Fehlstellen mit sehr kleinem Durchmesser ($d \geq 100 \mu\text{m}$) untersucht werden

sollen, weshalb hohe Prüffrequenzen mit kleinen resultierenden Wellenlängen vorteilhaft sind. Auf der anderen Seite liegt bei dem untersuchten Silikonelastomer eine frequenzabhängige Dämpfung vor, weshalb niedrige Frequenzen vorteilhaft sind (vgl. Abschnitt 3.1.3). Es hat sich gezeigt, dass Frequenzen im Bereich von 2 MHz - 10 MHz geeignet sind, wobei standardmäßig eine Prüffrequenz von 5 MHz verwendet wird.

Um eine hohe laterale Auflösung zu erreichen, bieten sich kleine Prüfkopfdurchmesser an. Kleinere Durchmesser sind ferner vorteilhaft, da hierdurch die Nahfeldlänge verringert wird, welche bereits auf Grund der geringen Schallgeschwindigkeit von Silikon im Vergleich zu anderen Materialien vergrößert ist (vgl. Gleichung 3.14 und Tabelle 4-2). Auf Grund des inhomogenen Schallfelds im Nahfeldbereich sollte die Nahfeldlänge so gering wie möglich gehalten werden (vgl. Abschnitt 3.2.2). Allerdings führen kleine Prüfkopfdurchmesser zu einer Abstrahlung von Schall mit einer geringeren Intensität [Küh06]. Es hat sich gezeigt, dass für die vorliegende Prüfaufgabe Durchmesser im Bereich von 5 mm bis 10 mm vorteilhaft sind.

Für eine hohe axiale Auflösung sollten kurze Schallimpulse verwendet werden [Küh06]. Dies ist auch für die Detektion von Grenzflächen relevant, da somit Verdeckungserscheinungen minimiert werden können (vgl. Abschnitt 6.2). Kurze Impulse können mit einer hohen Bandbreite B erreicht werden [Deu97]. Die Auswahl der Bandbreite wird jedoch durch die frequenzabhängige Dämpfung eingeschränkt, welche den Impuls im Frequenzbereich asymmetrisch dämpft, wodurch Impulsverformungen auftreten. Als geeigneter Wert wird im Rahmen dieser Arbeit standardmäßig eine Bandbreite von 100% verwendet.

Um eine breite industrielle Anwendbarkeit zu gewährleisten, wird bei den Prüfköpfen und der sonstigen Messtechnik auf die Verwendung von Spezialanfertigungen verzichtet.

Messprozess

Der Messprozess sollte reproduzierbar und industriell einsetzbar sein. Aus diesem Grund wird auf eine manuelle Prüfung vollständig verzichtet. Um die Automatisierbarkeit zu gewährleisten, wird die Tauchtechnik eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.2.1). Für die exakte Positionierung des Prüfkopfs und die Durchführung des Messvorgangs, wird ein Mikropositioniersystem mit programmierbarer Steuerung verwendet. Um unterschiedlichen Betriebsmittelgeometrien Rechnung zu tragen, ist der Messprozess derart ausgestaltet, dass sowohl Prüfkörper

mit ebener Oberfläche als auch rotationssymmetrische Prüfkörper mit gekrümmter Oberfläche untersucht werden können.

Für die Ergebnisdarstellung empfiehlt sich eine grafische Form, damit sich ein optischer Eindruck von der Untersuchung gewinnen lässt. Hierbei sollte zum einen die Möglichkeit gegeben sein, eine unbearbeitete Darstellung der Messergebnisse zu erhalten. Zum anderen sollte eine Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Messergebnisse ermöglicht werden. Dies wird erreicht, indem die gesamte Messwertauswertung mittels einer am Institut für Hochspannungstechnik entwickelten modularen Software DISCUS (Diagnosics of Insulation Systems and Components by means of Ultrasound) erfolgt.

4.2 Prüfkörper

4.2.1 Silikonelastomere

Im Rahmen der Arbeit werden unterschiedliche Silikonelastomere betrachtet, wobei standardmäßig das Material PS600 verwendet wird. Die Eigenschaften der von der Firma Wacker-Chemie GmbH, Burghausen, freundlicherweise zur Verfügung gestellten Silikonelastomere sind in Tabelle 4-1 aufgeführt [Wac04].

Name	Typ	Anwendung	Dichte ρ_{Mat} [g/cm ³]	Shore-A
Powersil 600 (PS600)	RTV-2	Isolatoren und Kabelgarnituren	1,13	27
Powersil 630 (PS630)	XLR (Low Viscosity eXtra Liquid Rubber)	Kabelgarnituren und (Hohl-) Isolatoren	1,14	32
Powersil 660 (PS660)	LSR	Isolatoren, Ableiter und Durchführungen	1,09	37
Powersil 665 (PS 665)	LSR	Isolatoren, Ableiter und Durchführungen	1,09	37
Elastosil LR 3002/35 (EL)	Low viscous Liquid Rubber (translucent)	Isolatoren und Kabelgarnituren (große Schichtdicken)	1,09	33

Tabelle 4-1: Eigenschaften der untersuchten Silikonelastomere

Die Prüfkörper werden unter Laborbedingungen hergestellt. Hierzu werden die Komponenten zunächst vermischt, in eine Kunststoff-Form vergossen und in einen Vakuumexsikkator gebracht. Abhängig von der Untersuchung können Musterfehler aus Glas oder Metall in das Material eingebracht werden, wobei insbesondere bei der Betrachtung von kleinen Musterfehlern auf die Verwendung eines Sockels verzichtet wird, um die Messung verfälschende Einflüsse auszuschließen. Anschließend vernetzt das Material je nach Typ bei Raumtemperatur oder im Ofen bei 60°C-120°C. Abbildung 4-1 zeigt ein Photo von entformten Prüfkörpern.

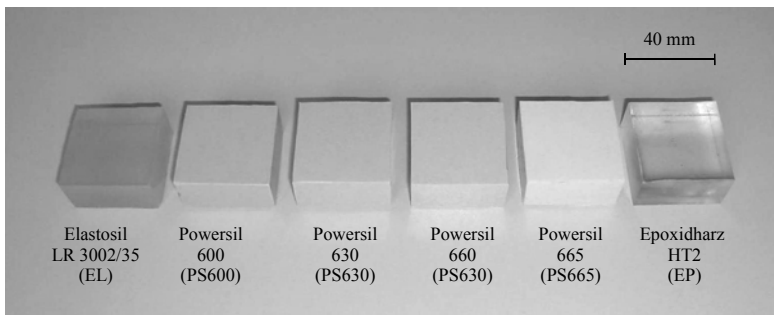


Abbildung 4-1: Untersuchte Materialien

4.2.2 Verbundsysteme

In dieser Arbeit werden Verbundsysteme aus den Materialien Silikonelastomer (PS600), Epoxidharz und Metall betrachtet. Als Epoxidharz wird hierbei das hochtransparente Gießharz HT2 der Firma R&G GmbH, Waldenbuch, verwendet (Abbildung 4-1, rechts), welches üblicherweise als Matrixmaterial für faserverstärkte Elemente eingesetzt wird [Rug03]. Als Metalle kommen insbesondere Aluminium und Kupfer zum Einsatz. Silikonelastomere weisen ein schlechtes Haftvermögen auf Trägermaterialien auf (vgl. Abschnitt 2.1.2). Um bei Verbundsystemen die Haftfestigkeit des Silikonelastomers PS600 auf dem entstaubten und mit Aceton entfetteten Trägermaterial zu erhöhen, wird als Haftvermittler die Grundierung G790 der Firma Wacker-Chemie GmbH, Burghausen, verwendet [Wac00].

4.2.3 Akustische Eigenschaften

Die Kenntnis der akustischen Eigenschaften von den betrachteten Materialien ist eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung und Anwendung von zustandsbewertenden Verfahren. Neben den bereits beschriebenen Materialien spielen in dieser Arbeit weitere Materialien eine Rolle:

Durch die Verwendung der Tauchtechnik wird destilliertes Wasser als Schallan-koppelmedium verwendet (vgl. Abschnitt 3.2.1). Als künstliche Fehlstellen werden u.a. kugelförmige Reflektoren aus Glas (Firma Carl Roth GmbH & Co. KG, Karlsruhe) und scheibenförmige Reflektoren aus Stahl verwendet. Bei der Untersuchung von Delaminationen wird die Grenzfläche zu Luft betrachtet. Die Tabelle 4-2 gibt die Schallimpedanz Z und die Schallgeschwindigkeit c der Longitudinalwelle der betrachteten Materialien bei Raumtemperatur an (vgl. Abschnitt 3.1.1).

Material	Schallimpedanz Z [$10^6 \text{ kg} / (\text{m}^2 \text{ s})$]	Schallgeschwindigkeit c [m / s]
Silikon PS600	1,1	995
Epoxidharz HT2	2,7	2800
Aluminium	17	6320
Kupfer	39	4700
Stahl	45	5900
Glas	14	5800
Wasser	1,5	1483
Luft	0	343

Tabelle 4-2: Akustische Eigenschaften der verwendeten Materialien bei Raumtemperatur

4.3 Messsystem

Das Messsystem besteht aus mehreren zusammenwirkenden Komponenten. Die Schallimpulse werden von einem Prüfkopf erzeugt, welcher zu diesem Zweck an ein Ultraschall-Dialoggerät angeschlossen ist (Abschnitt 4.3.1). Der Prüfkopf

ist über eine Prüfkopfhalterung an einem Mikropositioniersystem befestigt, welches den Prüfkopf während des Messvorgangs automatisiert über den zu untersuchenden Prüfkörper bewegt (Abschnitt 4.3.2). Die detektierten Impulse werden von dem Ultraschall-Dialoggerät empfangen und in einer Messdatei abgespeichert. Diese wird mittels der Software DISCUS ausgewertet (Abschnitt 4.3.3).

4.3.1 Prüfköpfe

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Tauchtechnik-Prüfköpfe der Firma GE Inspection Technologies (vormals Krautkrämer GmbH & Co.), Hürth, verwendet. Die Tabelle 4-3 enthält die in Abschnitt 3.2.2 erläuterten Eigenschaften der verwendeten Prüfköpfe [Kra01]:

Bezeichnung	H5M	H10M	Z2K
Durchmesser D	5 mm	5 mm	10 mm
Impuls-Nennfrequenz f	5 MHz	10 MHz	2 MHz
Bandbreite B	100%	100%	40%
Nahfeldlänge in Wasser N	20,8 mm	41,6 mm	33,3 mm

Tabelle 4-3: Eigenschaften der verwendeten Prüfköpfe

Im Rahmen dieser Arbeit wird standardmäßig der Prüfkopf H5M verwendet. Die Abbildung 4-2 zeigt das mittels eines Punktreflectors in Wasser vermessene Schallfeld des Prüfkopfs H5M.

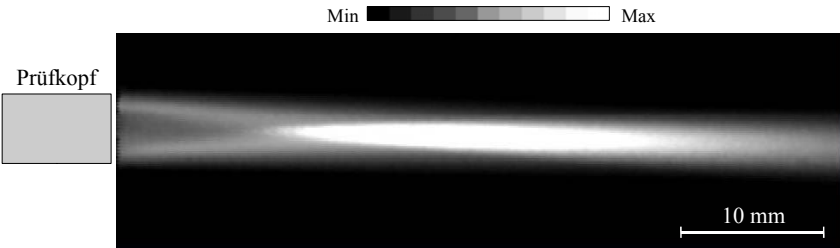


Abbildung 4-2: Schallfeld (maximaler Schalldruck) des Prüfkopfs H5M in Wasser

Das zur akustischen Achse zylindersymmetrische Schallfeld weist einen Fokusbereich in einem Abstand von 10 mm bis 30 mm zum Prüfkopf auf. Der Maximalwert des Schalldrucks wird in einer Entfernung von 18 mm gemessen. Dieser Wert ist etwas geringer als die in Tabelle 4-3 angegebene theoretische Nahfeldlänge in Wasser ($N = 20,8$ mm). Dies liegt zum einen darin begründet, dass der effektive Schwingerdurchmesser auf Grund von Randeffekten geringer ist [Deu97]. Zum anderen wird bei der theoretischen Bestimmung der Nahfeldlänge die Dämpfung des Wasser nicht berücksichtigt.

Die Prüfköpfe werden an das Ultraschall-Dialoggerät USLT 2000 D der Firma GE Inspection Technologies mit integrierter Sender-Empfänger-Box angeschlossen, welches in [Cor03a] beschrieben ist. Der Impulssender besteht aus einem Schwingkreis mit einstellbarer Kapazität C_{Intens} und einstellbarem Dämpfungswiderstand $R_{Dämpf}$ [Kra86]. Im Rahmen dieser Arbeit werden standardmäßig die Einstellungen verwendet, mit denen die höchste Schallintensität erreicht wird ($R_{Dämpf} = 100 \Omega$; $C_{Intens} = 1000$ pF). Die aufgenommen A-Scans werden in Echoamplitude und Laufstrecke jeweils in 10 Bit digitalisiert (1024×1024 Werte) (Abbildung 3-1 rechts).

4.3.2 Mechanische Messkomponenten

Die Prüfköpfe sind über eine Prüfkopfhalterung an einem Mikropositioniersystem der Firma iselautomation GmbH & Co. KG, Eichenzell, befestigt, welches drei zueinander orthogonal angeordnete Wellenschlitten umfasst (Abbildung 4-3). Diese werden von einem Drei-Achs-Schrittmotor-Controller angesteuert und können mit einer minimalen Schrittweite von $50 \mu\text{m}$ bewegt werden. Für die Untersuchung von zylindersymmetrischen Prüfkörpern steht ferner ein Rundschalttisch mit einer Rotationsachse zur Verfügung. Das Positioniersystem ist in [Cor03a] beschrieben. Die zu untersuchenden Prüfkörper befinden sich in mit destilliertem Wasser gefüllten Tauchbecken in einer Halterung.

Da im Rahmen dieser Arbeit auch Untersuchungen mit unter einem Neigungswinkel in den Prüfkörper eingeschallten Impulsen erfolgt, wird eine Prüfkopfhalterung verwendet, welche eine gradgenaue Einstellung des Einschallwinkels ermöglicht (Abbildung 4-3 oben rechts).

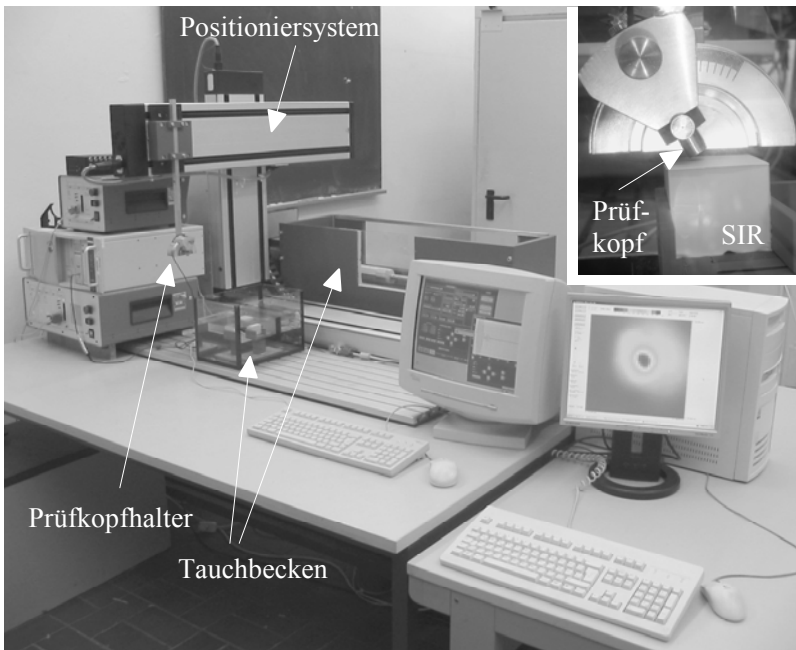


Abbildung 4-3: Ultraschall-Messsystem

4.3.3 Software

Für die Durchführung der Messung muss das Positioniersystem mit dem Ultraschall-Dialoggerät synchronisiert zusammenwirken. Hierfür wird eine programmierte Steuerungssoftware verwendet, welche auf Visual Basic mit eingebetteten OCX-Modulen basiert und deren Grundzüge in [Cor03a] beschrieben sind. Die grafische Benutzerschnittstelle erlaubt u.a. die Einstellung der Größe des zu untersuchenden Messbereichs, der Schrittweite sowie von Ultraschallparametern (z.B. Schallgeschwindigkeit, Prüfkopfdaten, Kapazität und Dämpfungswiderstand des Sendeschwingkreises, Empfangsverstärkung und -filter, Gleichrichtung der empfangenen Signale).

Während der Messung wird der Prüfkopf schrittweise mäanderförmig in dem zuvor definierten Messbereich über der Oberfläche des Prüfkörpers bewegt. An jedem Messpunkt wird ein A-Scan aufgenommen und in einer Messdatei zusammen mit der Messposition abgespeichert.

Die gespeicherte Messdatei wird mit der Software DISCUS eingelesen und ausgewertet. DISCUS ermöglicht die farb- oder grauwertcodierte Anzeige und Speicherung von C- und D-Bildern (vgl. Abschnitt 3.2.3). Diese können schichtweise mit variabler Schichtbreite ausgewertet werden, so dass eine tomographische Betrachtung möglich ist. Durch Maus-Klick auf einen Bildpunkt wird die Messposition angezeigt, so dass das Positioniersystem diese Stellen gezielt anfahren kann. Ferner wird der aufgenommene A-Scan an dieser Position angezeigt.

Ein weiteres Modul von DISCUS beinhaltet das in Abschnitt 6.1.1 erläuterte Verfahren zur Bestimmung und Darstellung von *Korrelationskarten* (*K-Bildern*).

5 Diagnostik von singulären Fehlstellen

Die Ultraschalltechnik hat im Rahmen einer Fehlstellendiagnostik insbesondere die Aufgaben der Detektion, Lokalisation und Evaluation einer Fehlstelle. In vorangegangenen Studien wurde die Detektierbarkeit von kugelförmigen Fehlstellen in Silikonelastomer untersucht, ferner wurden Verfahren zur automatisierten Lokalisation der detektierten Fehlstellen angegeben [Cor03a, Cor04b]. Eine solche Detektion und Lokalisation kann hinsichtlich der Klassifikation eines Betriebsmittels in den Fällen bereits ausreichend sein, in denen eine nahezu absolute Fehlerfreiheit des Isoliersystems eines Betriebsmittels gewünscht ist. In solchen Fällen führt bereits die Detektion einer Inhomogenität dazu, dass das Betriebsmittel nicht in Betrieb genommen wird. Es kann allerdings auch in diesen Fällen eine Fehlerbewertung vorteilhaft sein, um beispielsweise Informationen über die Fehlerart und -herkunft zu erhalten, so dass der Herstellungsprozess verbessert werden kann. In anderen Fällen werden Betriebsmittel mit Fehlstellen mit geringerem Schädigungspotenzial zugelassen. Dies führt dazu, dass eine umfassendere Bewertung der detektierten Fehlstelle vorgenommen werden muss. Dieses Kapitel beschäftigt sich auf der einen Seite mit der Detektion von singulären Fehlstellen, auf der anderen Seite wird untersucht, in wie weit eine Fehlerbewertung in dem betrachteten Silikonelastomer mittels Ultraschall möglich ist.

5.1 Detektion von singulären Fehlstellen

Die Detektierbarkeit von Fehlstellen hängt von einer Vielzahl von Parametern ab, insbesondere vom Prüfkopf, vom Material des Prüfkörpers, von der Fehlstelle und vom Messaufbau. In der Praxis können neben kugelförmigen Fehlstellen auch faserförmige Fehlstellen wie Risse oder Treeingkanäle auftreten (vgl. Abschnitt 2.1.1), weshalb in Abschnitt 5.1.2 deren Detektierbarkeit untersucht wird. Bei komplexeren Strukturen ist zudem die Frage der Auflösbarkeit der inneren Fehlstellenstruktur interessant. Diese wird in Abschnitt 5.1.3 mittels der standardisierten Landoltring-Methode

untersucht, welche zur Bewertung der Auflösbarkeit von bildgebenden Systemen eingesetzt wird [Che05, Wes01].

5.1.1 Detektion von kugelförmigen Fehlstellen

In vorausgegangenen Studien wurde die Detektierbarkeit von Kugeln aus Glas in einem Silikonelastomer (PS660) untersucht [Cor03a]. Für den Prüfkopf H5M gilt der in Abbildung 5-1 dargestellte Verlauf der Detektierbarkeit.

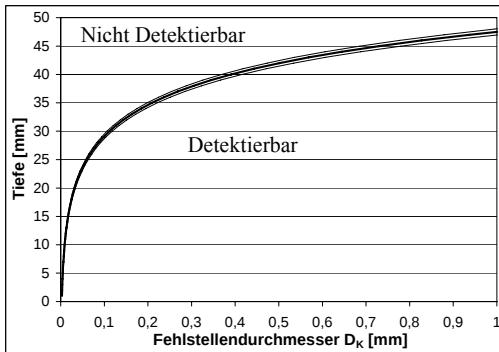


Abbildung 5-1: Detektierbarkeit von kugelförmigen Fehlstellen in Silikon [aus Cor03a]

In dem Diagramm ist erkennbar, dass kugelförmige Fehlstellen in dem betrachteten Silikonelastomer beispielsweise mit 100 μm Größe bis zu einer Tiefe von 30 mm detektierbar sind. Die Ergebnisse können im Rahmen der vorliegenden Arbeit bestätigt werden. Isolierwandstärken liegen nur selten über diesem Wert, somit können die wesentlichen Fehlstellen mit einem nach Herstellerangaben relevanten Schädigungspotenzial erkannt werden [Cor03b].

Eine Verbesserung wird erreicht, wenn Prüfköpfe mit einem größeren Durchmesser verwendet werden, da diese in der Regel eine größere Schallleistung abstrahlen. Größere Prüfköpfe führen jedoch zu einer verringerten lateralen Fehlerauflösbarkeit, weswegen in dieser Arbeit standardmäßig der Prüfkopf H5M verwendet wird (vgl. Unterkapitel 4.1).

5.1.2 Detektion von faserförmigen Fehlstellen

Für die Untersuchung der Detektierbarkeit von faserförmigen Fehlstellen mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern werden einzelne Glasfasern ($\varnothing = 16 \mu\text{m}$) in Silikon in verschiedenen Tiefen eingebracht (Abbildung 5-2,

links). Die Fasern weisen eine glatte Oberfläche auf, so dass sie gut für Ultraschalluntersuchungen geeignet sind, da keine Oberflächenunregelmäßigkeiten die Messung beeinträchtigen (Abbildung 5-2, rechts).

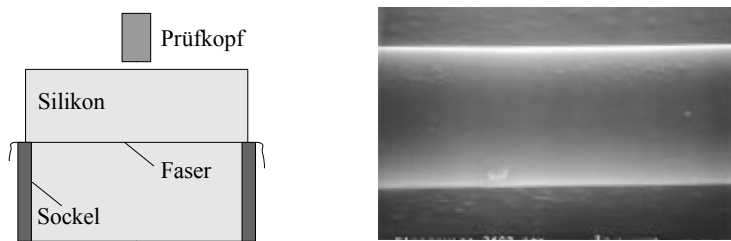


Abbildung 5-2: links: Prüfaufbau; rechts: REM-Aufnahme einer verwendeten Glasfaser [aus Rug03]

Die Prüfkörper werden mit dem Prüfkopf H5M untersucht. Die aufgenommenen C-Bilder sind in Abbildung 5-3 dargestellt.

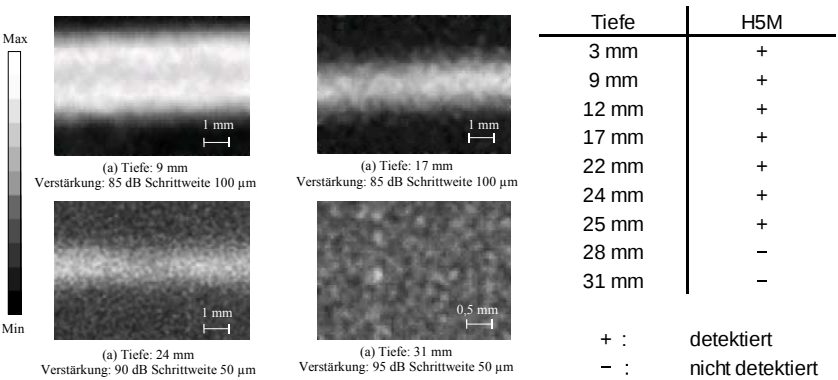


Abbildung 5-3: C-Bilder von Glasfasern (Ø 16 µm) in Silikon in unterschiedlicher Tiefe
Tabelle 5-1: Detektierbarkeit von Glasfasern in Silikon in Abhängigkeit von der Tiefe

Je tiefer die Faser liegt, umso stärker wird der Schall im Material gedämpft, so dass die Echoamplitude bei zunehmender Schichtdicke geringer wird. In der Abbildung 5-3 ist zudem deutlich der Effekt zu sehen, dass die Größe der Glasfaser nicht korrekt im C-Bild wiedergegeben wird, da der Durchmesser des Schallbündels um ein Vielfaches größer ist als der Durchmesser der

Glasfaser, so dass eine Größenbestimmung aus dem C-Bild nicht möglich ist (vgl. Abschnitt 3.2.3).

Die Tabelle 5-1 gibt die Detektierbarkeit der Fasern in Abhängigkeit von der über der Faser liegenden Silikonschichtdicke an. Bis zu einer Schichtdicke von 25 mm lassen sich noch Echosignale der Faser detektieren, die mehr als 6 dB über dem Rauschpegel liegen, so dass die Faser als „detektiert“ klassifiziert wird. Es ist zu erwarten, dass dieser Wert durch Verwendung von speziellen Prüfköpfen mit größerer Abstrahlleistung sowie durch eine mathematische Rekonstruktionsalgorithmen mit verbessertem Signal-Rausch-Verhältnis, welche in parallel laufenden Arbeiten untersucht werden, noch gesteigert werden kann [Wir06]. Die Untersuchungen ergeben zusammengefasst, dass faserförmige Fehlstellen in Silikon in Abhängigkeit von der Tiefenlage erkannt werden können, auch wenn der Fehlerdurchmesser ($d = 16 \mu\text{m}$) in einer Raumrichtung weniger als $1/10$ der Wellenlänge ($\lambda = 200 \mu\text{m}$) beträgt.

5.1.3 Auflösbarkeit von Fehlstellenstrukturen

Um zu untersuchen, welche Fehlerstrukturen noch getrennt aufgelöst werden können und um somit das Auflösungsvermögen des Messsystems zu ermitteln, werden standardisierte Landoltringe verwendet (Abbildung 5-4, links).

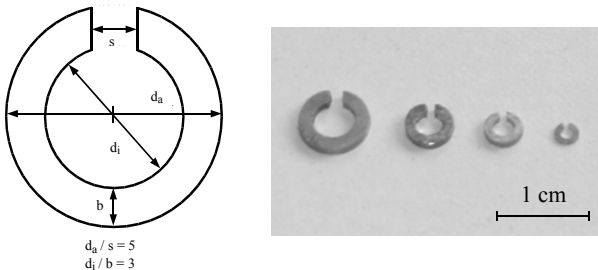


Abbildung 5-4: Standard-Landoltring und verwendete Ringe aus Kupfer in vier Größen

Es werden vier verschiedene Größen von Ringen mit unterschiedlichen Spaltbreiten verwendet (siehe Abbildung 5-4, rechts). Die Größen der aus Kupfer gefertigten Ringe sind in Tabelle 5-2 angegeben.

	Ring A	Ring B	Ring C	Ring D
d_a	7,5 mm	5 mm	4 mm	2,5 mm
d_i	4,5 mm	3 mm	2,4 mm	1,5 mm
b	1,5 mm	1 mm	0,8 mm	0,5 mm
s	1,5 mm	1 mm	0,8 mm	0,5 mm

Tabelle 5-2: Größen der verwendeten Landoltringe aus Kupfer (Dicke: 1 mm)

Die Ringe werden in Silikon (Powersil 600) sowie in Epoxydharz (HT2) in verschiedenen Tiefen eingegossen und mit dem Ultraschallmesssystem vermessen. Die Abbildung 5-5 zeigt drei exemplarische Ergebnisse von Messungen in Silikon.

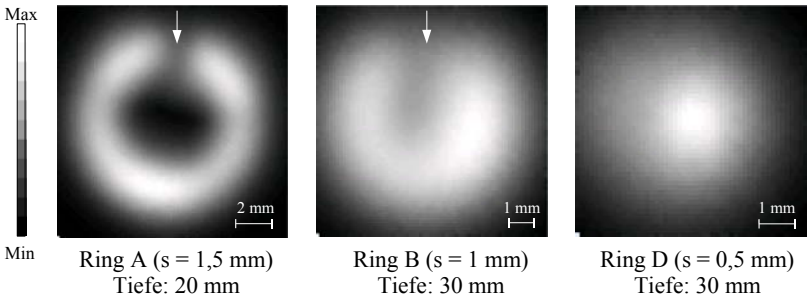


Abbildung 5-5: C-Bilder von Landoltringen

In den C-Bildern kann der Spalt entweder eindeutig detektiert (Abbildung 5-5, links), nicht sicher detektiert (Abbildung 5-5, Mitte) oder nicht detektiert (Abbildung 5-5, rechts) werden. Ein Ring wird als „nicht sicher detektiert“ klassifiziert, wenn der Spalt optisch noch erkennbar ist, aber das Verhältnis zwischen maximaler Amplitude des Rings und minimaler Amplitude in der Spaltmitte weniger als 3 dB beträgt. In den Tabellen 5-3 und 5-4 sind die Ergebnisse für Silikon und Epoxidharz zusammengestellt.

Ring Position	Ring A	Ring B	Ring C	Ring D
10 mm	+	+	+	-
15 mm	/	/	+	-
20 mm	+	+	-	-
25 mm	/	/	-	-
30 mm	+	0	-	-
35 mm	+	-	-	-

+ : detektiert
 0 : nicht sicher detektiert
 - : nicht detektiert
 / : keine Daten

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Auflösbarkeit in Silikon

Ring Position	Ring A	Ring B	Ring C	Ring D
12 mm	+	+	0	-
20 mm	0	-	-	-
24 mm	0	-	-	-
28 mm	-	-	-	-

+ : detektiert
 0 : nicht sicher detektiert
 - : nicht detektiert

Tabelle 5-4: Ergebnisse der Auflösbarkeit in Epoxidharz

In dem untersuchten Silikonelastomer kann der Spalt des größten Rings (Ring A) in jeder Tiefe aufgelöst werden, wohingegen der Spalt des kleinsten Rings (Ring D) in keiner Messung aufgelöst werden konnte. Die Detektion des Spalts bei den beiden mittleren Größen hängt auf Grund der Materialdämpfung von der Tiefenlage des Rings ab. Prinzipiell ergeben sich die gleichen Aussagen auch für Epoxidharz. Die Auflösbarkeit ist jedoch deutlich geringer als in Silikonelastomer. Dies liegt hauptsächlich darin begründet, dass die geringere Schallgeschwindigkeit in Silikon zu einer verringerten Wellenlänge (196 μm bei 5 MHz) im Vergleich zur Wellenlänge in Epoxidharz (486 μm bei 5 MHz) führt, so dass in Silikon kleinere Strukturen unabhängig von der höheren akustischen Dämpfung aufgelöst werden können. Es wird somit insgesamt gezeigt, dass das Auflösungsvermögen eine Abhängigkeit von der Tiefenlage und dem Material aufweist und im Bereich von

0,8 mm bis 1,5 mm liegt. Dies ist der minimale laterale Abstand, den eine Fehlerstruktur aufweisen muss, um noch aufgelöst werden zu können.

Für die Untersuchung des Wachstums von verästelten Treeing-Kanälen in Silikon ist diese Auflösbarkeit unzureichend. Zur Überprüfung wurden in Silikonprüfkörpern Electrical Trees gezüchtet (vgl. Abbildung 2-9), wobei in vorgegebenen Zeitintervallen eine Ultraschalluntersuchung durchgeführt wurde. Die Messungen zeigen, dass Treeing-Kanäle und das gesamte Fortschreiten zwar detektiert werden können, es ist jedoch keine Aussage über die Anzahl der Kanäle bzw. über deren Verästelung und Größe möglich [Uen06].

5.2 Evaluation von singulären Fehlstellen

In Abschnitt 2.2.1 wird beschrieben, dass insbesondere die Dimension aber auch die Geometrie und die Orientierung einer Fehlstelle im Isolierstoffvolumen einen Einfluss auf das Schädigungspotenzial hinsichtlich der Isolierfähigkeit haben. In diesem Gebiet eingesetzte Ultraschallverfahren sollten somit im Ergebnis eine Aussage über diese Größen liefern.

5.2.1 Analyse von geeigneten Prüfverfahren

An die Bewertungsverfahren sind Anforderungen gestellt, damit sie für die beschriebene Anwendung geeignet sind:

- Bei der Untersuchung müssen die Materialeigenschaften der Isolierstoffe berücksichtigt werden. Insbesondere die hohe Dämpfung oder die nicht ausgeprägte Transversalwelle in elastomeren Materialien sowie die in diesem Material auftretenden Fehlerformen bestimmen die Anwendbarkeit der Bewertungsverfahren (vgl. Unterkapitel 3.1).
- Es sollte bereits bei der Auswahl der Bewertungsverfahren die Betriebsmittelgeometrie berücksichtigt werden. Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik, wie beispielsweise Kabelgarnituren, sind häufig zylindersymmetrische Betriebsmittel oder weisen eine komplexe innere Struktur auf, welche die Ultraschalldiagnostik erschwert. Somit können beispielsweise Verfahren, welche auf der Durchschallungstechnik basieren, nur unter erschwerten Bedingungen eingesetzt werden.
- Der Auswertungsprozess sollte automatisierbar und unabhängig von der Erfahrung des Prüfers sein. Die Ergebnisse sollten objektiv und reproduzierbar sein und keine Ergebnisinterpretation erfordern.

In Abschnitt 3.3.1 werden bekannte Ultraschall-Verfahren zur Evaluation singulärer Fehlstellen vorgestellt. Die Ultraschalldiagnostik unterscheidet zwischen Verfahren zur Bewertung von kleinen Fehlstellen und von großen Fehlstellen, wobei sich die Fehlergröße auf die Größe im Verhältnis zur Schallbündelbreite des verwendeten Prüfkopfs bezieht (vgl. Abschnitt 3.3.1). In der vorliegenden Arbeit wird hauptsächlich der Prüfkopf H5M verwendet, so dass Fehlstellen, die kleiner als 3 mm im Durchmesser sind, als klein bewertet werden.

Hinsichtlich der im Rahmen dieser Arbeit behandelten Anwendung der Ultraschalldiagnostik in der Isolierstofftechnik ist insbesondere die Fehlerbewertung von kleinen Fehlstellen relevant. Das Auftreten von größeren Fehlstellen in Betriebsmitteln ist zwar nicht ausgeschlossen, allerdings hat die Detektion einer solchen Fehlstelle in der Regel zur Konsequenz, dass das Betriebsmittel unabhängig von der Größe als mangelhaft klassifiziert wird und nicht in Betrieb genommen wird, so dass die Bestimmung einer Größe nicht notwendig ist. Aus diesem Grund liegt das Augenmerk auf Verfahren zur Evaluation kleiner Fehlstellen.

Für die Größenbestimmung von kleinen Fehlstellen sind Amplitudenverfahren geeignet. In Abschnitt 3.3.1 wird erläutert, dass sich insbesondere die AVG-Methode, welche auf prüfkopfspezifischen Diagrammen basiert, und die Vergleichskörpermethode in der Praxis durchgesetzt haben. Nachteilig an der AVG-Methode ist jedoch zum einen, dass sie auf Grund der Interferenzerscheinungen des Nahfelds vor allem im Fernfeld anwendbar ist. Zum anderen hängt die Echohöhe nicht nur von der Größe der Fehlstelle, sondern auch in hohem Maße von der Prüfkörper-Oberfläche und von den Eigenschaften des durchschallten Materials ab [Deu97]. Vor allem die frequenzabhängige Dämpfung stellt bei der Fehlerermittlung durch die theoretischen AVG-Kurven ein Problem dar. Auf Grund der ausgeprägten Dämpfung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Silikonelastomere wird die AVG-Methode nicht weiter betrachtet.

Die beschriebenen Unsicherheiten können durch die Anwendung der Vergleichskörpermethode vermieden werden [Deu97]. Die Verwendung von Kreisscheibenreflektoren erlaubt zudem auf Grund der idealen Reflektoreigenschaften eine Mindestgrößenabschätzung, da ein solcher Reflektor das größtmögliche Echo für einen Fehler gleichen Durchmessers erzeugt [Blu94,

Deu97]. Untersuchungen zur Vergleichskörpermethode werden in Abschnitt 5.2.2 vorgestellt.

Um Informationen über die axiale Ausdehnung der Fehlstelle und somit über die Geometrie und Orientierung zu erhalten, können Winkelverfahren eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 3.3.1). Das bei der manuellen Prüfung bekannte Verfahren der Dynamik der Reflektivität gestattet bei Anschallung einer Fehlstelle unter verschiedenen Winkel eine Aussage über die Geometrie und erscheint für die vorliegende Prüfaufgabe vielversprechend. Untersuchungen zu diesem Verfahren werden in Abschnitt 5.2.3 vorgestellt.

Bei dem auf Laufzeitmessungen basierten ALOK-Winkelprüfverfahren können auf Grund der hohen Dämpfung des Materials nur unter erschwerten Bedingungen Informationen der von der Fehlstelle über die Rückwand reflektierten Schallimpulse zur Fehlerbewertung verwendet werden (vgl. Abbildung 3-7). Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Untersuchungen ergeben, dass eine Geometriebestimmung für kugel- und ellipsoidförmige Fehlstellen in Silikon, welche kleiner als 3 mm sind, auf Grund der vorliegenden Randbedingungen mit dem ALOK-Verfahren nicht möglich ist. Auf Grund der mangelnden Ergebnissignifikanz werden diese Untersuchungen nicht weiter betrachtet.

In Abschnitt 3.3.1 werden zudem Spezialverfahren für die Fehlerbewertung vorgestellt. Alle beschriebenen Verfahren weisen jedoch prinzipielle Einschränkungen der Anwendbarkeit für die durchzuführenden Untersuchungen auf und werden aus diesem Grund im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt:

- Das Verfahren der akustischen Tomographie basiert auf einem Durchschallungsverfahren, welches auf Grund der Betriebsmittelgeometrie ungünstig und teilweise ausgeschlossen ist.
- Verfahren mit fokussierten Schallbündeln werden nicht eingesetzt, weil die Fokustiefe mit herkömmlichen Prüfköpfen nicht eingestellt werden kann und die Fehlertiefe a priori unbekannt ist. Phased-Array-Prüfköpfe könnten voraussichtlich zu vertieften Erkenntnissen führen und eine sinnvolle sowie zeitsparende Erweiterung darstellen, sie standen jedoch für das aktuelle Projekt nicht zur Verfügung.
- Das TOFD-Verfahren weist den Nachteil auf, dass die laterale Auflösung gering ist und dass die Signalintensitäten der gebeugten Im-

pulse schwach sind [Hec97], so dass in hochdämpfenden Silikonelastomeren eine Anwendung wenig aussichtsreich erscheint..

- Verfahren, welche die Wellenumwandlung von Longitudinal- und Transversalwellen bei der Reflexion der Ultraschallimpulse verwenden, können für die Untersuchung von elastomeren Materialien keine Anwendung finden, da diese die Ausbreitung einer Transversalwelle nicht zulassen (vgl. Abschnitt 3.1.1).
- Die Verwendung einer Mehrfrequenzprüfung ist nachteilig, weil bei der vorliegenden Prüfaufgabe die Ergebnissignifikanz auf Grund der Unzulässigkeit der Verwendung von hohen Frequenzen (Dämpfung) und tiefen Frequenzen (Auflösung) nicht ausreichend ist, so dass nicht in einem ausreichenden Maße unterschiedliche Frequenzen verwendet werden können [Adl77, Ger63].

Im Ergebnis liefert die Vergleichskörper-Methode eine Möglichkeit zur Fehlerbewertung hinsichtlich der Größe. Informationen über die Geometrie und Orientierung können über Winkel-Verfahren gewonnen werden, wobei das Verfahren der Dynamik der Reflektivität über dem Einschallwinkel betrachtet wird.

Wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben ist die Bestimmung des Fehlstellenmaterials mittels Ultraschall nur sehr begrenzt möglich. Über die Auswertung der Phasenlage des reflektierten Impulses ist eine Aussage darüber möglich, ob das Fehlstellenmaterial schallhärter oder schallweicher ist als das untersuchte Material. Bei der Untersuchung von Silikonelastomeren ist vorteilhaft, dass diese eine für einen Feststoff außerordentlich geringe Schallimpedanz aufweisen (vgl. Tabelle 4-2). Im Wesentlichen weisen nur Gase eine noch geringere Schallimpedanz auf. Somit kann bei der Detektion eines schallweicheeren Fehlstellenmaterials auf einen gasförmigen Einschluss geschlossen werden.

5.2.2 Vergleichskörpermethode

Die Vergleichskörpermethode kann zur Fehlergrößenbestimmung eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 5.2.1). Hierzu müssen zunächst Vergleichskörper mit Ersatzreflektoren hergestellt und vermessen werden, welche den zu untersuchenden Prüfkörpern soweit wie möglich ähneln. Insbesondere die Wahl der Ersatzreflektoren ist von besonderer Bedeutung, weil die Vergleichskörpermethode eine umso genauere Fehlerbewertung ermöglicht, je mehr die Ersatzreflektorgeometrie mit der Fehlstellengeometrie übereinstimmt (vgl. Abschnitt 3.3.1). Im Rahmen dieser Arbeit werden Kugelreflektoren für die Bestim-

mung der wahrscheinlichen Größe und Kreisscheibenreflektoren für die Bestimmung der Mindestgröße einer detektierten Fehlstelle betrachtet.

Kugelreflektoren

Als kugelförmige Ersatzreflektoren werden Glaskugeln mit verschiedenen Durchmessern im Bereich von 0,2 mm bis 3 mm verwendet. Diese werden in verschiedenen Tiefen im Bereich von 10 mm bis 35 mm in Silikon vergossen. Diese Vergleichskörper werden mit Ultraschall untersucht, wobei die einstellbaren Messparameter ($R_{Dämpf} = 100 \Omega$; $C_{Intens} = 1000 \text{ pF}$) konstant gehalten werden (vgl. Abschnitt 4.3.2). Eine geringere Tiefe wird auf Grund der inhomogenen Nahfeldcharakteristik nicht verwendet. Die gemessenen Echoamplituden werden auf eine Bezugsverstärkung (Empfangsverstärkung: 76 dB) normiert. Zudem werden die Echoamplituden gemäß dem reziproken Reflexionsfaktor der Grenzfläche Silikon-Glas ($R = 0,854$) skaliert, so dass die Glaskugeln mit Lufteinschlüssen ($|R| = 1$) vergleichbar sind. Die Abbildung 5-6 zeigt die derart umgerechneten Echoamplituden über der Tiefe für konstante Kugeldurchmesser in einer halblogarithmischen Darstellung.

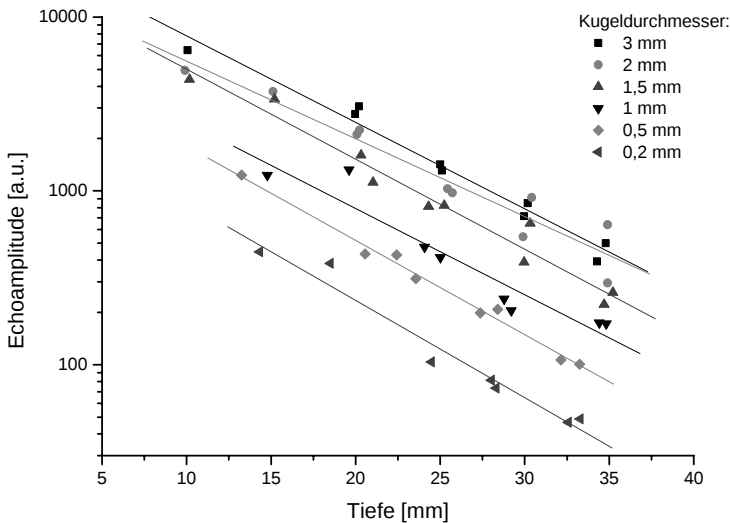


Abbildung 5-6: Echoamplituden von Kugelreflektoren in verschiedenen Tiefenlagen

Es zeigt sich auf Grund der Dämpfung des Materials bei konstantem Durchmesser eine Abnahme der Echoamplituden mit steigender Tiefe, welche einem exponentiellen Verlauf angenähert werden kann (vgl. Gleichung 3.11). Der Einfluss der Abnahme der Echoamplitude auf Grund der Schallfeldfunktion (vgl. Gleichung 3.13) ist gegenüber der hohen Dämpfung erwartungsgemäß rezessiv [Cor03a]. Aus den Steigungen der exponentiellen Ausgleichskurven ist der Schwächungskoeffizient α_s gemäß Gleichung 3.11 des Silikonelastomers PS600 bestimmbar. Unter Berücksichtigung der doppelten Laufstrecke ergibt sich der Schwächungskoeffizient zu $\alpha_s = (0,0585 \pm 0,005) \text{ 1/mm}$, bzw. nach Umrechnung zu $\alpha_{s,dB} = (508 \pm 22) \text{ dB/m}$. Er liegt somit niedriger als der Schwächungskoeffizient des Silikonelastomers PS660, welcher im Mittel zu $\alpha_{s,dB} = (565 \pm 31) \text{ dB/m}$ bestimmt wurde [Cor03a]. Weitere Untersuchungen zum Vergleich verschiedener Silikonelastomere werden am Ende dieses Abschnitts beschrieben.

Die Abbildung 5-7 zeigt die Echoamplituden über dem Durchmesser des Kugelreflektors für konstante Tiefenlagen. Weil die Kugeln nicht exakt in der angegebenen Tiefe im Silikon positioniert werden können (Abweichung $\Delta s = \pm 1 \text{ mm}$), wenn auf die Verwendung eines Sockels verzichtet wird (vgl. Abschnitt 4.2.1), sind die Echoamplituden gemäß den in Abbildung 5-6 gezeigten entsprechenden Ausgleichsgeraden angepasst.

Die Echoamplituden steigen in Übereinstimmung mit Gleichung 3.22 linear mit dem Durchmesser des kugelförmigen Reflektors an. Um ein von der Tiefenlage unabhängiges Ergebnis zu erhalten, werden nunmehr die Echoamplituden auf die Echoamplitude einer Kugel mit 1 mm Durchmesser an der Stelle bezogen, welche einer Tiefe von 0 mm entspräche. Diese Bezugsschalldruckamplitude wird im Folgenden mit p_{Bez} bezeichnet. Abbildung 5-8 zeigt das entstehende Diagramm, welches für die Größenbestimmung von Fehlstellen nach der Vergleichskörpermethode verwendet werden kann.

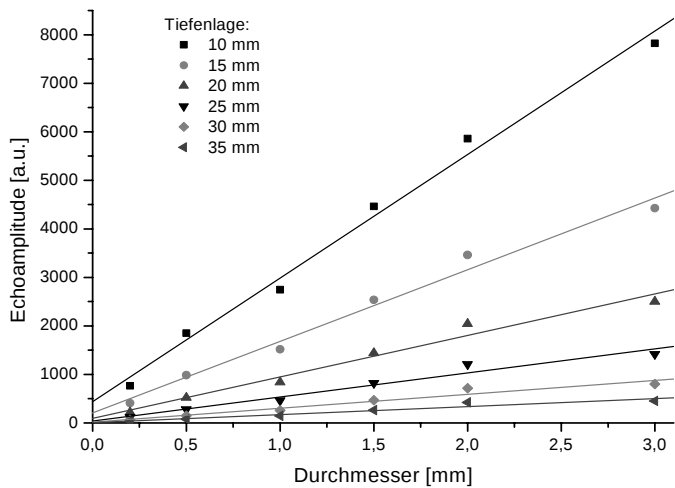


Abbildung 5-7: Echoamplituden von Kugelreflektoren mit verschiedenen Durchmessern

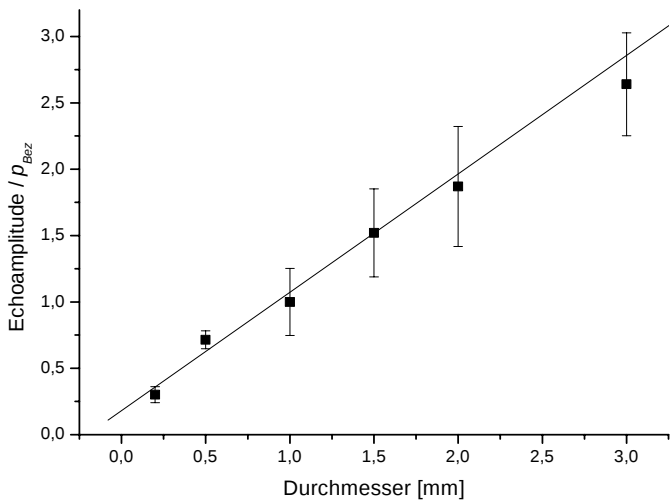


Abbildung 5-8: Diagramm für die Größenbestimmung von kugelförmigen Reflektoren

Das Diagramm wird derart für die Größenbestimmung eines unbekannten Reflektors verwendet, dass zunächst die Echoamplitude des unbekannten Reflektors gemessen wird, wobei die einstellbaren Messparameter mit den oben genannten übereinstimmen müssen. Anschließend wird die auf die Bezugsverstärkung normierte Echoamplitude mittels der gemessenen Tiefenlage auf die Position 0 mm entdämpft und auf die Bezugsschalldruckamplitude bezogen. Durch den derart ermittelten Wert kann über die Abbildung 5-8 die kugelförmige Ersatzreflektorgröße ermittelt werden, welche ein Maß für die Fehlstellengröße darstellt.

Die ermittelte Größe stellt die wahrscheinliche Größe eines Lufteinschlusses in Silikon dar, weil diese in Silikon zumeist eine kugelhähnliche Form aufweisen (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Kreisscheibenreflektoren

Für eine Mindestgrößenabschätzung werden kreisscheibenförmige Ersatzreflektoren verwendet. Grundsätzlich finden zumeist Flachbodenbohrungen als kreisscheibenförmige Vergleichsreflektoren Einsatz (vgl. Abschnitt 3.3.1). In Elastomeren kann jedoch keine Flachbodenbohrung eingebracht werden, da insbesondere bei kleineren Durchmessern die Bohrung auf Grund der Elastizität des Materials geschlossen wird. Aus diesem Grund werden zylindrische Stahlstifte mit ebener Bodenfläche verwendet. Die Stahlstifte mit unterschiedlichem Durchmesser werden in verschiedenen Tiefen in Silikon eingegossen und mit Ultraschall vermessen. Die Abbildung 5-9 zeigt die entsprechend zu Abbildung 5-8 umgerechneten und auf die Bezugsschalldruckamplitude p_{Bez} bezogenen Echoamplituden, so dass diese für die Größenbestimmung verwendet werden können. Die Skalierung der Werte hinsichtlich des Materials erfolgt mit dem reziproken Reflexionsfaktor der Grenzfläche Silikon-Stahl ($R = 0,96$).

Der Verlauf kann mit einer potenziellen Ausgleichsfunktion der Form $f(x) = const \cdot x^{1,6}$ (Bestimmtheitsmaß $R^2=0,95$) angenähert werden. Der mit dem Durchmesser nach Gleichung 3.21 vorausgesagte quadratische Anstieg wird nicht erreicht.

Wenn die kugelförmigen Reflektoren mit den kreisscheibenförmigen Reflektoren verglichen werden, so ist auffällig, dass die Echoamplituden der Kreisscheibenreflektoren ein Vielfaches der Echoamplituden der Kugelreflektoren betragen (Abbildung 5-10).

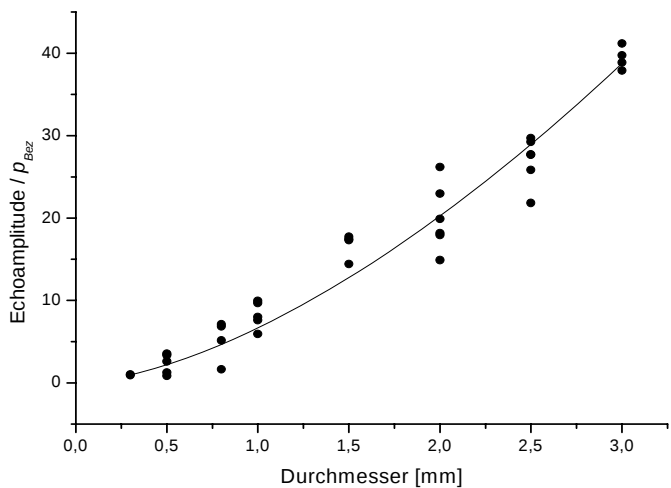


Abbildung 5-9: Diagramm für die Größenbestimmung von Kreisscheibenreflektoren

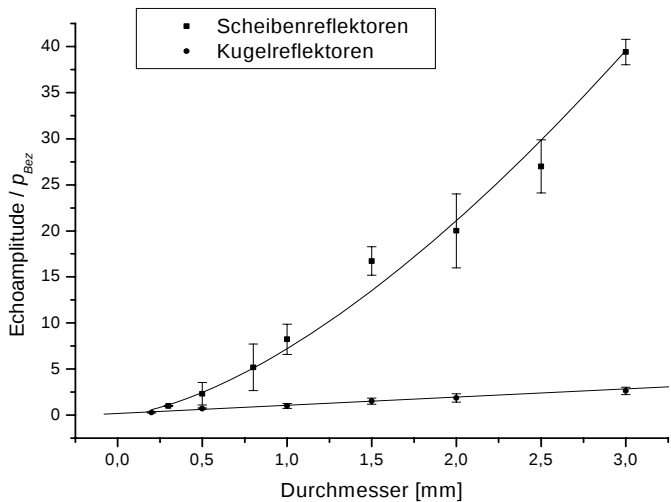


Abbildung 5-10: Vergleich von kugel- und kreisscheibenförmigen Reflektoren

Die Plausibilität der Ergebnisse kann überprüft werden, wenn das theoretisch zwischen den Kurven bestehende Verhältnis von Kugel- und Kreisscheibenreflektoren aus den Gleichungen 3.21 und 3.22 bestimmt wird:

$$\frac{p_{Echo,Scheibe}}{p_{Echo,Kugel}} = \frac{\pi}{\lambda} \cdot D_r \quad (5.1)$$

Aus der Gleichung 5.1 ergibt sich, dass das Verhältnis neben der Reflektorgröße auch von der Wellenlänge und somit von der Frequenz bestimmt wird. Die Wellenlänge beträgt im Silikon bei Verwendung des Prüfkopfs H5M theoretisch $\lambda = 200 \mu\text{m}$ (vgl. Gleichung 3.1). Die tatsächliche Wellenlänge im Material ist jedoch wegen des Effekts der Frequenzverschiebung auf Grund der Frequenzabhängigkeit der Dämpfung erhöht. Durch Untersuchungen, welche in Abschnitt 6.1.3 beschrieben werden, ergibt sich eine im Messbereich von 10 mm bis 35 mm durchschnittlichen Frequenz von 2,6 MHz und somit eine Wellenlänge von $\lambda = 384 \mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 6-16). Die nach der Gleichung 5.1 aus den Ergebnissen der Scheibenreflektoren theoretischen Echoamplituden der Kugelreflektoren mit und ohne Berücksichtigung der Frequenzverschiebung sind in Abbildung 5-11 dargestellt.

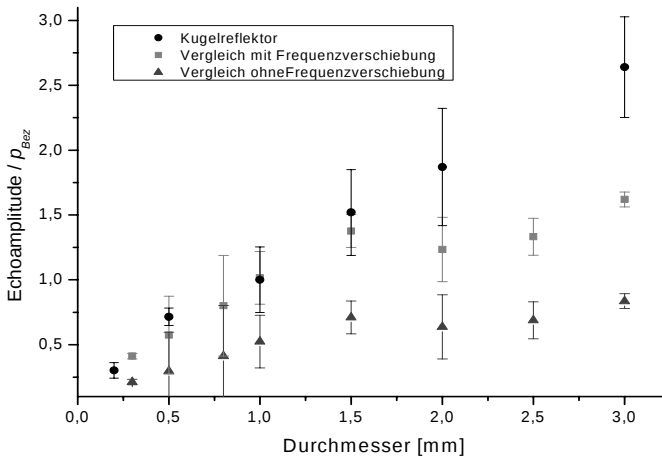


Abbildung 5-11: Vergleich der gemessenen Echoamplituden von Kugelreflektoren mit theoretisch aus den gemessenen Amplituden der Scheibenreflektoren ermittelten Amplituden

Die Echoamplituden mit Berücksichtigung der Frequenzverschiebung liegen bis zu einem Durchmesser von 2,5 mm im Bereich der durch die Messung ermittelten Echoamplituden für Kugelreflektoren, wodurch die Plausibilität der Messergebnisse gezeigt ist. Die Abweichungen bei größeren Durchmessern lassen sich dadurch erklären, dass mit zunehmender Größe der Reflektor immer weniger als „klein“ klassifiziert werden kann, da seine Größe in den Bereich des Durchmessers des Schallbündels wächst (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Dadurch, dass die Echoamplituden für eine Kugel und eine Kreisscheibe auf Grund der geringen Wellenlänge in Silikon verglichen mit anderen Feststoffen derart weit auseinanderliegen, ist eine Mindestgrößenabschätzung nur begrenzt einsetzbar. Das Ermitteln einer bezogenen Echoamplitude beispielsweise von $1,5 \cdot p_{Bez}$ einer unbekannten Fehlstelle führt nach Abbildung 5-10 zur Aussage, dass wahrscheinlich eine kugelförmige Fehlstelle mit einem Durchmesser von 2,2 mm vorliegt, mindestens hat die Fehlstelle jedoch einen Durchmesser von 450 μm .

Ein relevanter Einfluss bei der Fehlergrößenermittlung mittels eines Amplitudenverfahrens ist stets, dass auf Grund der Unkenntnis des Fehlstellenmaterials nicht der richtige Reflexionsfaktor verwendet werden kann. Ein relativer Fehler bei der Verwendung des Betrags des Reflexionsfaktors bezüglich zum Wert 1 führt auf Grund der Gleichungen 3.6 und 3.22 zum gleichen relativen Fehler bei der Größenbestimmung eines kugelförmigen Reflektors. Dies führt bei den durchgeführten Untersuchungen insbesondere bei Kunststoffeinschlüssen zu einem relevanten Fehler, da wegen der Ähnlichkeit der Schallimpedanzen der Betrag des Reflexionsfaktors gemäß Gleichung 3.7 deutlich geringer als 1 ist. Somit werden Fehlstellen aus Kunststoff grundsätzlich kleiner bewertet, als sie physikalisch sind. Die Relevanz des Effekts der zu geringen Fehlergrößenbestimmung von schwach leitfähigem Kunststoff wird dadurch zumindest abgemildert, dass das Schädigungspotenzial dieser Materialien gegenüber dem von Metallen in der Regel vermindert ist (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Abhängigkeit vom verwendeten Material und von der Temperatur

Es wird untersucht, welchen Einfluss eine Änderung des Materials und der Temperatur auf das Bewertungsverfahren ausüben. Wie beschrieben ist die Vergleichskörpermethode vorteilhaft, wenn Vergleichskörper verwendet werden, welche dem realen Betriebsmittel in Material und Formgebung weitestgehend ähneln und bei vorgegebenen äußeren Bedingung wie der Temperatur

vermessen werden, so dass der Einfluss dieser Parameter gering ist. Nachteilig ist allerdings, dass eine gesicherte Aussage der Fehlerbewertung bei einem Abweichen von diesen Parametern nicht ohne weiteres gegeben ist, so dass der Einfluss auf den Bewertungsprozess untersucht wird.

Als Materialien werden die in Abschnitt 4.2.1 vorgestellten Silikonelastomere verwendet. Die Materialien sollen hinsichtlich der Schallgeschwindigkeit und Dämpfung miteinander verglichen werden, da diese Größen, wie im Folgenden erläutert, die Größenbestimmung beeinflussen. Die Abhängigkeit dieser Größen von der Temperatur wird im Temperaturbereich von 15°C bis 40°C untersucht. Dieser Bereich ist relevant, weil der Vernetzungsprozess der Elastomere bei erhöhter Temperatur vollzogen wird (vgl. Abschnitt 2.1.1). Durch die Betrachtung der Abhängigkeit von der Temperatur kann somit untersucht werden, ob eine unmittelbar nach der Herstellung durchgeführte Ultraschallmessung am noch erwärmten Betriebsmittel durchgeführt werden kann oder ob das Betriebsmittel auf Raumtemperatur abgekühlt sein sollte.

Aus jedem Silikonelastomer werden Prüfkörper gleicher Geometrie hergestellt. Damit sich die Messungen an den Prüfkörpern vergleichen lassen, wird für die unterschiedlichen Materialien dieselbe Gießform verwendet. Die Materialeigenschaften der untersuchten Elastomere sind in Abschnitt 4.2.1 angegeben. Bei den Messungen wird der in Abbildung 5-12 dargestellte Messaufbau verwendet, wobei die Temperatur mit einem Durchlauftemperaturregler schrittweise erhöht wurde.

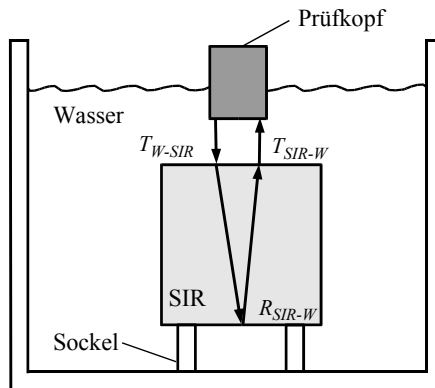


Abbildung 5-12: Messaufbau zur Bestimmung der Materialeigenschaften

Schallgeschwindigkeit

Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit ist nicht nur für laufzeitbasierte Verfahren, sondern auch für amplitudenbasierte relevant, weil nur bei Kenntnis der Schallgeschwindigkeit die Tiefenlage des Reflektors zuverlässig bestimmt werden kann, so dass eine Entdämpfung der Echoamplituden möglich ist. Die Schallgeschwindigkeit der Silikonelastomere kann bei bekannter Prüfkörperdicke aus der Laufzeit der an der Rückwand der Prüfkörper reflektierten Ultraschall-Impulse bestimmt werden. Die Ergebnisse der Messungen der Schallgeschwindigkeit über der Temperatur sind in Abbildung 5-13 dargestellt. Eine während der Temperaturerhöhung auftretende geringe Ausdehnung des Materials ist experimentell berücksichtigt, so dass die dargestellten Ergebnisse die Materialgrößen angeben.

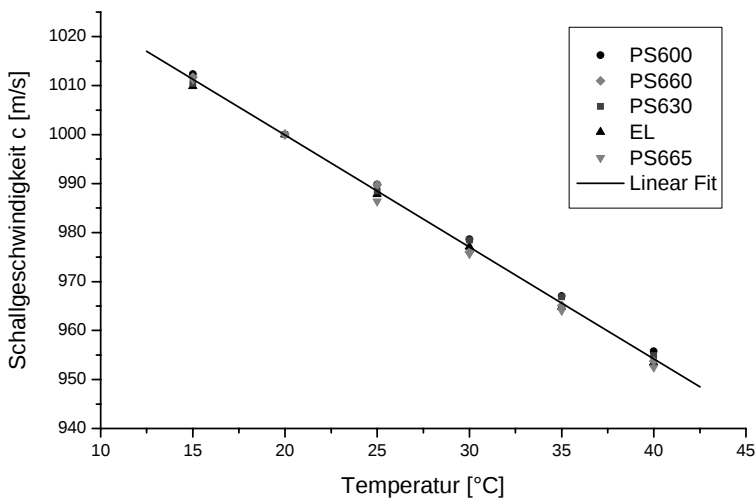


Abbildung 5-13: Schallgeschwindigkeit verschiedener Silikonelastomere über der Temperatur

Es ist zum einen ersichtlich, dass eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit bei zunehmender Temperatur vorliegt, welches ein bei Kunststoffen erwartungsgemäßes Verhalten darstellt (vgl. Abschnitt 3.1.1). Der Verlauf kann

linear angenähert werden, wobei sich eine moderate Abnahme der Schallgeschwindigkeit von 2,3 m/s je Grad Temperaturerhöhung ergibt. Zum anderen wird deutlich, dass sich die Schallgeschwindigkeit der Silikonelastomere nicht signifikant voneinander unterscheidet. Wegen der annähernd gleichen Dichte der Silikonelastomere (vgl. Tabelle 4-1) kann somit über Gleichung 3.2 auf ein annähernd gleiches Elastizitätsmodul geschlossen werden.

Wird die Temperatur nicht bei der Größenbestimmung berücksichtigt, so ergibt sich ein Fehler, da auf Grund der fehlerhaft bestimmten Fehlstellentiefe die Entdämpfung nicht korrekt durchgeführt wird. Wenn beispielsweise ein Prüfkörper nicht bei Raumtemperatur sondern bei einer Temperatur von 40°C untersucht wird, so ergibt sich für eine Fehlstelle, welche sich in 30 mm Tiefe befindet, ein relativer Fehler von 12,8% bei der Größenbestimmung der kugelförmigen Ersatzreflektorgröße. Die Fehlerrechnung zu dieser Thematik ist im Anhang A ausführlich erläutert.

Durch die Änderung der Schallgeschwindigkeit ergibt sich nach Gleichung 3.4 auch eine Änderung der Schallimpedanz Z , welche den Reflexionsfaktor an der Fehlstelle mitbestimmt. Auf Grund des großen Unterschieds der Schallimpedanzen von SIR verglichen mit anderen Feststoffen bzw. mit Luft (vgl. Tabelle 4-2) führt eine Änderung der Schallimpedanz auf Grund einer Temperaturschwankung im betrachteten Temperaturbereich zu einer vernachlässigbaren Änderung des Reflexionsfaktors, so dass nur ein unerheblicher Einfluss auf die Fehlergrößenbestimmung vorliegt.

Schwächung

Zur Untersuchung der Schallschwächung der Elastomere werden die Rückwandamplituden der bis auf das Material gleichartigen Prüfkörper ausgewertet. Die gemessenen Echoamplituden der Rückwand bei ansteigender Temperatur sind in Abbildung 5-14 dargestellt.

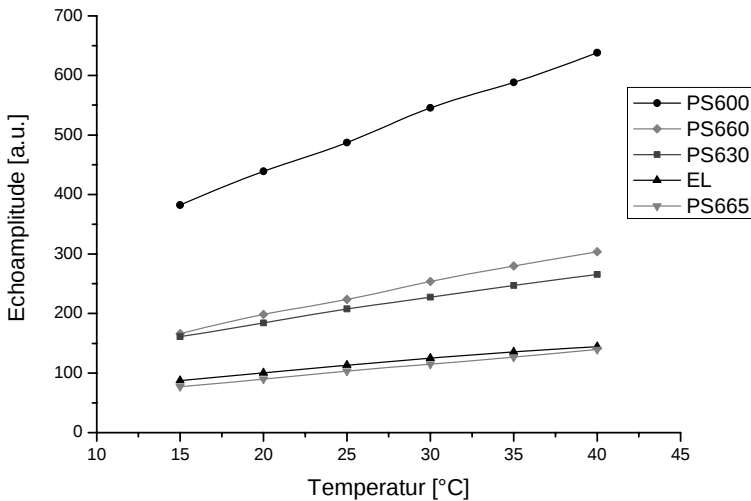


Abbildung 5-14: Gemessene Rückwandamplitude über der Temperatur

Es wird überraschenderweise eine erhöhte Rückwandamplitude bei steigender Temperatur festgestellt, wohingegen die Literatur bei Polymeren eine Zunahme der Dämpfung bei steigender Temperatur voraussagt (vgl. Abschnitt 3.1.3). Es stellt sich jedoch heraus, dass dieser Effekt hauptsächlich durch die Änderungen der Reflexions- und Transmissionsfaktoren T_{W-SIR} , R_{SIR-W} und T_{SIR-W} auf Grund der geänderten Schallgeschwindigkeit und Dichte des Wassers und der Silikonelastomere verursacht wird. Wenn die Änderung dieser Faktoren berücksichtigt wird, ergeben sich die in Abbildung 5-15 dargestellten, von den temperaturabhängigen Reflexions- und Transmissionsfaktoren bereinigten Kurven, welche zudem auf die Echoamplitude von PS600 bei 25°C normiert sind.

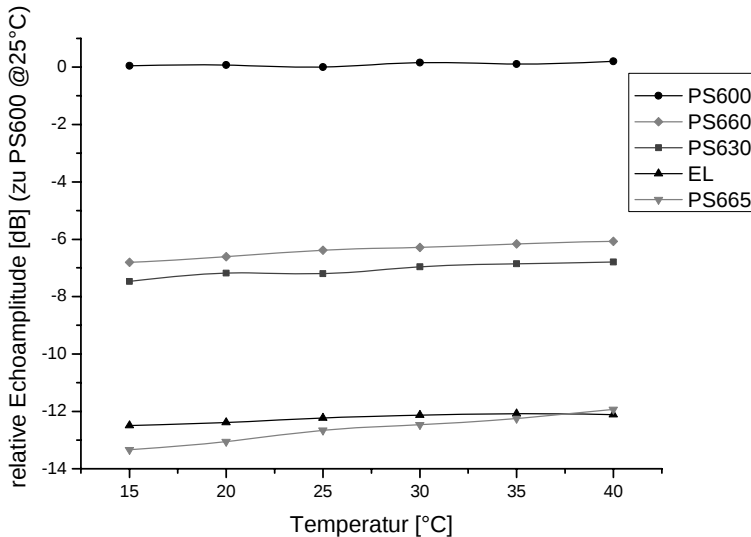


Abbildung 5-15: Von Grenzflächeneffekten bereinigtes Diagramm 5-14

Es wird aus diesem angepassten Diagramm zum einen ersichtlich, dass das Material an sich keine nennenswerte Temperaturabhängigkeit der Dämpfung aufweist. Dies ist im Einklang mit der bei Silikonelastomeren auftretenden Beibehaltung der elektrischen und chemischen Eigenschaften in einem weiten Temperaturbereich (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Zum anderen wird deutlich, dass die Materialien sich signifikant voneinander unterscheiden. Es wird angenommen, dass die Shore-Härte mit dem Verhalten der Schallschwächung einhergeht, weil (mit Ausnahme des PS660) die in Abbildung 5-15 gezeigte Reihenfolge der Materialien mit der Reihenfolge der Shore-Härten übereinstimmt. Auffällig ist ebenfalls, dass das Material PS600 als einziges RTV-2 der Messreihe die geringste Schwächung zeigt.

Die Untersuchungen zeigen, dass hinsichtlich der Fehlergrößenbestimmung ein Austausch des Materials zu signifikant unterschiedlichen Ergebnissen führt, wenn die unterschiedliche Dämpfung nicht berücksichtigt wird. Eine Änderung beispielsweise von -12 dB der gemessenen Echoamplitude einer kugelförmigen Fehlstelle führt dazu, dass nur ein Viertel der kugelförmigen

Ersatzreflektorgröße ermittelt wird. Um das Verfahren in der Praxis anzuwenden, ist es somit vorteilhaft, für einen zu untersuchenden Isolierstoff entsprechende Vergleichskörper herzustellen und zu vermessen.

5.2.3 Winkelprüfverfahren

Mit der Vergleichskörpermethode ist es möglich, eine Aussage über die Größe einer Fehlstelle zu treffen. Neben der Größenbestimmung ist sind auch Informationen über die Geometrie und Orientierung der Fehlstelle von Interesse. Diese können über Winkelverfahren gewonnen werden, wobei hier das Verfahren der Dynamik der Reflektivität über dem Einschallwinkel näher betrachtet wird (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Berücksichtigung der Grenzfläche

Bei der Anwendung eines Winkelprüfverfahrens treten Neben-Effekte auf, welche bei der Untersuchung des Verfahrens berücksichtigt werden müssen. Zum einen wird die Schallwelle an der Grenzfläche gebrochen, so dass der Einschallwinkel nicht gleich dem Winkel ist, welcher eine im Material vorhandene Fehlstelle trifft (vgl. Gleichung 3.8). Zum anderen ist die Echodurchlässigkeit an der Grenzfläche Wasser-SIR vom Winkel abhängig (vgl. Abschnitt 3.1.2). Die Kenntnis der beiden Effekte ist Voraussetzung für die Anwendung eines amplitudenbasierten Winkelprüfverfahrens, weswegen diese experimentell untersucht werden.

Brechung

Für die Ermittlung der Brechung an der Grenzfläche Wasser/Silikon werden Metallplatten (Fläche: $8 \times 8 \text{ mm}^2$) unter definierten Winkeln zur Prüflingsoberfläche in gleicher Tiefe $s = 20 \text{ mm}$ in Silikon (PS600) eingegossen (Abbildung 5-16). Die Platten sind an einer Stahlnadel befestigt, die als Referenz für die Tiefe bei den einzelnen Messungen dient. Es werden dabei folgende Plattenwinkel β gewählt: $\beta \in \{5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ\}$.

Die Prüfkörper werden gemäß Abbildung 5-16 rechts jeweils mittels der Ultraschall-Tauchtechnik vermessen (Prüfkopf H5M). Jeder Prüfkörper wird dabei unter verschiedenen Winkeln vermessen und das Maximums jedes C-Scans ermittelt. Werden diese Maxima über dem Einschallwinkel aufgetragen, so ergibt sich eine glockenförmige Kurve. Exemplarisch ist eine solche Kurve für einen Prüfkörper, welcher eine Platte unter einem Winkel von 10° enthält, in Abbildung 5-17 dargestellt.

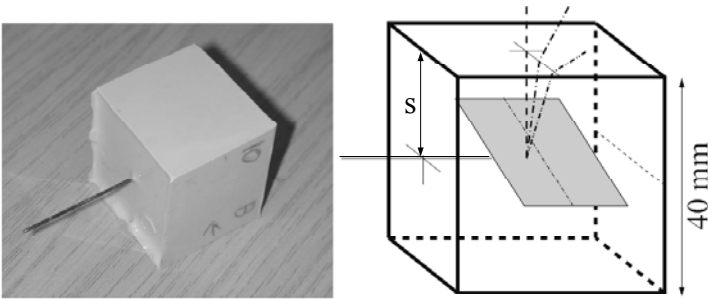


Abbildung 5-16: Prüfkörper zur Bestimmung der Brechung

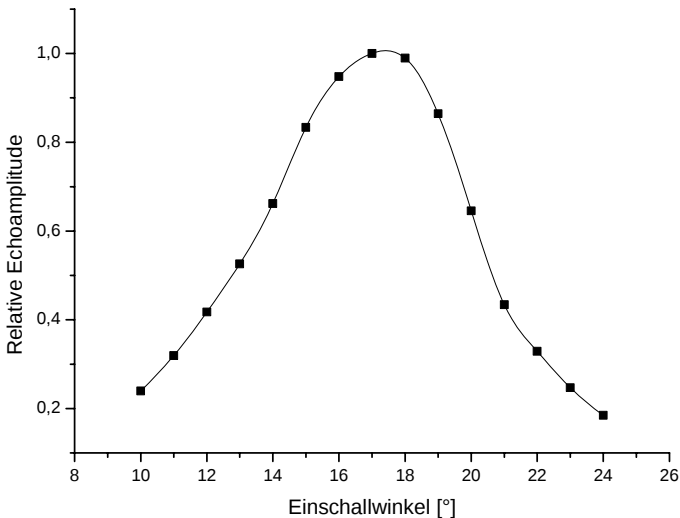


Abbildung 5-17: Amplituden-Winkeldiagramm bei Beschallung einer um 10° geneigten Fläche

Der Einschallwinkel, bei dem das Maximum auftritt, liegt auf Grund der Brechung bei 17°. Dieser Winkel, unter dem das Maximum gemessen wird, liegt dann vor, wenn der Schall die Platte im Material senkrecht trifft, so dass aus der Messkurve die Brechung ermittelt werden kann.

In der Abbildung 5-18 ist die durch Messungen ermittelte Brechung zusammen mit der nach dem Brechungsgesetz gemäß Gleichung 3.8 aus den Schallgeschwindigkeiten errechneten Brechung dargestellt.

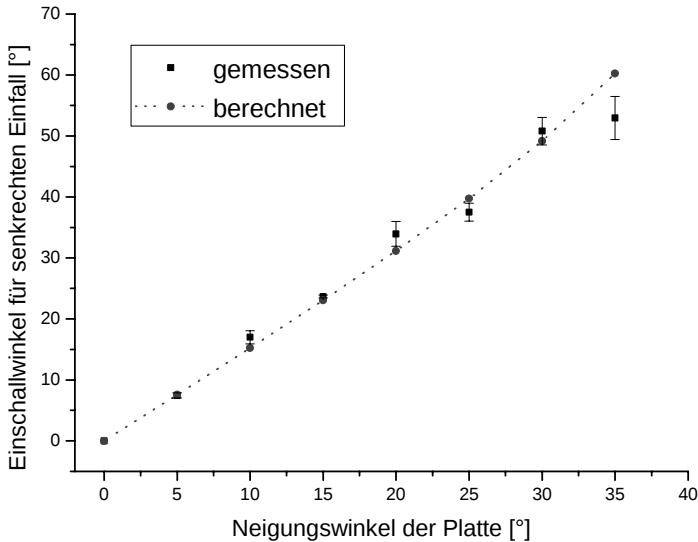


Abbildung 5-18: Gemessene und berechnete Brechung an der Grenzfläche Wasser-SIR

Die eingestellten Einschallwinkel liegen im Bereich der errechneten Winkel für senkrechten Einfall auf die Plattenoberfläche. Bei größeren Plattenwinkeln zeigt sich ein zunehmender Fehler, da die Einkopplung des Schalls auf Grund des großen Einschallwinkels in höherem Maße von der Ausrichtung und der Oberflächenbeschaffenheit abhängt. Insgesamt zeigt sich eine gute Annäherung der Messergebnisse an das Brechungsgesetz.

Winkelabhängigkeit der Echodurchlässigkeit

Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Echodurchlässigkeit der Grenzfläche Wasser-Silikon vom Einschallwinkel wird der in Abbildung 5-19 dargestellte Prüfkörper verwendet. Der Prüfkopf wird über dem Halbzylinder aus Silikon unter verschiedenen Winkeln bewegt. Weil sowohl die Reflexion an der Rückwand stets senkrecht erfolgt als auch der im Silikon zurückgelegte Weg

und somit die Dämpfung sowie die Lage der Rückwand als Reflektor im Schallfeld des Prüfkopfs konstant ist, hängt die Änderung der gemessenen Amplitude bei unterschiedlichen Einschallwinkeln nur noch von der Echodurchlässigkeit ab.

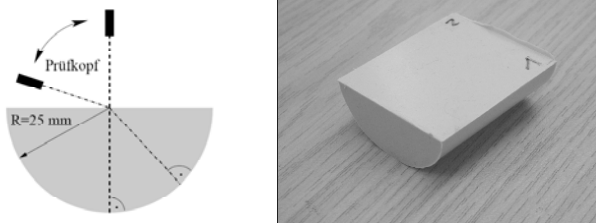


Abbildung 5-19: Prüfkörper zur Bestimmung der Echodurchlässigkeit

Abbildung 5-20 zeigt die gemessenen, mit dem Einschallwinkel abnehmenden Rückwandamplituden, welche aus den dargelegten Gründen ein Maß für die Echodurchlässigkeit darstellen.

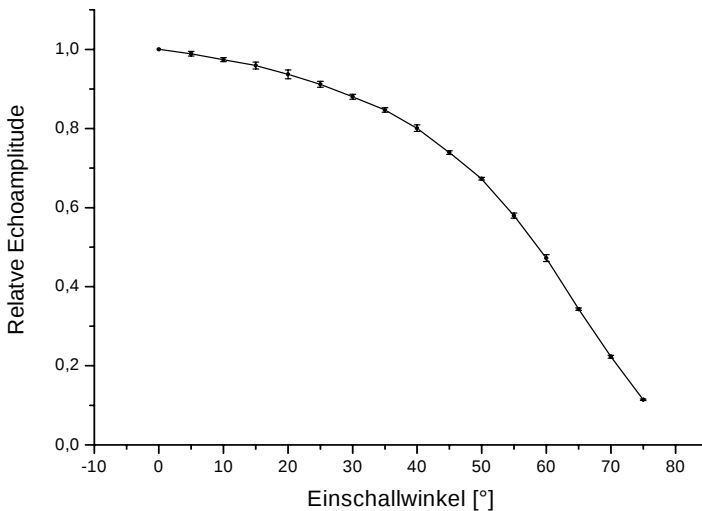


Abbildung 5-20: Echodurchlässigkeit der Grenzfläche Wasser-SIR über dem Einschallwinkel

Dynamik der Reflektivität über dem Einschallwinkel

Es wird untersucht, ob mit dem Verfahren der Dynamik der Reflektivität über dem Einschallwinkel eine Aussage über die Geometrie und die Orientierung einer detektierten Fehlstelle in Silikon getroffen werden kann. Hierzu wird unter verschiedenen Winkeln ein C-Scan der Fehlstelle aufgenommen. Der C-Scan wird zur Vermeidung von „Ausreißern“ mittelwertgefiltert und die maximale Echoamplitude wird ausgewertet. Werden diese maximalen Echoamplituden über dem Messwinkel aufgetragen, so erhält man ein Diagramm der Dynamik der Reflektivität. Bei der Erstellung der im Folgenden dargestellten Diagramme werden verschiedene, bereits beschriebene Einflüsse berücksichtigt:

- Die Abhängigkeit der Echodurchlässigkeit der Grenzfläche Wasser-SIR vom Einschallwinkel führt dazu, dass die Echoamplitude einer bei einem größeren Winkel beschallten Fehlstelle verringert ist. Die in Abbildung 5-20 dargestellte Kurve wird zur Umrechnung der Messwerte verwendet.
- Durch die winklige Beschallung ergibt sich sowohl im Wasser als auch im Silikon eine verlängerte Laufstrecke. Dadurch sind die bei größeren Winkeln aufgenommen Messwerte stärker gedämpft. Ferner liegen sie an einer verschobenen Position im Schallfeld. Aus diesen Gründen werden die Messwerte in Abhängigkeit vom Einschallwinkel, der Tiefenlage des Reflektors und der Höhe des Prüfkopfs über der Prüfkörperoberfläche gemäß der in Abschnitt 5.2.2 ermittelten Dämpfung umgerechnet.
- An der Oberfläche des Silikonelastomers wird der Schall gebrochen, so dass er die Fehlstelle nicht unter dem Einschallwinkel sondern unter dem gebrochenen Winkel trifft, der im Folgenden als effektiver Einschallwinkel bezeichnet wird. Die Winkel-Achsen der folgenden Reflektivitäts-Diagramme sind gemäß der in Abbildung 5-18 dargestellten gemessenen Kurve der Brechung skaliert.

Um die zum Teil großen Unterschiede der Echoamplituden besser darzustellen, wird eine Skalierung der Echoamplituden in Dezibel verwendet, wobei diese auf den höchsten Wert einer Messreihe normiert sind.

Flächige Reflektoren

Zunächst werden flächige Fehlstellen untersucht. Hierzu werden die in Abbildung 5-16 gezeigten Prüfkörper verwendet. Die Abbildung 5-21 zeigt beispielhaft das Reflektivitäts-Diagramm für eine um 15° geneigte Platte in

Silikon in einer Tiefe von 20 mm. Die Platte hat eine Größe von $8 \times 8 \text{ mm}^2$ und ist somit größer als die Schallbündelbreite.

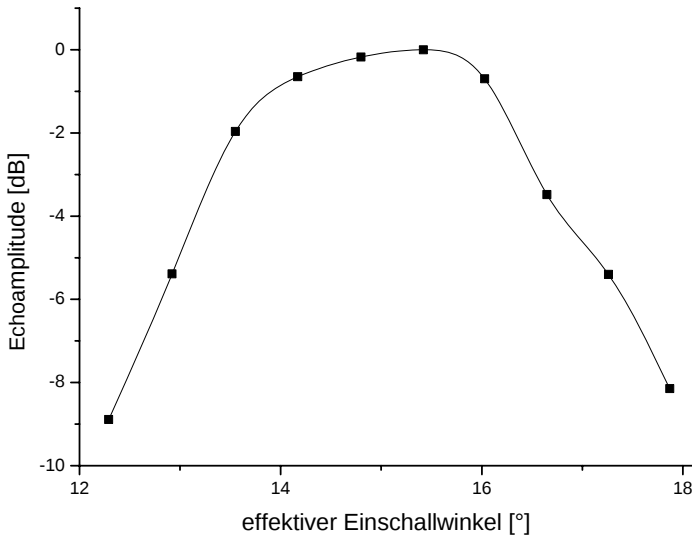


Abbildung 5-21: Amplituden-Winkel-Diagramm einer um 15° geneigten Platte ($8 \times 8 \text{ mm}^2$)

Das Diagramm zeigt erwartungsgemäß ein ausgeprägtes Maximum bei $15,4^\circ$. Bereits bei einer Veränderung von wenigen Grad nimmt die Echoamplitude deutlich ab. Dieses Verhalten tritt bei allen untersuchten Platten dieser Größe auf.

Weil in der Praxis keine derart großen flächigen Fehlstellen zu erwarten sind, wird untersucht, welches Verhalten Platten mit deutlich kleinerer Größe zeigen. Aus diesem Grund werden Platten mit einer Größe von $1,8 \times 2 \text{ mm}^2$ untersucht. Die Abbildung 5-22 zeigt beispielhaft die Reflektivitäts-Diagramme zweier um 0° bzw. 13° geneigten Platten.

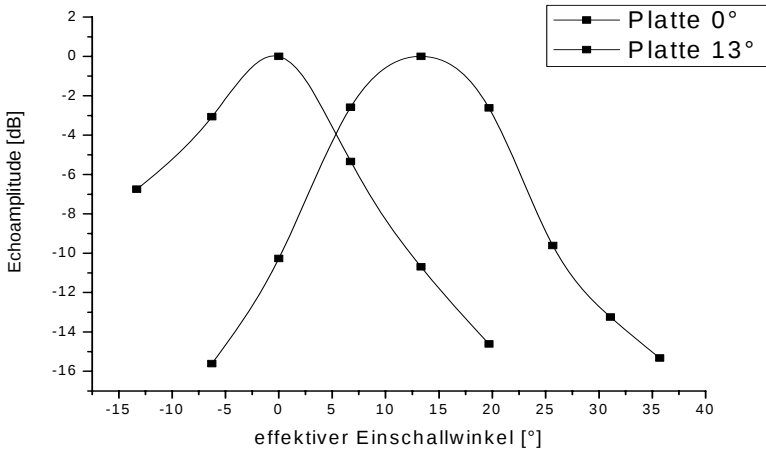


Abbildung 5-22: Amplituden-Winkel-Diagramm zweier Flächen (1,8 x 2 mm²)

Auf Grund von Randeffekten der Platten, welche u.a. aus überlagernden, von den Kanten der Platte ausgehenden Beugungswellen resultieren, weist das Reflektivitäts-Diagramm eine verglichen mit der Abbildung 5-21 deutlich breitere Glockenform auf, wobei sich allerdings das ausgeprägte Maximum des Diagramms wiederholt.

Die Untersuchungen an flächigen Reflektoren zeigen somit, dass diese eine ausgeprägte Dynamik der Reflektivität über dem Einschallwinkel aufweisen. Einen Abfall um 6 dB bezüglich zum jeweiligen Maximum zeigen größere Platten bereits bei einer Abweichung von $\pm (2,6 \pm 0,3)^\circ$, kleinere Platten bei einer Abweichung von $\pm (9,1 \pm 2,1)^\circ$. Ferner lässt sich durch die Bestimmung des Maximums die Vorzugsrichtung eines flächigen Reflektors ermitteln.

Kugelförmige Reflektoren

Bei kugelförmigen Reflektoren ist zu erwarten, dass diese keine ausgeprägte Dynamik der Reflektivität über dem Winkel aufweisen. Dies wird durch Untersuchungen bestätigt. Die Abbildung 5-23 zeigt beispielhaft die Reflektivitäts-Diagramme für Glaskugeln mit 1,9 mm bzw. 1,0 mm Durchmesser in Silikon in einer Tiefe von 22,2 mm bzw. 13,2 mm. Die Kugeln sind jeweils in zwei senkrecht zueinander stehenden Schwenkebenen vermessen, so dass sich für jede Kugel zwei Kurven ergeben.

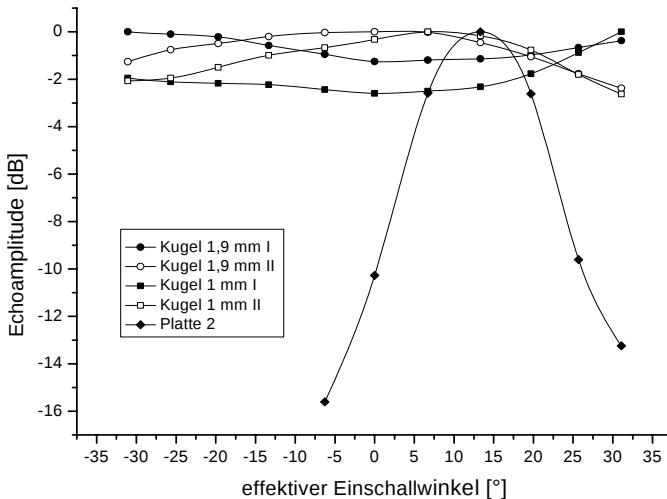


Abbildung 5-23: Vergleich flächiger mit kugelförmigen Reflektoren

Die Reflektivität der Kugeln zeigen einen annähernd konstanten Verlauf. Bei keiner der Messungen verändert sich die Amplitude mehr als 3 dB bezüglich zum jeweiligen Maximum. Diese Schwankungen können in der Reihe von Einzeleinflüssen wie den Grenzflächeneffekten begründet liegen, welche jeweils durch fehlerbehaftete Messungen untersucht worden sind (s.o.). In der Abbildung 5-23 ist zum Vergleich zusätzlich das Diagramm der Platte aus Abbildung 5-22 dargestellt, welche eine vergleichbare Größe ($1,8 \times 2 \text{ mm}^2$) aufweist. Durch den Vergleich wird deutlich, dass die geometrischen Extremfälle – auf der einen Seite kugelförmige Fehlstellen und auf der anderen Seite flächigen Fehlstellen – gut voneinander unterschieden werden können.

Ellipsoidförmige Reflektoren

Ellipsoidförmige Reflektoren weisen sowohl eher flächige als auch eher kugelförmige Abschnitte auf. Es soll untersucht werden, ob die Geometrie und Orientierung eines Ellipsoiden mittels des vorgestellten Verfahrens bestimmbar ist. Um die prinzipielle Anwendbarkeit zu zeigen, werden zunächst Untersuchungen in Wasser durchgeführt. Somit spielen die Einflüsse des Silikons und der Grenzfläche Wasser-Silikon keine Rolle. Ferner ist die Ausrichtbar-

keit der Reflektoren optisch überprüfbar. Als Reflektoren werden Ellipsoide aus Aluminium mit einer Länge der Hauptachse von 2 mm und der Nebenachse von 1 mm verwendet (Abbildung 5-24, rechts). Diese werden in den drei in Abbildung 5-24 links dargestellten Schwenkebenenrichtungen beschallt.

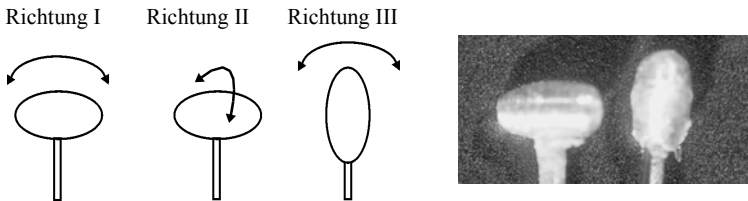


Abbildung 5-24: Untersuchte Ellipsoide

Die Abbildung 5-25 zeigt die Reflektivitäts-Diagramme von drei vermessenen Ellipsoiden (Ellipsoid_1, Ellipsoid_2 und Ellipsoid_3), wobei die ersten beiden gemäß Richtung I und II und der dritte gemäß Richtung III beschallt werden. Zum Vergleich ist zusätzlich die Kurve einer Kugel mit 2 mm Durchmesser dargestellt.

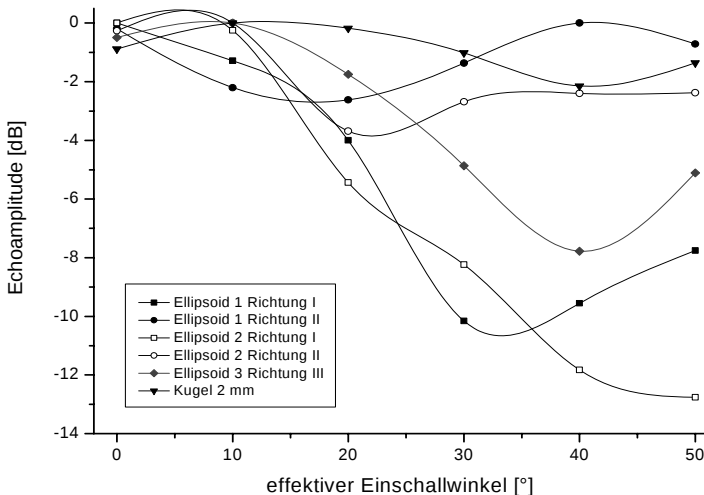


Abbildung 5-25: Reflektivität von ellipsoidförmigen Reflektoren in Wasser

Die Kurve der Kugel zeigt einen ähnlich konstanten Verlauf wie die in Silikon vermessenen Kugeln in Abbildung 5-23. Auch die in Richtung II vermessenen Ellipsoide zeigen einen vergleichbaren Verlauf. Es werden keine Amplituden ermittelt, die um mehr als 4 dB bezüglich des jeweiligen Maximums abnehmen. Dies ist erwartungsgemäß, da in dieser Richtung keine Änderung der geometrischen Reflektivität der Ellipsoiden vorliegt. In den Richtungen I und III zeigt sich ein deutlich absteigender Verlauf der Reflektivität, wobei Änderungen der Amplituden in Richtung I von mehr als 10 dB bezüglich des jeweiligen Maximums ermittelt werden. Auch dies ist erwartungsgemäß, da sich die Ellipsoide in dieser Richtung flächig verhalten.

Die Untersuchungen werden ebenfalls in Silikon durchgeführt. Hierzu werden Ellipsoide aus Glas verwendet (Ellipsoid_1: 1,41 zu 1,19 mm; Ellipsoid_2: 1,76 zu 1,35 mm). Die Reflektivitäts-Diagramme der Ellipsoiden sind in Abbildung 5-26 dargestellt.

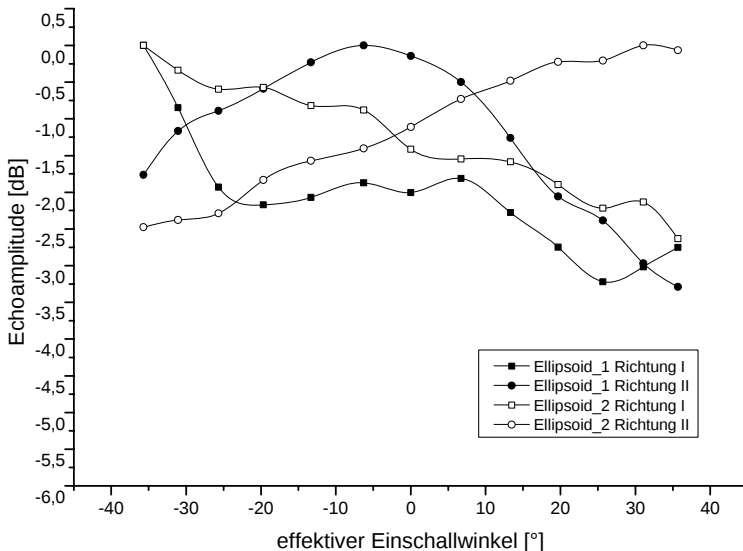


Abbildung 5-26: Reflektivität von ellipsoidförmigen Reflektoren in SIR

Die Kurven zeigen kein erwartungsgemäßes Verhalten. Es treten keine Werte auf, die um mehr als 3,5 dB vom jeweiligen Maximum abweichen. Im Vergleich liegen diese Werte somit im ähnlich engen Bereich wie die Werte der Kugeln aus Abbildung 5-23. Aus diesem Grund ist kein Kriterium für eine Unterscheidung der Ausrichtung des Ellipsoiden erkennbar. Untersuchungen an kleineren Ellipsoiden führen zu vergleichbaren Ergebnissen. Ein Grund für dieses Ergebnis liegt darin, dass die Winkel im Silikon wegen der auftretenden Brechung deutlich geringer sind als in Wasser. So sind in Wasser Untersuchungen von bis zu 60° problemlos möglich. In Silikon werden allerdings keine Winkel erreicht, die größer als 35° sind.

Zusammengefasst ist es mit der Untersuchung der Dynamik der Reflektivität über dem Winkel möglich, deutliche Unterschiede in der Fehlstellengeometrie, wie sie flächige Fehlstellen gegenüber kugelförmigen Fehlstellen aufweisen, zu erkennen. Bei geringer ausgeprägten Unterschieden, wie sie bei ellipsoidförmigen Fehlstellen vorliegen, ist das Auflösungsvermögen des Verfahrens nicht ausreichend, so dass eine Unterscheidung der Geometrie und Orientierung von diesen Fehlstellenformen nicht erreicht wird.

6 Diagnostik von Inhomogenitäten an Grenzflächen

Im voranstehenden Kapitel 5 wird die Diagnostik von singulären Inhomogenitäten im Isolierstoffvolumen untersucht. In Kapitel 6 werden nunmehr die in Isoliersystemen von Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik auftretenden Grenzflächen unterschiedlicher Art betrachtet (vgl. Abschnitt 2.1.2). Inhomogenitäten an Grenzflächen weisen zumeist ein großes Schädigungspotenzial auf, wodurch die Isolationsfähigkeit unmittelbar oder mittelbar beeinträchtigt werden kann (vgl. Abschnitt 2.2.2). In diesem Kapitel wird die Anwendbarkeit der Ultraschalldiagnostik für die Detektion von Delaminationen und Fehlstellen an Grenzflächen untersucht. Es wird auf Grund der Vielzahl der unterschiedlichen an realen Betriebsmitteln auftretenden Grenzflächen Wert darauf gelegt, die vorgestellten Untersuchungen unabhängig von einer konkreten Betriebsmittelgeometrie durchzuführen, damit die Möglichkeiten und Grenzen der betrachteten Detektionsverfahren aufgezeigt werden können.

6.1 Detektion und Evaluation von Delaminationen

In Abschnitt 2.2.2 wird dargelegt, dass offene Ablösungen an den Grenzflächen Epoxidharz-Metall, Silikonelastomer-Epoxidharz und Silikonelastomer-Metall ein Schädigungspotenzial für das Isoliersystem darstellen. Aus diesem Grund wird ein neu entwickeltes Ultraschall-Verfahren vorgestellt, mittels welchem zur Bewertung der Grenzfläche offene Ablösungen automatisiert detektierbar sind. Das Verfahren wird anhand einer Beispielkonfiguration vorgestellt, anschließend werden Einflussparameter auf die Detektierbarkeit von Ablösungen untersucht.

6.1.1 Verfahren zur automatisierten Grenzflächen-Bewertung

Das Verfahren verwendet einen Algorithmus, welcher darauf beruht, die Phasenlage von an den Grenzflächen reflektierten Ultraschall-Impulsen für die Bewertung zu analysieren. Die Reflexion von Ultraschall-Impulsen an einer

Material-Grenzfläche wird im Wesentlichen von dem sich aus den Schallimpedanzen (Z_1, Z_2) der Materialien nach Gleichung 3.7 ergebenden Reflexionsfaktor R bestimmt. Die untersuchten Grenzflächen EP-Metall, SIR-EP und SIR-Metall stellen im regulären Zustand allesamt schallharte Schallübergänge mit $R > 0$ dar. Wenn an der Grenzfläche eine offene Ablösung oder ein Riss auftritt, so befindet sich eine dünne Gasschicht zwischen den Materialien. Diese Gasschicht stellt für alle Feststoffe einen schallweichen Schallübergang mit $R < 0$ dar. Dies hat zur Folge, dass der Schallimpuls bei der Reflexion einen Phasensprung an der Grenzfläche erfährt. Die Abbildung 6-1 zeigt an der Grenzfläche eines Prüfkörpers aus SIR und EP aufgenommene Schallimpulse, die für die Detektion eines Phasensprungs im Gegensatz zu dem in Abbildung 3-1 rechts gezeigten A-Scan nicht gleichgerichtet werden.

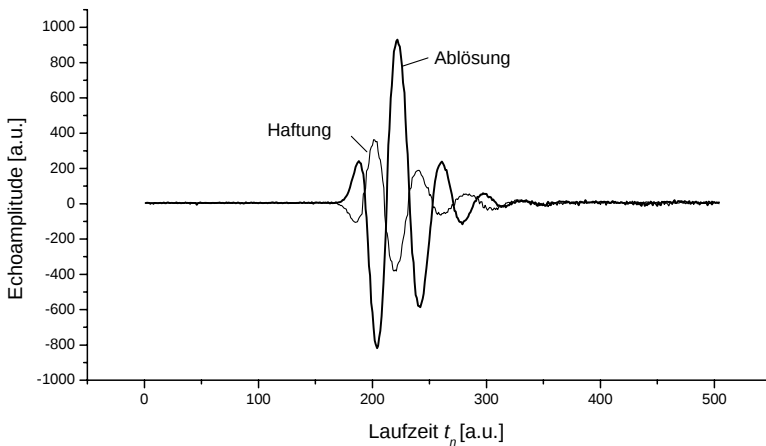


Abbildung 6-1: Auftretender Phasensprung durch Reflexion an einem haftenden (schallharten) und einem abgelösten (schallweichen) Bereich

Die Abbildung 6-1 zeigt zwei Schallimpulse, zum einen ein Echosignal in einem Bereich, an dem Haftung vorliegt, zum anderen in einem Bereich, an dem eine Ablösung vorliegt. Neben dem deutlich zu erkennenden Phasensprung liegt offenbar auch ein unterschiedlicher Betrag des Reflexionsfaktors vor. Grundsätzlich ließe sich eine Ablösung auch auf Grund des veränderten Betrages des Reflexionsfaktors detektieren. In der Tabelle 6-1 sind Reflexionsfaktoren für verschiedene Materialübergänge aufgeführt:

von	SIR	SIR	SIR	SIR	EP	EP
nach	EP	Stahl	Alum.	Luft	Kupfer	Luft
Reflexionsfaktor	0,38	0,96	0,88	-1	0,89	-1

Tabelle 6-1: Reflexionsfaktoren verschiedener Materialübergänge

Es wird deutlich, dass sich der Betrag des Reflexionsfaktors nicht immer signifikant unterscheidet, besonders bei Übergängen nach Metallen ergeben sich häufig Werte nahe +1, so dass eine Detektion anhand der Schalldruckamplitude nicht möglich ist. Aber auch ohne dies ist ein von der Echoamplitude unabhängiges Verfahren vorteilhaft, weil somit Einflüsse, welche auf die Amplitude wirken, die Detektion nicht beeinträchtigen können. Solche Einflüsse sind beispielsweise Schallankoppelbedingungen, Einschallwinkel, Oberflächen- und Grenzflächenunregelmäßigkeiten sowie Materialinhomogenitäten, wie z.B. eine unvollständige Vernetzung, welche zu einer lokal unterschiedlichen Dämpfung führen kann.

Um eine Ablösung von einer regulären Grenzfläche zu unterscheiden, wird ein automatisiertes Verfahren entwickelt, welches die normierte Impulskorrelationsfunktion nach Gleichung 3.18 verwendet. Die Anwendung dieser Funktion auf zwei Signale, welche bei gleicher Konfiguration beide an einer regulären Grenzfläche reflektiert werden, sollte ein Korrelationssignal ergeben, welches idealisiert ein Maximum mit dem Wert +1 aufweist. Die Abbildung 6-2a zeigt einen Impuls, welcher an einer schallharten Grenzfläche reflektiert wurde. In Abbildung 6-2b ist die zugehörige Autokorrelationsfunktion über der diskreten Verschiebungsvariablen τ_m dargestellt. Es wird ersichtlich, dass ein Maximum mit dem Wert +1 besteht, wenn die Signale übereinander liegen ($\tau_m = 0$). Die Nebenmaxima entstehen auf Grund der Wellenform des Impulses. Abbildung 6-2c zeigt einen Impuls, welcher bei identischer Konfiguration am gleichen Prüfkörper, jedoch an anderer Stelle aufgenommen wurde. Die in Abbildung 6-2d dargestellte Impulskorrelationsfunktion für diesen Impuls, korreliert mit dem ersten Impuls, hat einen ähnlichen Verlauf wie die Autokorrelationsfunktion in Abbildung 6-2b. Als der betragsmäßig maximale, vorzeichenrichtige Wert, im Folgenden Maximal-Korrelationskoeffizient ρ genannt, wird der Wert +0,9923 erreicht, welcher dem Wert +1 sehr nahe kommt. Bei der Impulskorrelationsfunktion hat eine Verschiebung des Impulses auf der Zeit-Achse nur eine Verschiebung der Funktion, nicht aber eine Veränderung des Verlaufs zur Folge.

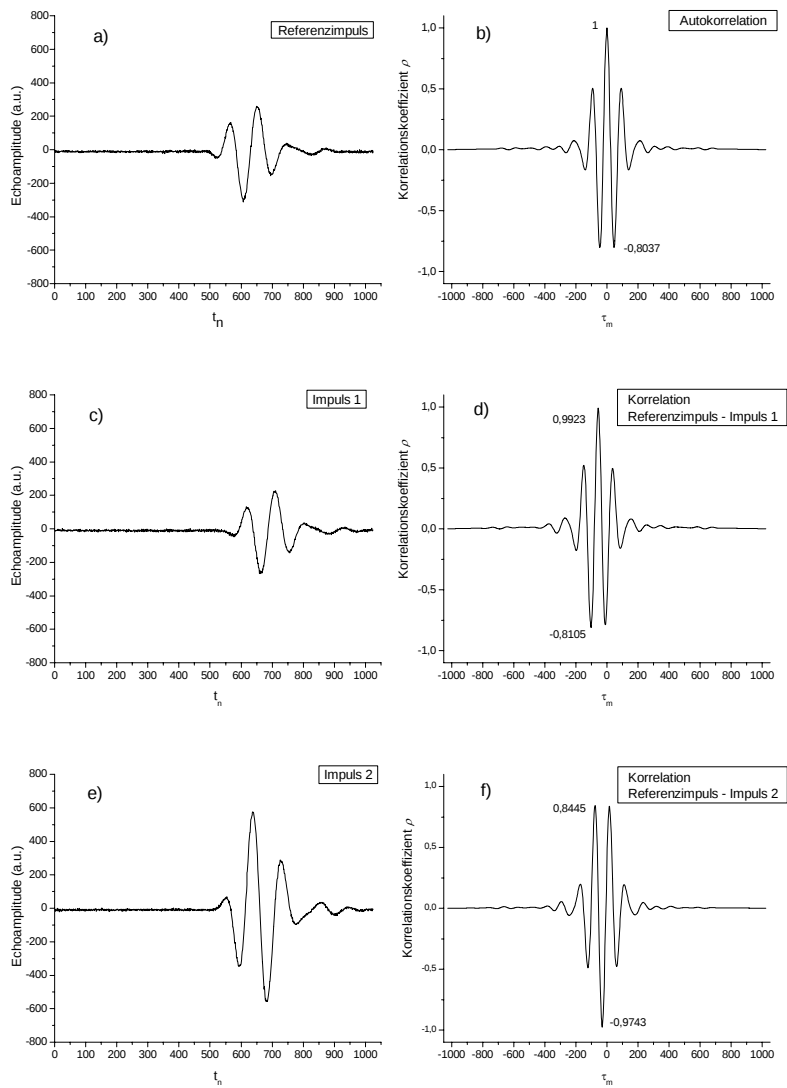


Abbildung 6-2: Ergebnis der Korrelation verschiedener Impulse

Im Idealfall tritt bei einem Ultraschall-Impuls, welcher an einer abgelösten Grenzfläche reflektiert wird, im Vergleich zu einem Impuls, welcher an einer regulären Grenzfläche reflektiert wird, neben einer Veränderung der Amplitude nur ein Phasensprung (Spiegelung an der Zeit-Achse) auf. Die Abbildung 6-2e zeigt beispielhaft einen solchen Impuls. Die Impulskorrelationsfunktion für diesen Impuls mit dem Impuls aus Abbildung 6-2a ergibt den in Abbildung 6-2f dargestellten Verlauf. Der Maximal-Korrelationskoeffizient hat nunmehr den Wert $-0,9744$. Es wird deutlich, dass auf Grund der Normierung der Impulskorrelationsfunktion die Signalamplitude keinen Einfluss auf den Verlauf hat. Der normierte Maximal-Korrelationskoeffizient eignet sich somit zur Detektion von Delaminationen, wobei gilt:

$\text{Max}\{\rho(\tau_m)\} = \rho \approx +1 \rightarrow \text{reguläre Grenzfläche}$

$\text{Max}\{\rho(\tau_m)\} = \rho \approx -1 \rightarrow \text{Delamination}$

Eine Abweichung von den Werten ± 1 lässt auf einen Inhomogenität an der Grenzfläche schließen. Die Anwendbarkeit des Verfahrens zur Detektion von Inhomogenitäten wird in Unterkapitel 6.2 untersucht.

Die Zustandsbewertung einer zu untersuchenden Grenzfläche läuft nach dem in der Abbildung 6-3 dargestellten Verfahren.

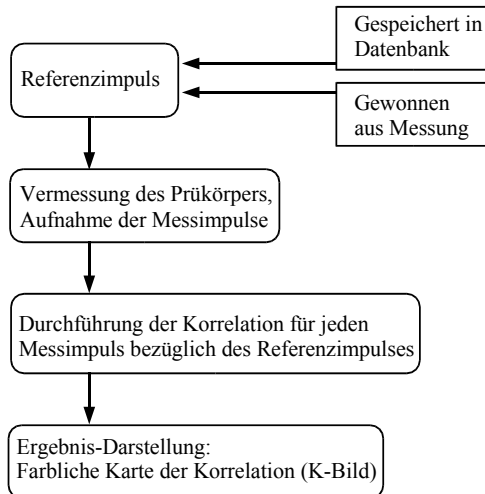


Abbildung 6-3: Ablaufdiagramm des Korrelations-Verfahrens

Zunächst wird ein Referenzimpuls benötigt, welcher eine Reflexion an einer regulären Grenzfläche darstellt. Der Referenzimpuls kann aus einer zuvor erstellten prüfkopf- und prüfaufgabenspezifischen Datenbank entnommen werden. Dies bietet sich insbesondere zur Untersuchung von industriell unter gleichen Bedingungen gefertigten Betriebsmitteln mit bekannter und konstanter Betriebsmittelgeometrie an. Ansonsten kann der Referenzimpuls auch aus einer Referenzmessung gewonnen werden, wobei darauf geachtet werden muss, dass der Referenzimpuls an einer regulären Grenzfläche gemessen wird.

Anschließend wird die Grenzfläche untersucht. Hierzu wird der Prüfkopf auf der Oberfläche bewegt und an jedem Messpunkt wird der an der Grenzfläche reflektierte Messimpuls aufgenommen. Jeder Messimpuls wird mit dem Referenzimpuls korreliert und das Maximum der Korrelationsfunktion, d.h. der Maximal-Korrelationskoeffizient, wird ermittelt. Als Ergebnis wird für jeden Messpunkt ein Wert aus dem Bereich $[-1 \dots +1]$ ermittelt. Es wird eine Korrelationskarte als Abbild der untersuchten Grenzfläche erstellt, in welcher der für jeden Messpunkt ermittelte Maximal-Korrelationskoeffizient farblich codiert dargestellt ist. Diese Korrelationskarte wird im Folgenden K-Bild genannt.

6.1.2 Ergebnis anhand einer Beispielkonfiguration

Das Verfahren wird anhand einer Beispielkonfiguration vorgestellt. Als Modell wird ein Prüfkörper aus Epoxidharz verwendet, welcher eine 1 mm dicke Kupferplatte beinhaltet (Abbildung 6-4, links). Auf Grund von Materialspannungen während der Aushärtung des Harzes hat sich an der Grenzfläche Cu / EP eine sichelförmige Ablösung gebildet (Abbildung 6-4, rechts).

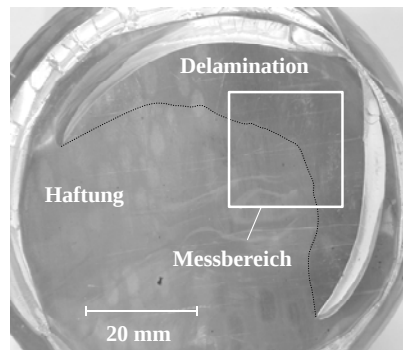
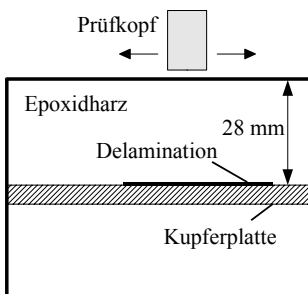


Abbildung 6-4: Prüfkörper mit einer partiellen Delamination an der Grenzfläche EP-Metall
links: schematische Seitenansicht; rechts: photographische Draufsicht (nachgezogene Grenze)

Der Prüfkörper wird mit dem Ultraschall-System (Prüfkopf Z2M) mit einer Schrittweite von 100 μm untersucht (vgl. Unterkapitel 4.3). Als Referenzimpuls wird der erste Messimpuls der Gesamtmessung verwendet. Für jeden Messimpuls wird anschließend das Maximum der Korrelation mit dem Referenzimpuls ermittelt und farbwert bzw. grauwertcodiert in dem K-Bild dargestellt (Abbildung 6-5).

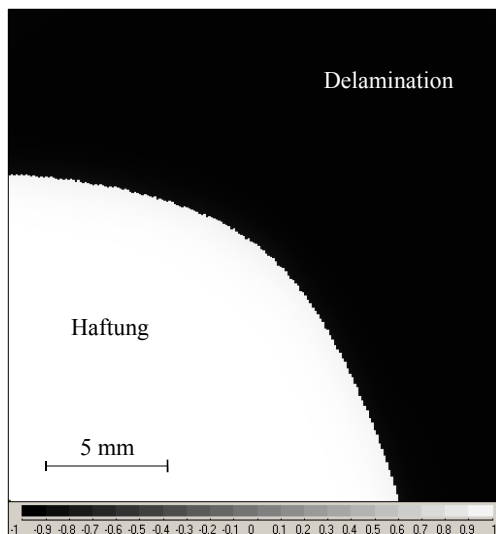


Abbildung 6-5: K-Bild des Messbereichs aus Abbildung 6-4

Eine scharfe Grenze zeigt deutlich, in welchem Bereich die Maximal-Korrelationskoeffizienten bedingt durch die Ablösung von +1 auf -1 umspringt. Es fällt auf, dass keine Zwischenwerte des Maximal-Korrelationskoeffizienten auftreten. Zur Verdeutlichung dient ein Histogramm der Maximal-Korrelationskoeffizienten, welches in Abbildung 6-6 dargestellt ist. Durch das Histogramm wird ersichtlich, dass fast alle Werte der Maximal-Korrelationskoeffizienten in den Bereichen $[-1 \dots -0,95]$ und $[+0,95 \dots +1]$ liegen.

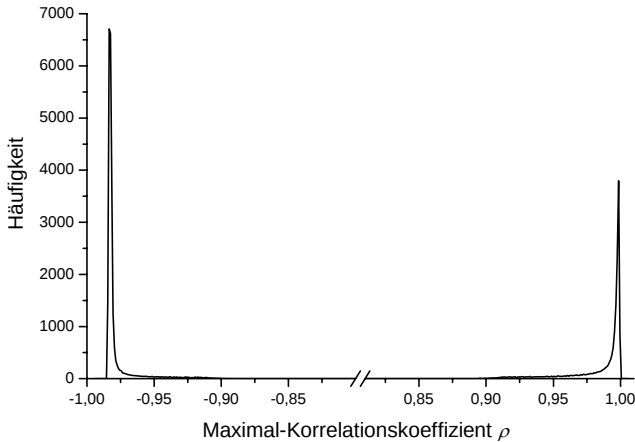


Abbildung 6-6: Histogramm der Maximal-Korrelationskoeffizienten aus Abbildung 6-5

Die Abbildung 6-7 zeigt den gleichen Ausschnitt des Scans, wie Abbildung 6-5, allerdings ist in diesem Fall nicht das K-Bild sondern die Echoamplitude (C-Bild) dargestellt. Prinzipiell lässt sich eine ähnlich verlaufende Strukturlinie wie in Abbildung 6-5 erkennen.

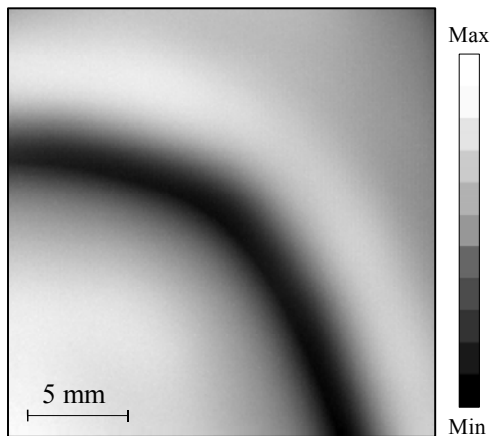


Abbildung 6-7: Amplitudenkarte (C-Bild) des Messbereichs aus Abbildung 6-4

Es fällt auf, dass die Amplitude im Bereich der regulären Grenzfläche in etwa die gleiche Höhe hat wie im Bereich der Ablösung. Dies liegt im ähnlichen Reflexionsfaktor beim Übergang EP-Luft und EP-Metall begründet. Des Weiteren fällt ein Bereich mit einer deutlich abgesenkten Amplitude auf. Dieser resultiert daraus, dass sich der Prüfkopf in diesem Bereich auf Grund dessen Durchmessers von 10 mm sowohl über dem regulären als auch über dem abgelösten Bereich befindet. Dort superponieren die Signale mit unterschiedlicher Phase, so dass es zu Auslöschungserscheinungen mit reduzierter resultierender Amplitude kommt. Es ließe sich auch überlegen, diese Auslöschungserscheinungen als Detektionskriterium zu verwenden. Dies hat allerdings eine Reihe von Nachteilen: Beispielsweise kann nicht detektiert werden, in welchem der Bereiche die Ablösung vorliegt, ferner kann die Reduktion der Amplitude, wie bereits beschrieben, auch auf Grund anderer Effekte auftreten, wobei dann nicht sichergestellt ist, dass überhaupt eine Ablösung aufgetreten ist. Mit dem vorgestellten phasenbasierten Verfahren bestehen diese Nachteile jedoch nicht.

6.1.3 Analyse der Einflussparameter

Im vorherigen Abschnitt wurde die prinzipielle Anwendbarkeit des Detektionsverfahrens gezeigt. In der Praxis hängt die Detektierbarkeit einer offenen Ablösung von mehreren Einflüssen ab. Zu diesen Einflüssen zählen die Abhängigkeit von der Materialkombination, von der Ausdehnung der Ablösung sowie der über der Grenzfläche liegenden Schichtdicke in Abhängigkeit von der Prüffrequenz, von der Oberflächengeometrie und vom Referenzimpuls. Diese Einflüsse werden im Folgenden getrennt voneinander untersucht.

Materialkombination

Das vorgestellte Verfahren eignet sich grundsätzlich dann, wenn die reguläre Grenzfläche einen schallharten Übergang darstellt, d.h. wenn das durchschallte Material schallweicher ist als das Material, an dem die Messimpulse reflektiert werden. Dies ist bei den untersuchten Übergängen EP-Metall, SIR-EP und SIR-Metall der Fall. Insofern ist das Verfahren bei diesen Kombinationen anwendbar, was durch die durchgeführten Messungen bestätigt werden konnte. Das Vorhandensein einer dünnen Gasschicht ist jedoch notwendige Voraussetzung für die Detektion einer Delamination. In Abschnitt 2.1.2 wird beschrieben, dass Silikonelastomere mit einer Vorspannung verwendet werden können, so dass ein Anpressdruck auf die Grenzfläche entsteht. Dieser Anpressdruck ist in der Lage, die Luft aus der Grenzfläche zu drücken, so dass zwar keine chemische

Haftung vorliegt, allerdings auch keine offene Ablösung. In diesen Fällen ist somit die Anwendbarkeit des Verfahrens eingeschränkt.

Bei dem Materialverbund EP-Metall liegt diese Problematik nicht vor, weil das Epoxidharz als Duroplast nach der Aushärtung starr ist, so dass kein elastischer Anpressdruck auf die Grenzfläche erzeugt wird. Insofern bestehen bei diesem Materialverbund die oben genannten Einschränkungen nicht.

Schichtdicke über der Grenzfläche

In der Praxis werden je nach Betriebsmittel Silikonelastomere mit unterschiedlichen Schichtdicken eingesetzt. Besonders dünne Schichten im Bereich von ca. 1 mm finden sich bei der Verwendung als Hüllwerkstoff für Freiluftisolationen (vgl. Abbildung 2-4). Große Schichtdicken bis ca. 50 mm werden beispielsweise bei Hochspannungs-Kabelgarnituren verwendet, bei denen das Silikonelastomer mit hohen elektrischen Feldstärken belastet wird (vgl. Abbildung 2-5).

Es werden Prüfkörper aus Epoxidharz mit aufgetragener Silikonschicht verwendet, wobei die Silikonschichten eine unterschiedliche Schichtdicke von 0,5 mm bis 73 mm aufweisen (Abbildung 6-8). Bei jedem Prüfkörper wird durch mechanische Einwirkung halbseitig eine Ablösung erzeugt. Anschließend werden die Prüfkörper mittels Ultraschall und dem Algorithmus untersucht.

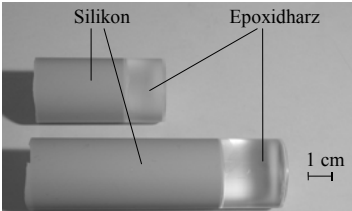
	Schichtdicke	Z2K	H5M	H10M
	0,5 mm	-	0	+
	1,5 mm	0	+	+
	2,5 mm	+	+	+
	5,0 mm	+	+	+
	10 mm	+	+	+
	36 mm	+	+	+
	51 mm	+	+	+
	73 mm	+	0	0
+ : detektiert				
0 : nicht sicher detektiert				
- : nicht detektiert				

Abbildung 6-8: Beispiele für Prüfkörper mit unterschiedlicher Silikon-Schichtdicke und partieller Delamination

Tabelle 6-2: Detektierbarkeit in Abhängigkeit von der Schichtdicke

Die Tabelle 6-2 zeigt das Ergebnis der Detektierbarkeit. Die halbseitige Ablösung kann für alle untersuchten Schichtdicken nachgewiesen werden. Es zeigt sich allerdings, dass bei einer Schichtdicke von 0,5 mm nur hohe Prüffrequenzen eingesetzt werden können, weil ansonsten auf Grund von sich überlagernden Mehrfachreflexionen innerhalb der oberen Schicht Impulsverzerrungen auftreten. Somit muss die Schichtdicke größer als die Ultraschall-Impulsbreite sein, welche etwa der doppelten Wellenlänge entspricht (bei einer Frequenz von 5 MHz beträgt die theoretische Wellenlänge in Silikonelastomer $\lambda = 0,2$ mm). Bei großen Schichtdicken eignen sich auf Grund der Frequenzabhängigkeit der Dämpfung niederfrequente Prüfköpfe besser zur Detektion.

Die bislang vorgestellten Ergebnisse sind an Prüfkörpern mit einer ebenen Oberfläche erzielt worden. Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik weisen häufig eine gekrümmte Oberfläche auf. Zur Modellierung eines Verbundisolators werden Prüfkörper untersucht, die eine variable Schichtdicke eines Silikonelastomers auf einen GFK-Stab (Abbildung 6-9). Der GFK-Stab hat einen mit Verbundisolatoren vergleichbaren Durchmesser von $d = 15$ mm, so dass an der Grenzfläche ein signifikante Krümmung vorliegt. Die Messungen an diesen Prüfkörpern ergeben keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Detektierbarkeit von Ablösungen zu den Messungen an Prüfkörpern mit einer ebenen Oberfläche.

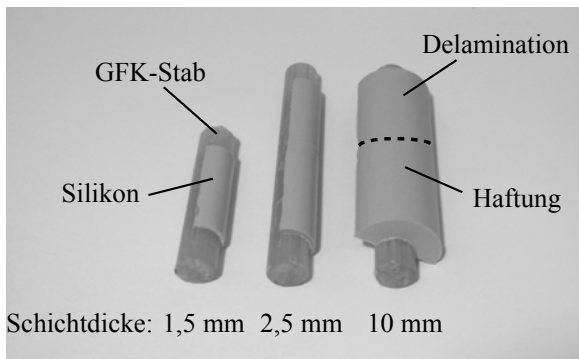


Abbildung 6-9: Silikon auf GFK-Stäben als zylindrische Prüfkörper

In Epoxidharz, welches eine geringere akustische Dämpfung aufweist als Silikon, können Ablösungen vom Metall auch noch durch eine Schichtdicke von mehr als 100 mm detektiert werden.

Ausdehnung der Delamination

Bereits kleine Bereiche einer Ablösung können zu einer langfristigen Schädigung eines Isoliersystems führen. Kleine Bereiche können als Initialstelle im Betrieb des Isoliersystems durch Feuchtigkeit oder thermo-mechanische Spannungen ausgelöst zu einer großflächigen Delamination anwachsen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Deswegen wird die Abhängigkeit der Detektierbarkeit einer Ablösung von deren Ausdehnung untersucht. Die Detektion großflächiger Delaminationen, die größer sind als der Prüfkopfdurchmesser, stellt keine Schwierigkeit dar. Bei kleinen Delaminationen tritt jedoch der Fall ein, dass sich die Reflexionen der Ablösung mit Reflexionen der haftenden Umgebung überlagern, wodurch Impuls-Auslöschungen auftreten. Nur wenn der Anteil des abgelösten Bereichs überwiegt, kann der für die Detektion notwendige Phasensprung auftreten. Einen wesentlichen Einfluss hat somit die Schallbündelbreite (vgl. Abbildung 3-3) an der Stelle der Grenzfläche. Je schmaler die Schallbündelbreite ist, umso höher ist die Schallintensität im Bereich der akustischen Achse und umso geringer sind die Anteile, welche vom haftenden Umgebungsbereich der homogenen Grenzfläche reflektiert werden (vgl. Abbildung 6-10).

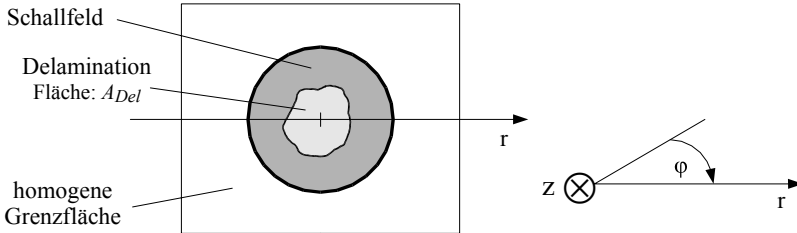


Abbildung 6-10: Schallfeld über einer Delamination an einer Grenzfläche

Es kann eine Modellrechnung durchgeführt werden, durch welche die kleinste detektierbare Größe theoretisch ermittelt werden kann. Die Abbildung 6-11 zeigt die relative Schalldruckamplitude in einem radialen Schnitt an einer Stelle z_0 durch das gemessene, zylindersymmetrische Schallfeld $p(r, \varphi, z_0)$ des Prüfkopfs H5M im Fokusbereich.

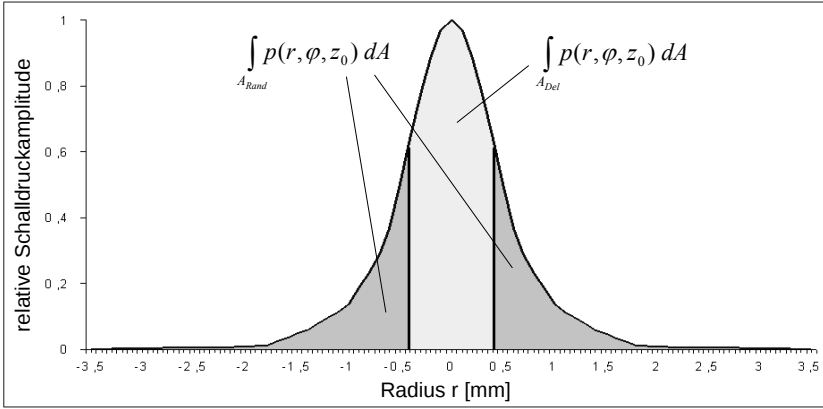


Abbildung 6-11: Schallfeld des Prüfkopfs H5M an einer Stelle z_0 im Fokusbereich

Eine Ablösung ist detektierbar, wenn die Anteile, die von der Delamination einer ebenen Fläche reflektiert werden, größer sind, als die Anteile, die vom homogenen, ringförmigen Randbereich reflektiert werden. Dem entspricht, dass eine Detektion dann möglich ist, wenn in der Abbildung 6-11 die Fläche im Bereich der akustischen Achse mindest gleich der beiden äußeren Flächen ist. Zudem müssen die Reflexionsfaktoren R_{Del} und R_{Rand} des delaminierten Bereichs und des homogenen Randbereichs berücksichtigt werden. Insgesamt führt dies zu folgender Ungleichung:

$$|R_{Del}| \cdot \int_{A_{Del}} p(r, \varphi, z_0) dA > |R_{Rand}| \cdot \int_{A_{Rand}} p(r, \varphi, z_0) dA \quad (6.1)$$

Das Integral des Randbereichs lässt sich durch die Differenz aus dem gesamten Bereich und dem Bereich der Delamination bestimmen. Somit folgt:

$$|R_{Del}| \cdot \int_{A_{Del}} p(r, \varphi, z_0) dA > |R_{Rand}| \cdot \left(\int_{A_{Gesamt}} p(r, \varphi, z_0) dA - \int_{A_{Del}} p(r, \varphi, z_0) dA \right) \quad (6.2)$$

Äquivalent umgeformt ergibt sich die folgende Bedingung für die Detektierbarkeit einer Delamination, wobei der Betrag des Reflexionsfaktors einer Delamination zu 1 gesetzt werden kann und der Reflexionsfaktor des Randbereiches dem Reflexionsfaktor der homogenen Grenzfläche entspricht.

$$\int_{A_{Del}} p(r, \varphi, z_0) dA > \frac{|R_{Grenzfläche}|}{1 + |R_{Grenzfläche}|} \cdot \int_{A_{Gesamt}} p(r, \varphi, z_0) dA \quad (6.3)$$

Die rechte Seite der Ungleichung 6.3 kann im Falle des vorgegebenen Reflexionsfaktors aus einer Schallfeldmessung bestimmt werden, indem über den gesamten Schalldruck an einer vorgegebenen Stelle z_0 unter Berücksichtigung der Ringfläche integriert wird. Anschließend kann ausgehend von der akustischen Achse das in der Ungleichung 6.3 auf der linken Seite stehende Integral numerisch bestimmt werden, bis die Ungleichung erfüllt ist. Die Abbildung 6-12 zeigt die aus der Ungleichung 6.3 rechnerisch ermittelte Grenze der Detektierbarkeit für eine kreisförmige Delamination in dem dargestellten Schallfeld des Prüfkopfs H5M, wobei der Reflexionsfaktor gemäß dem Wert für die Grenzfläche Silikonelastomer-Epoxidharz gewählt ist (vgl. Tabelle 6-1) .

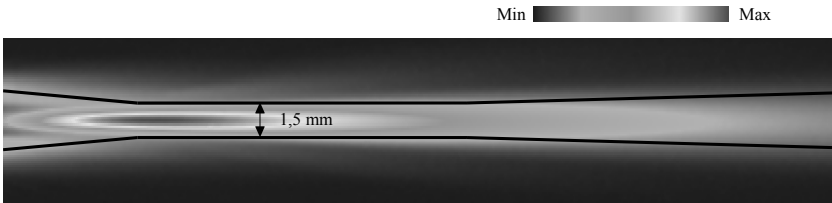


Abbildung 6-12: Mit der Ungleichung 6.3 berechnete Grenze der Detektierbarkeit einer Delamination mit dem Prüfkopf H5M an der Grenzfläche SIR-EP

Das Detektionsvermögen ist im Bereich der Nahfeldlänge am größten, weil hier die Schalldrücke nahe der akustischen Achse fokussiert sind. In diesem Bereich hat die kleinste noch detektierbare Delamination einen Durchmesser von 1,5 mm. Unter Berücksichtigung, dass das Flächenverhältnis zwischen einer Fläche mit diesem Durchmesser und einer Fläche mit dem Prüfkopfdurchmesser ($d = 5\text{ mm}$) etwa 1 : 11 beträgt, zeigt dieser geringe Wert den großen Einfluss des fokussierten Schallfelds. Wegen der Schallfelddivergenz nimmt das Detektionsvermögen im Fernfeldbereich ab.

Zur Verifikation des Modells werden Prüfkörper mit dem Materialverbund Silikonelastomer-Epoxidharz sowie Silikonelastomer-Metall untersucht. Es werden Sockel aus Epoxidharz und Aluminium hergestellt. Um Ablösungen einer vordefinierten Größe zu erhalten, werden die Sockel mit Bohrungen verschiedener

Durchmesser (0,5 mm bis 3,0 mm) versehen, welche mit Stopfen verschlossen werden. Anschließend wird eine 20 mm dicke Silikonschicht auf den Sockel gegossen. Nach der Vernetzung werden die Stopfen herausgezogen, so dass die Bohrungen eine Delamination mit einem vorgegeben Durchmesser darstellen (Abbildung 6-13).

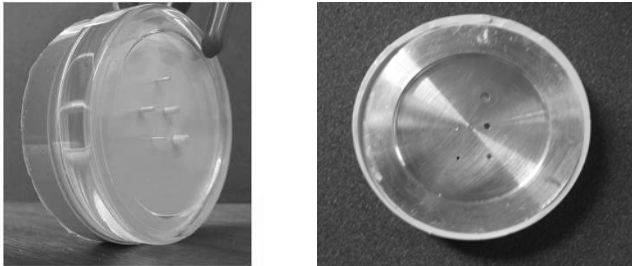


Abbildung 6-13: Prüfkörper aus Silikon auf einem Sockel mit Bohrungen;
links: EP-Sockel; rechts: Aluminium-Sockel

Die Prüfkörper werden mit Ultraschall mit verschiedenen Prüfköpfen unterschiedlicher Frequenz und mit dem Detektionsverfahren untersucht. Auf Grund der Wasservorlaufstecke und der Schichtdicke liegt die Grenzfläche im Fokusbereich des Schallfelds. Die Tabelle 6-3 zeigt die Ergebnisse der Prüfkörper aus Silikon und Epoxidharz.

$\varnothing$	Z2K	H5M	H10M
0,5 mm	-	-	0
1,0 mm	-	0	0
1,5 mm	-	+	+
2,0 mm	0	+	+
3,0 mm	+	+	+

+ : detektiert
 0 : nicht sicher detektiert
 - : nicht detektiert

Tabelle 6-3: Detektierbarkeit eine Delamination am Prüfkörper aus Abbildung 6-13 links

Die gemessenen Werte der Detektierbarkeit liegen in Übereinstimmung mit dem zuvor beschriebenen Modell. Es zeigt sich, dass mit dem Prüfkopf H5M

Delaminationen mit einem Durchmesser ab 1,5 mm erkannt werden können. Zum Teil konnten auch kleinere Durchmesser erkannt werden, allerdings ist die Erkennbarkeit eingeschränkt und nicht bei jeder Messung gegeben. Ferner zeigt sich, dass eine Abhängigkeit von dem verwendeten Prüfkopf vorliegt. Insbesondere bei kleinen Durchmessern eignet sich der verwendete 2-MHz-Prüfkopf erwartungsgemäß nicht, um die Ablösungen zu detektieren. Dies liegt auch darin begründet, dass dieser einen größeren Wandlerdurchmesser als die anderen verwendeten Prüfköpfe aufweist (vgl. Abschnitt 4.3.1).

Die Tabelle 6-4 zeigt die Ergebnisse der Detektierbarkeit von Ablösungen an der Grenzfläche SIR-Metall.

Ø	Z2K	H5M	H10M
0,5 mm	-	-	-
1,0 mm	-	-	-
1,5 mm	-	-	-
2,0 mm	-	+	+
3,0 mm	-	+	+

+ : detektiert
 - : nicht detektiert

Tabelle 6-4: Detektierbarkeit einer Delamination am Prüfkörper aus Abbildung 6-13 rechts

Die Grenze der Detektierbarkeit liegt bei einem Durchmesser von 2 mm. Erwartungsgemäß liegt diese Grenze höher als bei der Grenzfläche SIR-EP, weil der vom homogenen Bereich reflektierte Anteil auf Grund des größeren Reflexionsfaktors in diesem Bereich gemäß Ungleichung 6.3 einen größeren Einfluss aufweist, so dass ein Phasensprung bei kleineren Delaminationen nicht auftritt.

Wenn eine Grenzfläche in einem Betriebsmittel untersucht werden soll und mehrere Prüfköpfe zu Verfügung stehen, so bietet es sich an, zunächst für jeden Prüfkopf mittels einer Schallfeldmessung die Detektionsgrenze nach Ungleichung 6.3 zu ermitteln, um somit in Abhängigkeit von der Tiefe der Grenzfläche und den die Grenzfläche bildenden Materialien den geeigneten Prüfkopf auszuwählen.

Auch die Größe der Ablösung kann in Grenzen mittels des K-Bilds ermittelt werden. Abbildung 6-14 zeigt beispielsweise das K-Bild einer Delamination mit

einem Durchmesser von 3 mm, welche mit dem Prüfkopf H10M vermessen wurde.

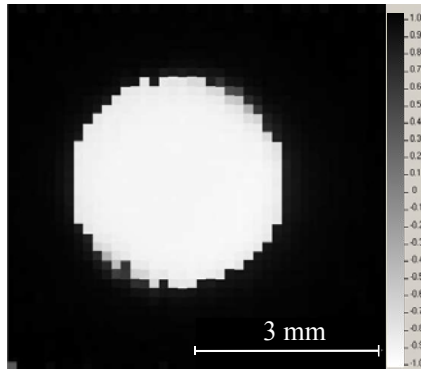


Abbildung 6-14: K-Bild einer Delamination mit einem Durchmesser von 3 mm

Der ermittelte Durchmesser in der Korrelationskarte liegt bei 3,3 mm, so dass sich ein relativer Fehler von 10% ergibt. Bei kleineren Ablösungen nimmt der Fehler jedoch deutlich zu. Gemäß der durch das Modell ermittelten Grenzbedingung für die Detektierbarkeit nach Ungleichung 6.3 tritt bei der kleinsten noch zu detektierenden Delamination der Phasensprung noch genau an *einer* Prüfkopfposition auf, so dass die Bildgröße der Delamination kleiner ist als die reale Delamination. Somit kann das Verfahren in diesem Fall nur zur Detektion einer Delamination ohne Bestimmung deren Ausdehnung eingesetzt werden.

Referenzimpuls

Untersuchungen zeigen, dass eine starke Abhängigkeit des Detektionsergebnisses vom gemessenen Referenzimpuls vorliegt, weswegen der Referenzimpuls mit großer Sorgfalt ausgewählt werden sollte. Insbesondere muss sichergestellt sein, dass der Referenzimpuls auch tatsächlich an einer homogenen Grenzfläche ohne Messrauschen aufgenommen wird. Die Abbildung 6-15 links zeigt beispielsweise das K-Bild einer Messung einer Delamination von 3 mm Durchmesser (Prüfkopf H5M), wobei der Referenzimpuls auf Grund einer fehlerhaften Messung stark verrauscht war. Bei Austausch des verrauschten Referenzimpulses durch einen unverrauschten wird eine deutliche Verbesserung erreicht (Abbildung 6-15, Mitte). Eine weitere Verbesserung wird erzielt, wenn die Verschiebung τ_m der Korrelationsfunktion eingeschränkt wird, weil sich bei einer Begrenzung der Verschiebung störende, durch symmetrische Impulse auftreten-

de Effekte weniger auswirken. Eine Begrenzung der Verschiebung ist immer dann zulässig, wenn sich die Tiefenlage der untersuchten Grenzschicht auf Grund der Betriebsmittelgeometrie und ausreichend geringer Fertigungstoleranzen nicht verändert. Wird beispielsweise angenommen, dass sich die Grenzschicht nicht mehr als 500 μm verschiebt und dies als maximale Verschiebung der Korrelationsfunktion festgesetzt wird, so ergibt sich das in Abbildung 6-15 rechts dargestellte verbesserte Ergebnis.

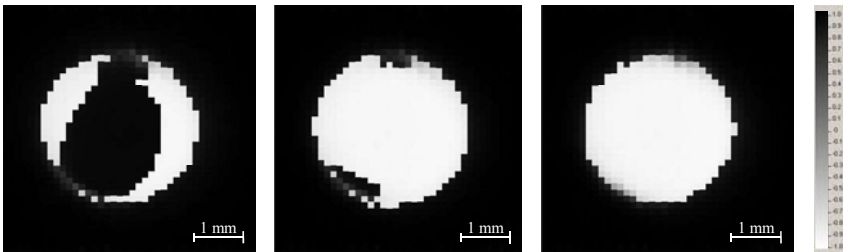


Abbildung 6-15: K-Bilder; Verbesserung des Messergebnisses (*links*) durch Austausch des Referenzimpulses (*Mitte*) und Einschränkung der Verschiebung m (*rechts*)

Eine weitere Verbesserung kann durch die Verwendung einer Impulsform erreicht werden, welche einem Diracstoß ähnelt und nur *ein* ausgeprägtes Maximum aufweist. In diesem Fall werden die störenden Nebenmaxima der Korrelationsfunktion, insbesondere die negativen Nebenmaxima (vgl. Abbildung 6-2b), minimiert. Die praktische Umsetzung wird jedoch dadurch vermindert, dass ein solcher Impuls eine sehr hohe Bandbreite haben muss, welche jedoch auf Grund der ausgeprägten Frequenzabhängigkeit der Dämpfung im Material verringert wird.

Inkonstante Schichtdicke

Bei Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik kann der Fall auftreten, dass die zu untersuchende Grenzfläche bezüglich der Oberfläche geneigt ist, wodurch sich eine inkonstante Schichtdicke über der Grenzfläche ergibt. Geneigte Grenzfläche treten in Betriebsmittel beispielsweise häufig im Bereich eines Feldsteuerkonus oder Deflektorentrichters auf (s. Abbildung 2-5). Die in Abschnitt 3.1.3 beschriebene ausgeprägte Frequenzabhängigkeit der Dämpfung führt bei der Beschallung solcher Grenzflächen zu einer Impulsverformung, weil die Nennfrequenz der Impulse bei zunehmender Schichtdicke zu geringeren Frequenzen hin verschoben wird.

Die Untersuchung von Grenzflächen an Prüfkörpern mit einer inkonstanten Schichtdicke führt aus diesem Grund zu unzureichenden Ergebnissen. Zwar berücksichtigt die Korrelation auf Grund der Normierung die veränderten Impuls-Amplituden, allerdings wird eine Impulsverformung nicht abgefangen, so dass die Impulse die gleiche Impulsform aufweisen müssten. Damit der Effekt berücksichtigt werden kann, werden Untersuchungen (Prüfkopf H5M) durchgeführt, welche die Frequenzverschiebung zu niedrigeren Nennfrequenzen hin bei zunehmender Schichtdicke in Epoxidharz und Silikon zeigen (Abbildung 6-16).

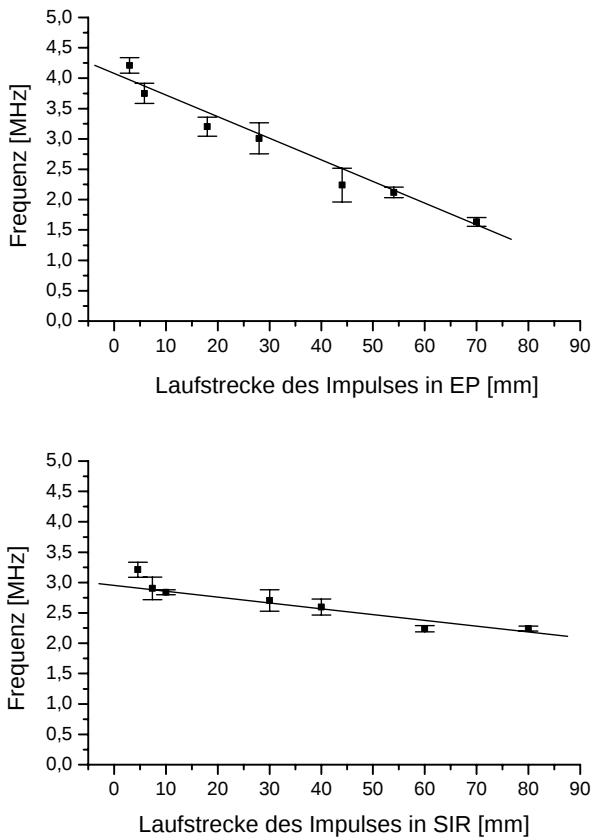


Abbildung 6-16: Frequenzverschiebung der Impuls-Nennfrequenz (H5M) in EP und SIR

Es zeigt sich eine deutliche Frequenzabnahme der Nennfrequenz der Schallimpulse zu größeren Laufstrecken hin, welche für größere Laufstrecken einem linearen Verlauf angenähert werden kann.

Es ist möglich, in dem Korrelationsverfahren den Effekt der Impulsverformung in einer ersten Näherung durch eine Verschiebung des Frequenzspektrums unter Vernachlässigung der Verformung des Frequenzspektrums zu berücksichtigen, so dass die gemessenen Impulse in Abhängigkeit von der Schichtdicke gemäß der Frequenzverschiebung in Zeitrichtung skaliert werden. Dies wird beispielhaft mittels eines Prüfkörpers aus dem Verbund Silikon-Epoxidharz gezeigt (Abbildung 6-17). Dieser weist eine um 30° geneigte Grenzfläche und somit im Messbereich eine von etwa 11,7 mm bis 34,2 mm zunehmende Silikonschichtdicke auf, wobei die Silikonschicht halbseitig abgelöst ist. Zur Vermessung wird der Prüfkörper gemäß dem in Gleichung 3.8 angegebenen Brechungsgesetz unter einem Winkel von 49° beschallt, damit die Grenzfläche unter Berücksichtigung der Brechung senkrecht getroffen wird. Somit ergibt sich in diesem Messbereich eine Zunahme der Laufstrecke des Schallimpulses von 13,5 mm bis 39,5 mm. Für eine Detektion des Phasensprungs ist es zwar nicht notwendig, dass die Grenzfläche senkrecht vom Schall getroffen wird, allerdings ist in diesem Fall die Echoamplitude maximal, so dass hohe Signal-Rausch-Abstände erreicht werden.

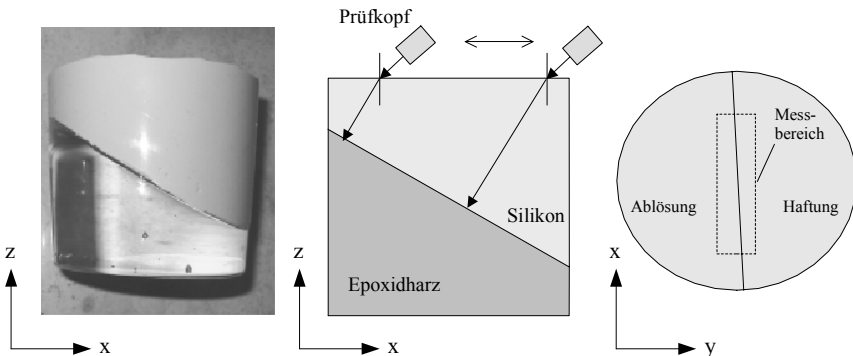


Abbildung 6-17: Prüfkörper aus SIR-EP mit inkonstanter Schichtdicke;
link: Photo; Mitte: schematische Seitenansicht; rechts: schematische Draufsicht

Die Abbildung 6-18 links zeigt das K-Bild bei nicht berücksichtigter Frequenzverschiebung für den gemäß Abbildung 6-17 mit einer Schrittweite von 500 μm

vermessenen Prüfkörper. Als Referenzimpuls wird der Impuls am linken unteren Bildrand verwendet. Im unteren Bereich des Bildes liegen die Ergebnisse des Maximal-Korrelationskoeffizienten nahe $+1$ bzw. -1 vor. Sie weichen jedoch nach oben hin – d.h. zu zunehmender Schichtdicke hin – in beiden Bereichen immer mehr von diesen Werten ab, weil nunmehr die Messimpulse wegen der Impulsverformung nicht mehr mit dem Referenzimpuls vergleichbar sind. Die Abnahme der Signalamplitude auf Grund der Dämpfung scheidet als Ursache für die Verschlechterung aus, da die Signale messtechnisch entsprechend der zunehmenden Schichtdicke mit zunehmender Empfangsverstärkung aufgenommen werden. Ferner wird der gemessene Bildbereich der Impulzechodigramme mitgeführt, um eine größtmögliche Auflösung zu erhalten.

Zur Berücksichtigung der Impulsverformung wird die Zeitachse der Messimpulse in Abhängigkeit von der Schichtdicke neu skaliert, wobei eine lineare Frequenzverschiebung angenommen wurde. Erst nach der Umskalierung werden die Messimpulse mit dem Referenzimpuls korreliert. Das Ergebnis ist in Abbildung 6-18 rechts dargestellt.

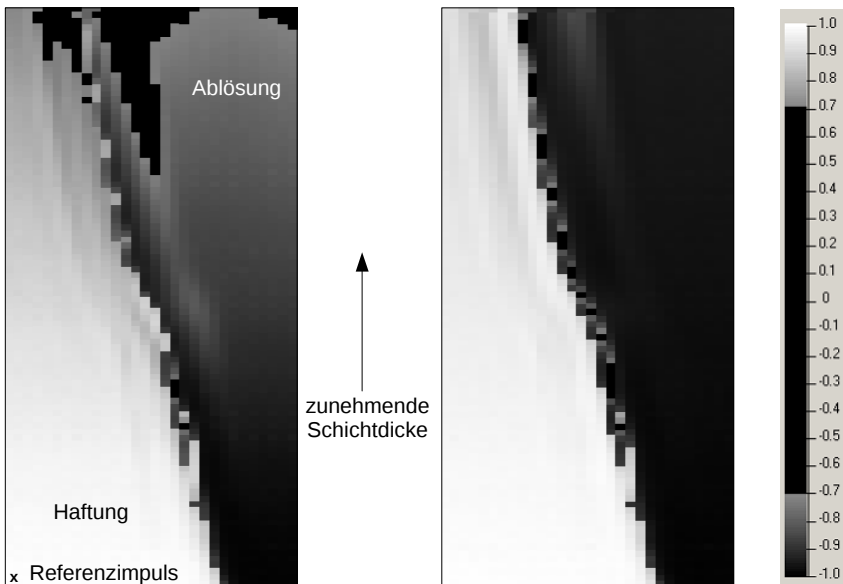


Abbildung 6-18: K-Bilder des Messbereichs aus Abbildung 6-17;
links: unverändert; rechts: mit berücksichtigter Frequenzverschiebung

Durch Vergleich der beiden K-Bilder wird die Verbesserung des Ergebnisses deutlich. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 6-19 die Histogramme des Maximal-Korrelationskoeffizienten bei unveränderter sowie bei neu skaliertem Zeitachse der Messimpulse nach Abbildung 6-18.

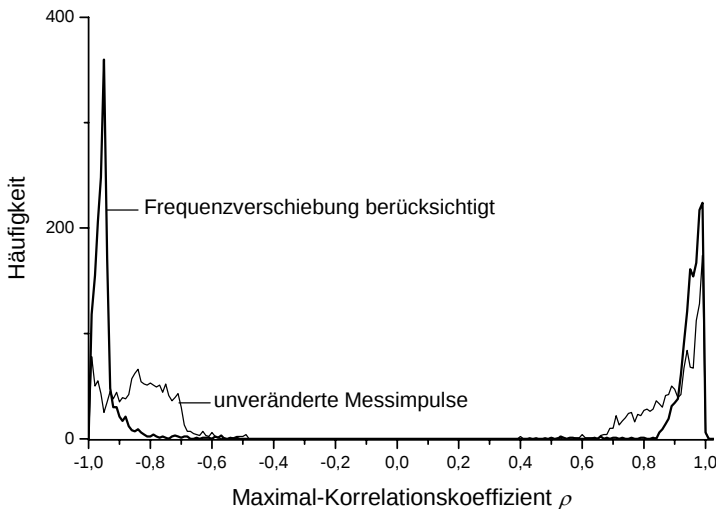


Abbildung 6-19: Vergleich der Histogramme der Maximal-Korrelationskoeffizienten aus Abbildung 6-18

Im Histogramm der unveränderten Messimpulse ist erkennbar, dass bereits Werte des Maximal-Korrelationskoeffizienten von etwa $\pm 0,65$ auftreten. Durch die Skalierung der Zeitachse der Messimpulse wird der Effekt der Impulsverformung deutlich reduziert und die Werte des Maximal-Korrelationskoeffizienten werden in Richtung der Werte ± 1 verschoben.

Falls ein Betriebsmittel mit einer geeigneten Grenzfläche untersucht werden soll, kann zunächst die materialabhängige Abnahme der Frequenz bei zunehmender Schichtdicke bestimmt werden. Diese kann anschließend für die Skalierung der Zeitachse der Messimpulse verwendet werden. Durch die Berücksichtigung der Frequenzverschiebung ist eine verbesserte Untersuchung von Prüfkörpern mit inkonstanter Schichtdicke möglich.

6.2 Detektion von Fehlstellen an einer Grenzfläche

Neben Delaminationen weisen auch singuläre Fehlstellen an Grenzflächen ein hohes Schädigungspotenzial auf, welches für den Fall, dass die Grenzfläche durch eine Elektrode gebildet wird, zumeist größer ist als das Schädigungspotenzial von gleichartigen Fehlstellen im Isolierstoffvolumen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die Detektion von Fehlstellen an Grenzflächen mittels Ultraschall ist problematisch, weil wegen des beschränkten axialen Auflösungsvermögens auf Grund der vorhandenen Impulsbreite das Echosignal der Fehlstelle von dem in der Regel deutlich stärkeren Echosignal der Grenzfläche verdeckt werden kann. Vorausgegangene Untersuchungen beschäftigten sich mit der Frage, welchen lichten Abstand eine Inhomogenität in Abhängigkeit von der Größen von der Grenzfläche aufweisen muss, um noch detektiert zu werden [Cor02]. Die Problematik, wie groß eine sich unmittelbar an einer Grenzfläche befindende Fehlstelle sein muss, um noch detektiert werden zu können, wurde bislang nicht umfassend untersucht. Es sind Untersuchungen in Silikon mit dem beispielhaften Ergebnis durchgeführt worden, dass kugelförmige Fehlstellen mit einem Durchmesser von 1,25 mm an einer Glimmerplatte, welche eine makroskopische, großflächige Grenzfläche darstellt, in 20 mm Tiefe detektiert werden können [Cor03a]. Eine Fehlstelle wurde als „detektiert“ bewertet, wenn im A-Scan eindeutig neben dem Grenzflächensignal ein weiteres Echosignal erkannt wurde. Weitergehende Untersuchungen beispielsweise hinsichtlich anderer Kombinationen polymerer Isolierstoffe und weitergehende objektivere Bewertungsverfahren wurden nicht durchgeführt und aus diesem Grund in der vorliegenden Arbeit aufgenommen.

6.2.1 Prüfverfahren

Die Detektion einer Fehlstelle an einer Grenzfläche wird mit zwei Detektionsverfahren untersucht. Zum einen wird analog zu den vorhergehenden Studien ausgewertet, ob noch ein signifikantes Fehlstellensignal von dem Grenzflächensignal unterscheidbar ist. Hierbei wird jedoch ein automatisierbares Verfahren verwendet, welches auf schichtweise ausgewerteten C-Scan basiert. Abbildung 6-20 zeigt das Echosignal einer 1,1 mm großen Fehlstelle aus Metall an einer Grenzfläche *isolierendes Silikon – schwach leitfähiges Silikon* im Vergleich zur gleichen Grenzfläche ohne Fehlstelle [Wal05b]. Das Fehlstellensignal liegt deutlich erkennbar vor dem Grenzflächensignal.

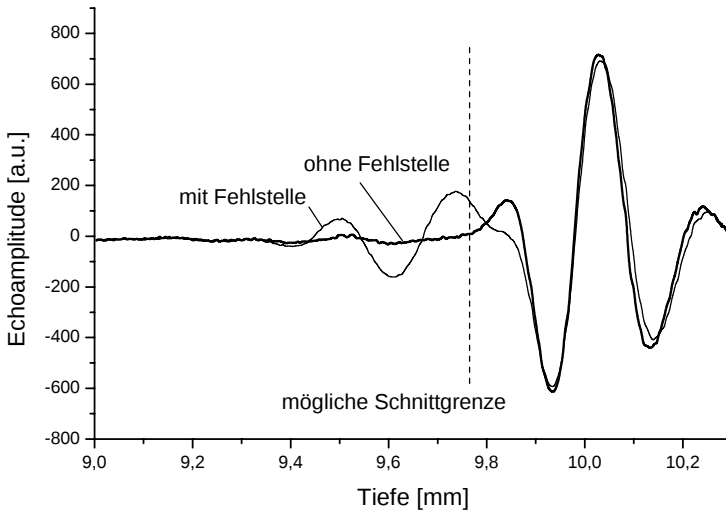


Abbildung 6-20: Reflexion eines Impulses an einer Grenzfläche mit und ohne einer Fehlstelle

Die Grenzfläche wird mittels Ultraschall vermessen, anschließend wird der C-Scan dargestellt. Für eine automatisierte Detektion wird der C-Scan schichtweise ausgewertet, wodurch sich die Grenzflächensignale ausblenden lassen. Bei dieser Methode gilt, dass die (halbe) Impulsbreite die bestimmende Größe für die Fehlstellendetektion ist. Dies ist verständlich, weil prinzipiell die axiale Auflösung eines Ultraschallsystems mit zunehmender Bandbreite B des Prüfpulses steigt [Küh06]. Die Impulsbreite des standardmäßig verwendeten Prüfkopfs H5M beträgt in Silikon in einer Tiefe von 20 mm etwa 0,65 mm.

Eine mögliche Schnittgrenze ist in Abbildung 6-20 strichliniert dargestellt. Problematisch ist, dass bei Verwendung einer statischen Schnittgrenze eine sehr genaue Ausrichtung der Grenzfläche notwendig ist. Wenn die Ebene der Prüfkopfbewegung bezüglich der Grenzfläche geneigt ist, so dass ein Versatz von wenigen 100 μm entsteht, verschiebt sich die Schnittgrenze derart, dass eine Fehlstellendetektion nicht mehr möglich ist. Die mit diesem Verfahren erzielten Ergebnisse sind in Abschnitt 6.2.2 beschrieben.

Als zweites Verfahren zur Detektion einer Fehlstelle an einer Grenzfläche wird das in Unterkapitel 6.1 vorgestellte Verfahren zur Detektion von Delaminatio-

nen mittels eines Korrelationsalgorithmus angewendet. Hierbei wird durch Vergleich von Messimpulsen mit einem Referenzimpuls der Maximal- Korrelationskoeffizient ermittelt, welcher vom Betrag im Bereich von +1 liegt. Wenn beispielsweise eine Impulsverformung auf Grund einer inkonstanten Schichtdicke auftritt, so liegt der Wert niedriger als +1 (vgl. Abbildung 6-18). Ebenfalls führt eine Fehlstelle an einer Grenzfläche zu einer Impulsverformung (Abbildung 6-20). Diese kann zur Detektion einer Fehlstelle verwendet werden. Das Verfahren ist vorteilhaft, weil eventuelle Neigungen der Grenzfläche durch die Korrelationsfunktion auf Grund der Verschiebung τ_m berücksichtigt werden. Eine durch eine inkonstante Schichtdicke verursachte Impulsverformung kann analog zu Abschnitt 6.1.3 berücksichtigt werden.

In vergangenen Studien wurde vorgeschlagen, Veränderungen in der Autokorrelationsfunktion zur Detektion von oberflächennahen Fehlstellen zu verwenden [Rüm96]. Dieser Ansatz ist allerdings auf Grund prinzipieller Einschränkungen nicht weiterverfolgt worden [Rüm96].

6.2.2 Ergebnisse und Analyse der Leistungsfähigkeit

Zur Untersuchung der Detektierbarkeit von Lufteinschlüssen an einer Grenzschicht in mit Epoxidharz vergossenen Betriebsmitteln werden laborgefertigte Prüfkörper verwendet, welche eine Grenzschicht Epoxidharz-Metall aufweisen. Dazu wird eine Metallplatte mit dem hochtransparenten Epoxidharz HT2 vergossen (vgl. Abschnitt 4.2.2). Es wird Luft unter die Platte eingebracht, welche aufsteigt und an der Metallplatte niederschlägt. Nach dem Aushärten weist der Prüfkörper annähernd kugelförmige Lufteinschlüsse auf, welche mikroskopisch vermessene Durchmesser von 0,1 mm bis 3 mm haben. Die Abbildung 6-21 zeigt mikroskopische Aufnahmen mehrerer Lufteinschlüsse mit Durchmessern von 0,4 mm bis 2,5 mm auf einer 1 mm dicken Kupferplatte.

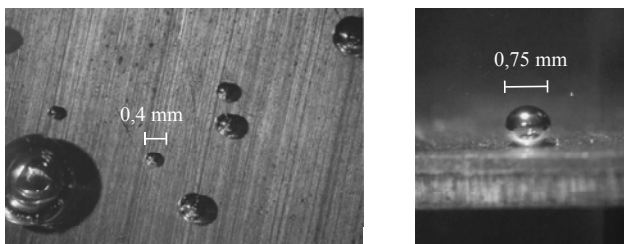


Abbildung 6-21: Mikroskopie-Aufnahmen von Lufteinschlüssen in EP an einer Kupferplatte

Um eine automatisierte Bewertung zu erhalten, werden C-Scans der Prüfkörper aufgenommen. Anschließend wird die Amplitude des Echosignals schichtweise ausgewertet, so dass die Echosignale der Grenzfläche abgeschnitten werden können. Ein Lufteinschluss wird nur dann als detektiert bewertet, wenn die Amplitude seines Echosignals innerhalb einer Schicht vor der Grenzfläche mehr als 6 dB über dem umliegenden Rauschpegel liegt. Die Abbildung 6-22 zeigt die detektierten und die nicht-detektierten Lufteinschlüsse in Abhängigkeit von der Größe des Einschlusses und von der Dicke der darüber liegenden Harzschicht.

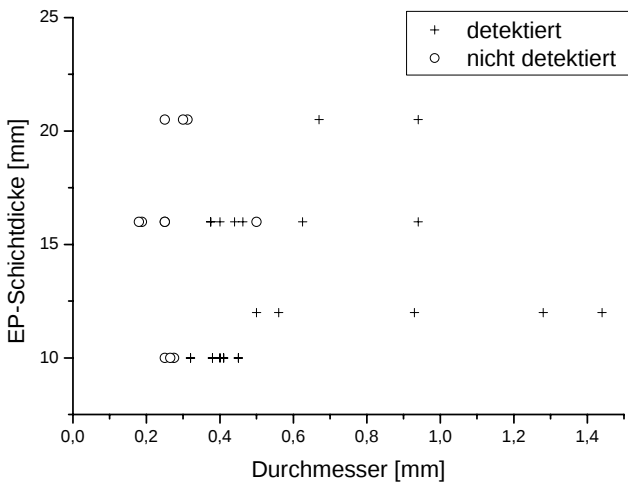


Abbildung 6-22: Detektierbarkeit von Lufteinschlüssen an einer Kupferplatte in EP

Die Grenze der Detektion wird hauptsächlich durch die Größe des Lufteinschlusses bestimmt. Mit dem verwendeten Messsystem ist es möglich, Lufteinschlüsse ab einem Durchmesser von ca. 0,3 mm zu detektieren. Es ist allerdings zu erwarten, dass zu größeren Tiefen hin die Detektierbarkeit auf Grund der Dämpfung der Signale abnimmt.

Um die Materialabhängigkeit zu untersuchen, werden Prüfkörper verwendet, welche Glaskugeln mit Durchmessern aus dem Bereich von 0,125 µm bis 3 mm an einer Metallplatte in Silikonelastomer in verschiedenen Tiefen aufweisen. Das Ergebnisdiagramm ist in Abbildung 6-23 dargestellt.

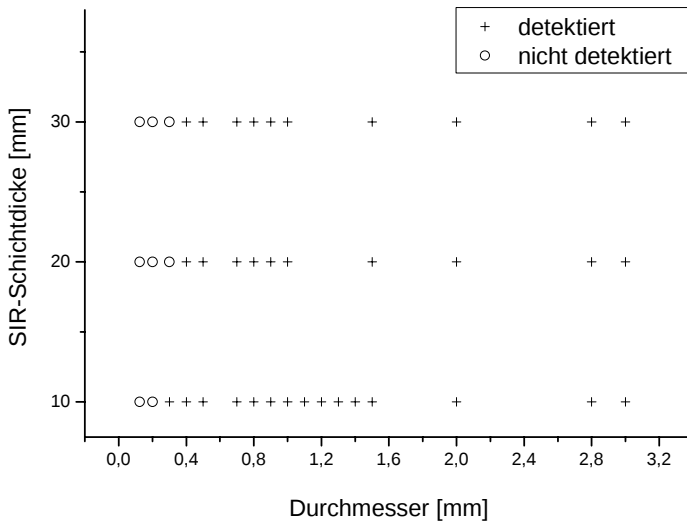


Abbildung 6-23: Detektierbarkeit von Glaskugeln an einer Metallplatte in SIR

Auf Grund der höheren Schallgeschwindigkeit in Silikon als in Epoxidharz und der daraus resultierenden geringeren Wellenlänge sowie Impulsbreite sollte eine Verbesserung der Detektierbarkeit feststellbar sein. Dies lässt sich allerdings nur bedingt bestätigen, die Detektierbarkeit liegt mit einer erkennbaren Fehlergröße ab 0,3 mm im gleichen Bereich. Ein Grund für diesen Effekt liegt darin, dass in Epoxidharz Luftporen untersucht werden, welche auf Grund des höheren Reflexionsfaktors ($|R| = 1$) zu einer höheren Signalamplitude führen als Reflexionen an Glas in Silikon ($|R| = 0,85$).

Die mit dem Amplitudenverfahren untersuchten Prüfkörper aus Silikon werden mit dem Korrelationsverfahren untersucht. Erwartungsgemäß treten keine Phasensprünge an der Grenzfläche auf, es ist jedoch eine signifikante Abnahme des Maximal-Korrelationskoeffizienten im Bereich der Fehlstelle erkennbar. Für die Auswertung der Abnahme, wird für jede Messung die Änderung $\Delta\rho$ des Maximal-Korrelationskoeffizienten im Bereich der Fehlstelle gegenüber dem Maximal-Korrelationskoeffizienten im Umgebungsbereich bestimmt. In dem in Abbildung 6-24 dargestellten Diagramm ist die Änderung $\Delta\rho$ über der Fehlergröße

in Abhängigkeit von der über der Grenzfläche liegenden Silikon-Schichtdicke dargestellt.

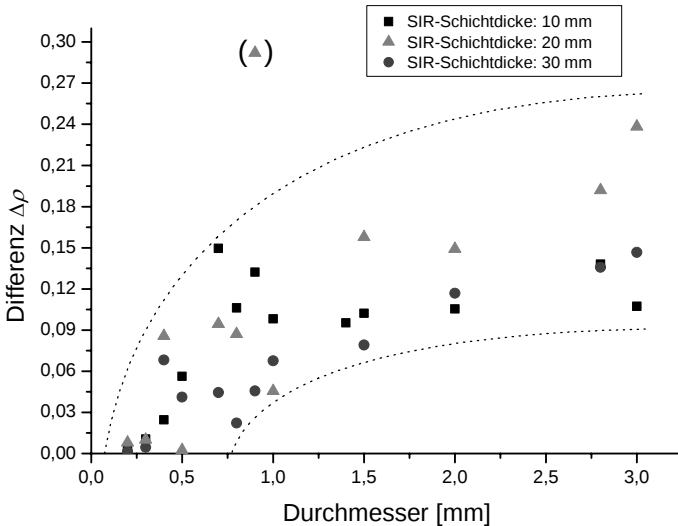


Abbildung 6-24: Änderung des Maximal-Korrelationskoeffizienten auf Grund von Glaskugeln unterschiedlicher Durchmesser an einer Metallplatte in SIR

In der Abbildung 6-24 wird deutlich, dass erwartungsgemäß eine Zunahme der Änderung des Maximal-Korrelationskoeffizienten $\Delta\rho$ bei größeren Fehlstellen auftritt. Ab einer Fehlstellengröße von 0,4 mm ist mit Ausnahme einzelner Messungen eine signifikante Abweichung feststellbar, wobei die Erkennbarkeit mit der Schichtdicke abnimmt. Ab einem Fehlstellendurchmesser von etwa 1,4 mm ist die Änderung bei einer Schichtdicke von 20 mm am größten. Der Effekt kann damit begründet werden, dass bei dieser Schichtdicke die Grenzfläche im Bereich der Fokusslänge in Silikon liegt.

Es ist somit mittels des Korrelationsverfahrens möglich, Fehlstellen an einer Grenzfläche zu detektieren, wobei die Detektierbarkeit im untersuchten Bereich von der Schichtdicke nicht eingeschränkt wird. In jedem Fall muss jedoch die Grenze der Detektierbarkeit eine Fehlstelle in Silikon beachtet werden (vgl.

Abbildung 5-1). Bei Anwendung des Korrelationsverfahrens ist die Detektierbarkeit zwar geringfügig kleiner als bei dem vorgestellten Amplitudenverfahren, allerdings ist wegen der in Abschnitt 6.2.1 genannten Gründe eine Automatisierung mit einem geringeren Aufwand durchführbar. Ferner ist bei der Anwendung des Korrelationsverfahrens vorteilhaft, dass Fehlstellen und Delaminationen innerhalb eines Auswertungsprozesses detektiert werden können.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Untersuchung des Potenzials der Ultraschalldiagnostik zur Zustandsbewertung von polymeren Isoliersystemen. Es werden als Schädigungsformen singuläre Fehlstellen im Isoliervolumen sowie Inhomogenitäten an inneren Grenzflächen betrachtet, welche ein relevantes Schädigungspotenzial hinsichtlich der Isolationsfähigkeit aufweisen. Die Detektion solcher Inhomogenitäten und die Evaluation von den das Schädigungspotenzial bestimmenden Parametern, wie die Bestimmung der Größe eines singulären Fremdstoffeinschlusses und die Ermittlung einer Delamination an einer inneren Grenzfläche, sind in polymeren Isoliersystemen in der Vergangenheit mittels Ultraschall nicht ausreichend untersucht worden. In dieser Arbeit werden Verfahren, welche die vorliegende Prüfaufgabe und die sich daraus ableitenden Randbedingungen berücksichtigen, für die Detektion und Evaluation der beschriebenen Fehlstellen vorgestellt. Diese basieren auf der einen Seite auf einer Modifikation und Weiterentwicklung von Methoden, die sich in ähnlichen Prüfaufgaben bewährt haben, und auf der anderen Seite auf einer Entwicklung neuer Prüfmethoden. Die Analyse der Leistungsfähigkeit der bereitgestellten Verfahren zeigt, dass eine Vielzahl von relevanten Einflüssen auf das Schädigungspotenzial einer Inhomogenität in polymeren Isoliersystemen untersucht und bewertet werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Ultraschall-Messsystem verwendet, welches die automatisierte Durchführung von Ultraschall-Messungen erlaubt. Die Prüfköpfe sind an einem Mikropositioniersystem befestigt, welches ein Scanning mit einer minimalen Schrittweite von 50 μm ermöglicht. Die zu untersuchenden Prüfkörper werden in der Tauchtechnik vermessen, wobei Wasser als Ankoppelmedium verwendet wird. Mittels der entwickelten Software DISCUS wird eine Weiterverarbeitung und Auswertung der Messergebnisse erreicht.

Hinsichtlich der Diagnostik von singulären Inhomogenitäten wird die Detektierbarkeit von faserförmigen Fehlstellen untersucht, mit dem Ergebnis, dass eine

Faser mit einem Durchmesser von 16 μm in Silikon bis zu einer Tiefenlage von 25 mm detektierbar ist. Ferner wird das Auflösungsvermögen des Messsystems mittels der Landoltring-Methode untersucht. Es wird gezeigt, dass das Auflösungsvermögen eine Abhängigkeit von der Tiefenlage und dem Material aufweist und für Silikonelastomer und Epoxidharz im Bereich von 0,8 mm bis 1,5 mm liegt. Dies ist der minimale laterale Abstand, den Fehlerstrukturen aufweisen müssen, um noch aufgelöst werden zu können.

Für eine Evaluation von detektierten singulären Fehlstellen hinsichtlich des Materials wird gezeigt, dass über die Auswertung der Phasenlage der Echosignale gasförmige Fehlstellen in Silikon erkennbar sind. Feststoffeinschlüsse können jedoch mittels Ultraschall nicht hinsichtlich des Materials bewertet werden. Somit besteht nicht die Möglichkeit, eine Aussage über die elektrische Leitfähigkeit des Fremdstoffs zu treffen, welche jedoch eine wesentliche Relevanz für die Beurteilung des Schädigungspotenzials darstellt.

Für die Bewertung der Größe einer detektierten Fehlstelle ist die Vergleichskörpermethode geeignet. Es werden Vergleichskörper aus Silikonelastomer hergestellt, welche definierte kugelförmige und kreisscheibenförmige Musterfehlstellen als Ersatzreflektoren in verschiedenen Tiefenlagen beinhalten. Weil Luftpfeinschlüsse in Silikon in ihrer Form zumeist einer Kugel ähneln, kann über die Angabe der kugelförmigen Ersatzreflektorgröße eine Aussage über die voraussichtlich zu erwartende Fehlergröße getroffen werden. Die Ermittlung der kreisscheibenförmigen Ersatzreflektorgröße erlaubt auf Grund der Eigenschaft des idealen Reflektors die Angabe der minimalen Fehlergröße. Mit der Vergleichskörpermethode werden Fehlstellen unabhängig von der Tiefenlage bewertet, deren Größe im Bereich von 0,2 mm bis 3 mm liegen.

In der elektrischen Energietechnik werden eine Vielzahl von unterschiedlichen Silikonelastomeren verwendet. Es wird deswegen die Thematik untersucht, ob die in einem Silikonelastomer gewonnenen Ergebnisse auf andere Silikonelastomere übertragbar sind. Untersuchungen zur Schallschwächung verschiedener Materialien zeigen signifikante Unterschiede zwischen Silikonelastomeren, so dass für ein zu untersuchendes Material entsprechende Vergleichskörper hergestellt und vermessen werden sollten.

Ferner wird untersucht, ob eine Temperaturabhängigkeit bei der Größenbestimmung mittels der Vergleichskörpermethode vorliegt. Im Ergebnis hat die Temperatur keinen signifikanten Einfluss auf die Schallschwächung und

somit auf die Echoamplitude, allerdings liegt eine Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vor, welche zu $-2,3$ m/s pro Grad Temperaturerhöhung ermittelt wird. Eine Veränderung der Schallgeschwindigkeit führt zu einer fehlerhaften Bestimmung der Tiefenlage, wodurch der Einfluss der Schallschwächung nicht korrekt ermittelt werden kann. Dies führt im Resultat zu einer fehlerhaften Größenbestimmung. Es wird vorgeschlagen, entweder die Prüfobjekte nur bei Raumtemperatur zu untersuchen oder die Temperatur während der Ultraschallmessung zu bestimmen und die Schallgeschwindigkeit dementsprechend anzupassen.

Eine Aussage über die Geometrie und Orientierung einer Fehlstelle kann durch die Anwendung eines Winkelpfprüfverfahrens erreicht werden. Als Bewertungsverfahren wird die Dynamik der Reflektivität über dem Einschallwinkel vorgestellt. Hierbei müssen zunächst Grenzflächeneffekte, wie die Abhängigkeit der Echodurchlässigkeit vom Einschallwinkel oder die Brechung an der Oberfläche des Elastomers, berücksichtigt werden. Es wird gezeigt, dass eine Unterscheidung zwischen flächigen und kugelförmigen Inhomogenitäten unter Angabe der Vorzugsrichtung möglich ist. Eine Unterscheidung zwischen einer ellipsoidförmigen und kugelförmigen Geometrie ist in Silikonelastomeren jedoch mittels dieses Verfahrens nicht möglich.

Hinsichtlich der Diagnostik von inneren Grenzflächen wird ein automatisiertes Verfahren entwickelt, welches Delaminationen detektiert. Das Verfahren basiert auf einem normierten Korrelationsalgorithmus und wertet den an einer Delamination entstehenden Phasensprung durch Ermittlung des Ähnlichkeitsmaßes zwischen Echosignalen aus. Das Verfahren hat die Vorteile, dass es auf Grund der Eigenschaften der Korrelationsfunktion unabhängig von der Echoamplitude ist und die Genauigkeit der Ausrichtung des Betriebsmittels zum Prüfkopf keinen nennenswerten Einfluss auf die Detektion aufweist. Als Ergebnis liefert das Verfahren eine farbskalierte Korrelationskarte (K-Bild) der untersuchten Grenzfläche.

Mittels des Verfahrens können Delaminationen an den Grenzflächen Silikon-Metall, Silikon-Epoxidharz und Epoxidharz-Metall detektiert werden. Voraussetzung für eine Detektion ist jedoch, dass sich eine Gasschicht an der Grenzfläche befindet, so dass ein Phasensprung auftreten kann. Weil Silikonelastomere jedoch auch unter einer Vorspannung auf dem Trägermaterial aufgebracht sein können, besteht die Möglichkeit, dass die Luft durch das Silikon herausgepresst

wird, so dass die Einsetzbarkeit des Verfahrens in diesen Fällen eingeschränkt ist.

Es werden Einflussparameter auf die Anwendbarkeit des Verfahrens analysiert. Es zeigt sich beispielsweise, dass die minimale Ausdehnung der Delamination in Abhängigkeit vom verwendeten Prüfkopf und der Schichtdicke der über der Grenzfläche liegenden Schicht für die Grenzfläche Silikon-Epoxidharz bei 1,5 mm liegt.

Bei der Untersuchung von Betriebsmitteln mit einer inkonstanten Schichtdicke über der Grenzfläche zeigt sich, dass die aus der frequenzabhängigen Dämpfung resultierende Impulsverformung berücksichtigt werden muss, damit Delaminationen fehlerfrei detektierbar sind. Für die Berücksichtigung wird in einer ausreichenden ersten Näherung die Verschiebung der Mittenfrequenz der Schallimpulse verwendet.

Mittels Ultraschall können nicht nur Delaminationen an einer Grenzfläche, sondern auch angrenzende singuläre Inhomogenitäten detektiert werden. Untersuchungen zeigen, dass mit einem amplitudenbasierten automatisierbaren Verfahren durch Ausblendung der Grenzflächensignale kugelförmige Fehlstellen an Grenzflächen ab einem Durchmesser von 0,3 mm detektierbar sind. Bei kleineren Durchmessern werden die Fehlstellensignale von dem Grenzflächensignal verdeckt.

Bei dem amplitudenbasierten Verfahren liegt eine starke Abhängigkeit von der Genauigkeit der Ausrichtung zwischen Prüfkopf und Grenzfläche vor, wodurch die Automatisierbarkeit und Fehlererkennbarkeit eingeschränkt ist. Um diesen Nachteil zu vermeiden, wird untersucht, ob eine Detektion auch mittels des entwickelten Korrelationsverfahrens möglich ist. Es zeigt sich, dass das Korrelationsverfahren zur Detektion von Fehlstellen an Grenzflächen geeignet ist, wobei das Auflösungsvermögen geringfügig niedriger ist als bei dem amplitudenbasierten Verfahren. Vorteilhaft ist allerdings, dass aus dem genannten Grund eine Automatisierung mit einem geringeren Aufwand durchführbar ist.

In zukünftigen Untersuchungen kann erarbeitet werden, ob durch Anwendung einer optimierten Signalverarbeitung und von mathematischen Modellen eine verbesserte Fehlerbewertung möglich ist. Die vorgestellten Fehlerbewertungsmethoden liefern gute Ergebnisse, wenn die Fehlstellenform einer Kugel ähnelt. Je mehr die Geometrie von dieser Form abweicht, desto ungenauer wird die

Bewertung. Es kann in weiterführenden Arbeiten insbesondere an realen Betriebsmitteln untersucht werden, ob sich weitere relevante Einflüsse durch die reale Fehlerbeschaffenheit auf das Bewertungsergebnis ergeben.

Hinsichtlich der Grenzflächenbewertung sind die vorhandenen Verfahren in der Lage, offene Delaminationen zu detektieren. Es wäre allerdings wünschenswert, dass bereits eine verminderte Haftfestigkeit detektierbar ist, da diese in der Regel eine Vorstufe zu einer offenen Ablösung darstellt.

In der vorliegenden Arbeit sind zahlreiche Einflüssen untersucht worden, welche eine Relevanz für das Schädigungspotenzial einer Inhomogenität in einem polymeren Isoliersystem aufweisen. Es bleibt jedoch das Ziel, mittels der Ultraschalldiagnostik eine Zustandsbewertung und somit eine Prognose über die elektrischen Eigenschaften des Isoliersystems eines Betriebsmittels der elektrischen Energietechnik bereitzustellen. Dies kann nur erreicht werden, wenn durch Aufbau einer Wissensbasis Untersuchungen zur Korrelation zwischen den Ergebnissen der Ultraschalldiagnostik und den Ergebnissen des elektrischen Tests an einer Vielzahl von Betriebsmitteln durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- [Adl77] *L. Adler, K. Cook, H. Whaley, R. Mcclung;*
Flaw-Size Measurment in a Weld Sample by Ultrasonic Frequency Analysis;
Materials Evaluation, Bd. 35, S. 44-50, 1977
- [Alt63] *W. Althof;*
Die zerstörungsfreie Prüfung von Metallklebverbindungen mit Ultraschall-Impuls-Echo-Geräten;
DFL-Bericht Nr. 217; Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V.; Braunschweig 1963
- [Ame03] *U. Amerpohl, S. Meyer;*
Design von Mittel- und Hochspannungskabelgarnituren mit Silikonelastomeren;
ETG Fachbericht 93, Silikonelastomere; S. 53-58; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2003
- [Ana00] *N. Anagreh;*
Untersuchungen der Haftfestigkeit von geklebtem glasfaserverstärkten Epoxidharz mit Siliconkautschuken;
Kautschuk, Gummi, Kunststoffe; 53. Jahrgang, Nr. 4, S. 182-193; 2000
- [Auc90] *D. Auckland, B. Varlow, D. Maloney;*
Ultrasonic detection of insulation degradation;
IEE Proceedings; Vol. 137, No. 6, S. 356-360, 1990
- [Auc96] *D. Auckland et al.;*
Application of ultrasound to the inspection of insulation;
IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.; Vol. 143, No. 3, S. 177-181, 1996

- [Bär03] *R. Bärsch;*
Bewertung der Hydrophobie sowie des Kriechstromverhaltens von Silikonelastomeren für Hochspannungs-Freiluftisolatoren;
ETG Fachbericht 99, Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen;
S. 97-108; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2005
- [Bau03] *J. Baumann, U. Netzelmann;*
Zerstörungsfreie Prüftechniken für Materialverbunde;
Ergebnisbericht des Verbundprojektes Zerstörungsfreie Prüftechniken für Materialverbunde (ZfP); Karlsruhe 2003
- [Ben67] *H.-G. Benken;*
Über die elektrische Festigkeit von Fugen zwischen festen Isolierstoffen;
Dissertation; TU Berlin, 1967
- [Ben02] *M. Benz;*
Ultraschall zur Erfassung innerer Freiformgeometrien auf Werkzeugmaschinen;
Dissertation; RWTH Aachen, Shaker Verlag, Aachen 2002
- [Ber49] *L. Bergmann;*
Der Ultraschall;
S. Hirzel Verlag; Stuttgart 1949
- [Ber00] *M. Berke;*
Nondestructive Material Testing with Ultrasonics;
in: ndt.net, The e-Journal of Nondestructive Testing,
Sept. 2000, Vol. 5, No. 09
Link: www.ndt.net/article/v05n09/berke/berke1.htm
(Stand 10.12.06)
- [Bey83] *M. Beyer et al.;*
Epoxidharze in der Elektrotechnik;
Expert Verlag; Grafenau 1983
- [Bey86] *M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl;*
Hochspannungstechnik;
Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York 1982

- [Bic93] *J. Bicerano;*
Prediction of Polymer Properties;
Marcel Dekker; New York, Basel 1993
- [Bit98] *E. Bittmann;*
Siliconmodifizierung thermisch und UV-härtender Epoxidharze;
Dissertation; Universität Erlangen-Nürnberg 1998
- [Bli96] *J. Blitz, G. Simpson;*
Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing;
Chapman & Hall Ltd.; London 1996
- [Bho88] *A. Bhowmick, H. Stephens;*
Handbook of Elastomers;
Marcel Dekker; New York, Basel 1988
- [Blu94] *H. Blumenauer;*
Werkstoffprüfung;
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie; Stuttgart 1994
- [Boe01] *R. Boehm, H. Wüstenberg, A. Erhard, G. Brekow, U. Tessaro;*
Überlegungen zur Fehlergrößenbestimmung bei rissartigen Fehlern im Plattierungsbereich mit TOFD;
DGZfP Jahrestagung, Berlin, Mai 2001; Berichtsband 75; 2001
- [Bri75] *C. Brinkmann;*
Die Isolierstoffe der Elektrotechnik;
Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York 1975
- [Bro89] *W. Brockmann, L. Dorn, H. Käufer;*
Kleben von Kunststoffen mit Metallen;
Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York 1989
- [Bur03] *H.-P. Burgener;*
Das Teilentladungsverhalten in Mikrohöhlräumen polymerer Isoliermaterialien;
Dissertation; ETH Zürich; Hartung-Gorre Verlag; Konstanz 2003

- [Car96] *L. Cartz;*
Nondestructive Testing;
ASM International; Materials Park, OH, USA 1996
- [Car03] *J. Cardinaels, M. Baesch;*
Einsatz von Silikonelastomeren bei Mittel- und Hochspannungsgarnituren in Kaltschrumpftechnik;
ETG Fachbericht 93, Silikonelastomere; S. 65-68; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2003
- [Che05] *S. Chen, L. Hallum, N. Lovell, G. Suaning;*
Visual Acuity Measurement of Prosthetic Vision: A Virtual-reality simulation Study;
Journal of Neural Engineering; Bd. 2, S. 135-145, 2005
- [Cor02] *C. Cornelissen, A. Schnettler;*
Neue Verfahren zur Zustandsbewertung von Kabelsystemen: Ultraschall und Kernspinresonanz;
ETG-Fachbericht 87, Diagnostik elektrischer Betriebsmittel; S. 269-272; VDE Verlag GmbH; Berlin, Offenbach 2002
- [Cor03a] *C. Cornelissen;*
Ultraschalldiagnostik als neues Verfahren zur Zustandsbewertung elastomerer Isolierstoffe in Energiekabelsystemen;
Dissertation; RWTH Aachen, 2003
- [Cor03b] *C. Cornelissen;*
Ultraschall-Diagnostik an polymeren Kabelisoliersystemen;
Int. ETG-Kongress; ETG-Fachbericht 94, S. 351-360, 2003
- [Cor04a] *C. Cornelissen, T. Wirz, A. Schnettler, I. de Schrijver;*
Ultrasonic for quality assessment of HV-joints;
Cigré 2004 session, Paris 2004

- [Cor04b] *C. Cornelissen, T. Wirz, P. Walter, A. Schnettler;*
Automatisierte Ultraschalldiagnostik zur Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel;
ETG-Fachbericht 97, Diagnostik elektrischer Betriebsmittel;
S. 197-202; VDE Verlag, Berlin, Offenbach 2004
- [Cor06] *C. Cornelissen, T. Wirz, A. Schnettler, I. de Schrijver, F. Claeys;*
Industrial Testing of High Voltage Joints Using Ultrasound;
Cigré 2006 session, Beitrag D1 - 103, Paris 2006
- [Cro84] *H.-A. Crostack, W. Oppermann, W. Roye;*
Ultraschallmehrfrequenztechnik – Ansätze zu einer verbesserten Fehlerbeschreibung;
Schweißen und Schneiden, Bd. 36, Heft 11, S. 514-518, 1984
- [DIN01a] *DIN EN 583-5;*
Ultraschallprüfung, Teil 5: Beschreibung und Größenbestimmung von Inhomogenitäten;
Deutsches Institut für Normung, 2001
- [DIN01b] *DIN EN 583-6;*
Ultraschallprüfung, Teil 6: Beugungslaufzeittechnik, eine Technik zum Auffinden und Ausmessen von Inhomogenitäten;
Deutsches Institut für Normung, 2001
- [Deu95] *V. Deutsch, M. Vogt;*
Ultraschallprüfung von Schweißnahtverbindungen;
Deutscher Verlag für Schweißtechnik; Düsseldorf 1995
- [Deu97] *V. Deutsch, M. Platte, M. Vogt;*
Ultraschallprüfung - Grundlagen und industrielle Anwendung;
Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York 1997
- [Eng98] *K. Engel;*
Bewertung von spaltförmigen Isolierstoffdefekten;
Dissertation; Universität Dortmund, 1998

- [Erm72] *I. N. Ermolov;*
The reflection of ultrasonic waves from targets of simple geometry;
non-destructive testing; April, S. 87-91, 1972
- [Faß96] *S. Faßbender, W. Arnold;*
Bestimmung der Haftung von Materialverbund mittels Ultraschall;
in: ndt.net, The e-Journal of Nondestructive Testing, Mai 1996, Vol. 1, No. 05;
Link: www.ndt.net/article/fassb/fassb.htm (Stand 10.12.06)
- [Fis78] *P. Fischer, K. Nissen;*
Teilentladungskenngrößen künstlicher Hohlräume in Polyäthylen;
ETZ-A; Bd. 99; Nr. 8; S. 475-480; 1978
- [Fra89] *I. Franta;*
Elastomers and Rubber Compounding Materials;
Elsevier; Amsterdam 1989
- [Fra00] *A. Franck;*
Kunststoff-Kompodium;
Vogel Verlag; Würzburg 2000
- [Fre65] *J. R. Frederick;*
Ultrasonic Engineering;
John Wiley & Sons, Inc.; New York, London, Sydney 1965
- [Gan01] *T. Gan, D. Hutchins, D. Billson, F. Wong;*
Ultrasonic Tomographic Imaging of an Encased Highly Attenuating Medium;
Res. Nondestr. Eval., Vol. 13, S. 131-152, 2001
- [Ger63] *O. Gericke;*
Determination of the Geometry of Hidden Defects by Ultrasonic Pulse Analysis Testing;
The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 35, Nr. 3, S. 364-368, 1963

- [Ger05] *F. Gerdinand, M. Budde;*
Verbesserung der Langzeitbeständigkeit von Epoxidharzenverbundsystemen für den Freiluftbereich durch Optimierung der inneren Grenzflächen;
ETG Fachbericht 99, Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen; S. 153-158; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2005
- [Gin02] *E. Ginzel;*
Ermolov Sizing Equations Revisited;
in: ndt.net, The e-Journal of Nondestructive Testing,
Jan. 2002, Vol. 7, No. 01;
Link: <http://www.ndt.net/article/v07n01/ginzel/ginzel.htm>
(Stand 10.12.06)
- [Goc04] *E. Gockenbach;*
Grundlagen für die Diagnostik;
ETG Fachbericht 97, Diagnostik elektrischer Betriebsmittel; S. 11-20; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2004
- [Goh03] *W. Gohl, K. Spies;*
Elastomere – Dicht- und Konstruktionswerkstoffe;
Expert Verlag; Renningen 2003
- [Gro81] *B. Grohs, O. Barbian, W. Kappes, H. Paul;*
Fehlerbeschreibung nach Art, Lage und Dimension mit Hilfe von Laufzeit-Ortskurven aus Ultraschallprüfungen – ALOK-Teil 2;
Materialprüfung 23; Nr.12, S. 427–432, 1981
- [Gor99] *R. Gorur, E. Cheney, J. Burnham;*
Outdoor Insulators;
Ravi Gorur Inc.; Phoenix 1999
- [Grü05] *D. von Grünigen;*
Digitale Signalverarbeitung;
Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag; Leipzig 2005

- [Han97] *S.-I. Han, J.-Y. Yoon, K.-S. Park, S.-O. Han;*
Surface degradation of silicone rubber under accelerated aging condition;
IEEE Annual Report 1997; Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; Minneapolis, 1997
- [Hao05] *Y. Hao, G. Wang, Z. Jia and H. Xie;*
Application of Ultrasonic Pulse-echo Method to Insulation Condition Diagnosis for Large Generators;
IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, pp. 104-113, 2005
- [Has91] *O. Hasenpusch;*
Hochspannungstechnik;
Franzis Verlag; München 1991
- [Hec97] *A. Hecht;*
Time of Flight Diffraction Technique (TOFD) – An Ultrasonic Testing Method for all Applications?;
in: ndt.net, The e-Journal of Nondestructive Testing,
Sept. 1997, Vol. 2, No. 09;
Link: <http://www.ndt.net/article/tofd/hecht/hecht.htm>
(Stand 10.12.06)
- [Hof89] *R. Hoffmann, W. Gebhardt, F. Walte;*
Bewertung der Ultraschallanzeigen bei der LLT-Technik;
DGZfP Jahrestagung 1989, Berichtsband 18, S. 491-496, 1989
- [Hof99] *G. Hofmann, A. Hartmann;*
Elastomerwerkzeugoberflächen und Formenverschmutzung;
Elastomerverarbeitung – vom Konzept zur Serie; 17. Jahrestagung der VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik; S. 161-185; VDI Verlag, Düsseldorf 1999
- [Hom95] *V. Homburg;*
Makroskopische Grenzflächen zwischen festen Isolierstoffen;
Fortschrittsberichte VDI; VDI Verlag; Düsseldorf 1995

- [Huh00] *C.-H. Huh; B.-H. Youn, S.-Y. Lee;*
Degradation in Silicone Rubber Used for Outdoor Insulator by UV Radiation;
IEEE Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials; Xi'an, China 2000
- [Jac05] *O. Jacobs;*
Werkstoffkunde;
Vogel Fachbuch; Würzburg 2005
- [Jah69] *H. Jahn;*
Epoxidharze;
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie; Leipzig 1969
- [Jan01] *H. Janssen;*
Ursache und Lebensdauer der Hydrophobie polymerer Werkstoffe für Hochspannungs-Freiluftisolatoren;
Dissertation; TU Braunschweig 1999; Shaker Verlag, Aachen 2001
- [Jan03] *H. Janssen;*
Stand der Technik und Entwicklungstrends von Silikonisolatoren für Freilufttechnik;
ETG Fachbericht 93, Silikonelastomere; S. 79-87; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2003
- [Joh04] *F. Johannaber, W. Michaeli;*
Handbuch Spritzgießen;
Carl Hanser Verlag; München, Wien 2004
- [Kau05] *J. Kaumanns, G. Schröder;*
Bedeutung von Grenzflächen bei Design, Entwicklung, Prüfung und Inbetriebnahme von Hochspannungs-Kabelgarnituren;
ETG Fachbericht 99, Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen; S. 201-206; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2005
- [Kin82] *D. Kind, H. Kärner;*
Hochspannungs-Isoliertechnik;
Vieweg Verlag; Braunschweig, Wiesbaden 1982

- [Kin03a] *J. Kindersberger*;
Silikonelastomere für Kabelgarnituren, Isolatoren und Überspannungsableiter – Profil einer Werkstofffamilie;
ETG Fachbericht 93, Silikonelastomere; S. 7-15; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2003
- [Kin03b] *J. Kindersberger*;
Stand und Tendenzen der Prüfung von Kunststoffen für Freiluftisolierungen;
Highvolt Kolloquium '03; Beitrag 4.2, S. 121-131; Dresden Mai 2003
- [Kle98] *W. Kleemann, K. Weber*;
Elastomer Processing;
Carl Hanser Verlag; München 1998
- [Koc96] *S. Košič, Z. Figura*;
Ultrasonic Measurements and Technologies;
Chapmann Hall Ltd.; London 1996
- [Kok04] *A. Koka et al.*;
US-Detektion von Klebverbindungsfehlern und deren Auswirkung auf die Beanspruchbarkeit der Verbindung;
DGZfP Jahrestagung, Salzburg, Mai 2004, Berichtsband 89, 2004
- [Kön93] *D. König, Y. Rao*;
Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik;
VDE Verlag; Berlin, Offenbach 1993
- [Kra59] *J. Krautkrämer*;
Fehlergrößenermittlung mit Ultraschall;
Archiv für das Eisenhüttenwesen 30; Heft 11, S. 693-703, 1959
- [Kra86] *J. Krautkrämer, H. Krautkrämer*;
Werkstoffprüfung mit Ultraschall;
Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York 1986

- [Kra01] *Krautkrämer GmbH & Co.;*
Prüfköpfe, Nr. BL1 8/01 TD;
Krautkrämer GmbH & Co.; Hürth 2001
- [Küb78] *B. Kübler;*
Teilentladungsverhalten von Modellanordnungen aus Epoxidharz-Formstoff mit natürlichen Fehlstellen;
Dissertation; TU Braunschweig, 1978
- [Küc05] *A. Küchler;*
Hochspannungstechnik;
Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York 2005
- [Kuh97] *M. Kuhl;*
Aufbau, Eigenschaften und Betriebseinsatz von modernen Verbundisolatoren mit einer Schirmhülle aus Silikonelastomer;
ETG Fachbericht 68, Silikonelastomere; S. 67-72; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 1997
- [Küh06] *E. Kühncke;*
Ultraschall 1;
Skript zur Vorlesung „Technische Akustik“ der TU Dresden, 2006
Link: <http://www.ias.et.tu-dresden.de/akustik/Skripte/Ultraschall>
(Stand 10.12.06)
- [Kun04] *T. Kundu;*
Ultrasonic Nondestructive Evaluation;
CRC Press; Boca Raton, FL, USA 2004
- [Kur92] *M. Kurrat;*
Energy Considerations for Partial Discharges in Voids;
European Transactions on Electrical Power (ETEP); Vol. 2, Nr. 1,
S. 39-44, 1992
- [Kur93] *M. Kurrat;*
Modellierung und Messung in Hohlräumen zur Bestimmung schädigungsrelevanter Energien;
Dissertation; Universität Dortmund, 1993

- [Kur03] *N. Kurda*;
**Anforderungsprofil von Silikonelastomeren aus verfahrens-
technischer Sicht**;
ETG Fachbericht 93, Silikonelastomere; S. 45-52; VDE Verlag;
Berlin, Offenbach 2003
- [Kut83] *J. Kutzner*;
Grundlagen der Ultraschallphysik;
B. G. Teubner; Stuttgart 1983
- [Kut88] *H. Kuttruff*;
Physik und Technik des Ultraschalls;
S. Hirzel Verlag; Stuttgart 1988
- [Lam03] *J. Lambrecht, P. Wolf, e. Gerlach*;
Chemische Eigenschaften von Siliconelastomeren;
ETG Fachbericht 93, Silikonelastomere; S. 17-27; VDE Verlag;
Berlin, Offenbach 2003
- [Lan05] *K. Langenberg, R. Marklein, U. Mletzko, W. Müller, V. Schmitz*;
**Fehlerabbildung in Mischschweißnähten mit einem angepassten
SAFT-Algorithmus**;
DGZfP Jahrestagung, Rostock, Mai 2005, Berichtsband 94, 2005
- [Leh73] *W. Lehfeldt*;
Ultraschall, kurz und bündig;
Vogel Verlag; Würzburg 1973
- [Lim89] *A. Limper, P. Barth, F. Grajewski*;
Technologie der Kautschukverarbeitung;
Carl Hanser Verlag; München, Wien 1989
- [Loo88] *J. Looms*;
Insulators for High Voltages;
P. Peregrinus Ltd.; London 1988
- [Lük92] *H. Lüke*;
Korrelationssignale;
Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York 1992

- [Mar05] *K. Mardira, T. Saha, R. Sutton;*
Investigation of Diagnostic Techniques for Metal Oxide Surge Arresters;
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation; Vol. 12;
No. 1; S. 51-59; February 2005
- [Mas54] *W. Mason;*
Piezoelectric Crystals and Their Application to Ultrasonics;
D. van Nostrand Company; Toronto, New York, London 1954
- [May88] *C. May;*
Epoxy Resins;
Marcel Dekker; New York 1988
- [Mcg94] *T. McGrail;*
Ultrasonic NDT for defects/degradation in insulation;
IEE Colloquium on Characterisation of Dielectric Materials: a Review, S. 1/1-1/5, 1994
- [Men83] *G. Menges, W. Benfer;*
Formenverschmutzung beim Spritzgießen von Elastomeren;
GAK – Gummi, Fasern, Kunststoffe; Nr. 4, Jahrgang 36, S. 161-168, 1983
- [Men98] *B. Menz;*
Modellbasierte Objekterkennung mit 3-dimensionalen Ultraschall-Arrays;
Fortschrittsberichte VDI, Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik; Nr. 693; VDI Verlag; Düsseldorf 1998
- [Mic90] *W. Michaeli, M. Wegener;*
Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe;
Carl Hanser Verlag; München, Wien 1990
- [Mic92] *W. Michaeli, H. Greif, H. Kaufmann, F.-J. Vossebürger;*
Technologie der Kunststoffe;
Carl Hanser Verlag; München, Wien 1992

- [Mic01] *W. Michaeli, H. Greif, G. Kretzschmar, F. Ehrig;*
Injection Molding;
Carl Hanser Verlag; München, Wien 2001
- [Mil87] *R. Millner;*
Ultraschalltechnik – Grundlagen und Anwendung;
Physik Verlag; Weinheim 1987
- [Möh05] *N. Möhring, H. Haupt, V. Hinrichsen, C. Berger;*
Wasserdampfdichtigkeit und mechanische Schädigungsgrenzen von Komposithohlisolatoren;
ETG Fachbericht 99, Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen; S. 17-27; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2005
- [Mon00] *S. Mondal, T. Sattar;*
An Overview on TOFD Method and its Mathematical Model;
in: ndt.net, The e-Journal of Nondestructive Testing,
April 2000, Vol. 5, No. 04;
Link: www.ndt.net/article/v05n04/mondal/mondal.htm
(Stand 10.12.06)
- [Mro97] *A. Mrozek;*
Moderne Verarbeitungsverfahren für Silicon-Elastomere;
ETG Fachbericht 68, Silikonelastomere; S. 15-20; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 1997
- [Net03] *U. Netzelmann, D. Bruch;*
Verbesserte Erkennung schwacher Haftung an Grenzflächen durch photothermisch modulierte Ultraschallreflexion;
DGZfP Jahrestagung, Mainz, Mai 2005, Berichtsband 83, 2003
- [Nie91] *L. Nielsen, R. Landel;*
Mechanical Properties of Polymers and Composites;
Marcel Dekker Inc.; New York 1991
- [Oel05] *T. Oelschlägel, H. Hintze, T. Heckel, J. Becker;*
Perspektiven der Gruppenstrahlertechnik bei der Prüfung von Radsatzwellen mit Längsbohrung;
DGZfP Jahrestagung, Rostock, Mai 2005, Berichtsband 94, 2005

- [Oes97] *J. Oesterheld;*
Silikonelastomere unter hohen elektrischen Beanspruchungen;
ETG Fachbericht 68, Silikonelastomere; S. 31-38, VDE Verlag;
Berlin, Offenbach 1997
- [Ohm05] *J. Ohm, H. Lüke;*
Signalübertragung;
Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York 2005
- [Pan94] *S. Pangraz;*
**Entwicklung eines Ultraschallverfahrens zur zerstörungsfreien
quantitativen Bestimmung der Haftfestigkeit von Materialver-
bunden;**
Dissertation; Universität des Saarlandes, Saarbrücken 1994
- [Pes98] *E. Peschke, R. v. Olshausen;*
Kabelanlagen für Hoch- und Höchstspannung;
Publicis MCD Verlag; Erlangen, München 1998
- [Ric97] *U. Richter;*
Zerstörungsfreie Prüfung von Gummi-Stahl-Klebeverbindungen;
DGZfP Jahrestagung 1997, Berichtsband 59, S. 589-595, 1997
- [Rok93] *S. Rokhlin, S. Datta, Y. Rajapakse;*
Ultrasonic Characterization and Mechanics of Interfaces;
The American Society of Mechanical Engineers; The ASME Win-
ter Annual Meeting, New Orleans 1993
- [Roy03] *W. Roye, U. Schlengeremann;*
**Rechnerunterstützte Ultraschallprüfung: Ultraschall-
Spektralanalyse und Resonanzmessung;**
DGZfP Jahrestagung, Mainz, Mai 2003; Berichtsband 83; 2003
- [Rug03] *R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH;*
Handbuch Faserverbundwerkstoff;
R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH; Edition 8; Waldenbuch
2003

- [Rüm96] *S. Rümenapp*;
Automatisierte Ultraschallprüfung von Faserverbundwerkstoffen;
Dissertation; RWTH Aachen; Shaker Verlag, Aachen 1996
- [Schic88] *A. Schick*;
Korrelation von Ultraschall- und Wärmeleitungsmessungen zur Charakterisierung technischer Berührflächen;
Dissertation, TU München; München 1988
- [Schie70] *K. Schiebold, H.-D. Tietz*;
AVG-Vorsatzskalen zur Fehlergrößenabschätzung bei der Ultraschallprüfung von Schmiedestücken;
Neue Hütte 15; Heft 9, S. 557-560, 1970
- [Schle73a] *U. Schlengermann, R. Frielinghaus*;
Beitrag zur Fehlergrößenbestimmung mit Ultraschall durch Fehlerabtastung mit relativer Schwelle;
Materialprüfung 15; Nr. 2, S. 50-56, 1973
- [Schle73b] *U. Schlengermann*;
Über die Verwendung der Begriffe Nahfeld und Fernfeld in der Ultraschall-Werkstoffprüfung;
Materialprüfung 15; Nr. 5, S. 161-166, 1973
- [Schle92] *U. Schlengermann*;
Ultraschall-Werkstoffprüfung;
Vulkan Verlag; Essen 1992
- [Schle96] *U. Schlengermann*;
Characterization of Reflectors by Ultrasonic Methods;
in: ndt.net, The e-Journal of Nondestructive Testing,
Dez. 1996, Vol. 1, No. 12
Link: <http://www.ndt.net/article/schleng/schleng.htm>
(Stand 10.12.06)

- [Schme98] *L. W. Schmerr, Jr.;*
Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation;
Plenum Press; New York, London 1998
- [Schmi00] *V. Schmitz, S. Chakhlov, W. Müller;*
Experiences with synthetic aperture focusing technique in the field;
Ultrasonics; Vol. 38, S. 731-738, 2000
- [Schne93] *A. Schnettler;*
Über den Einsatz Multivariater Statistik und Neuronaler Netze zur Teilentladungsdiagnostik;
Dissertation, Universität Dortmund; Shaker Verlag, Aachen 1993
- [Scho50] *A. Schoch;*
Schallreflexion, Schallbrechung und Schallbeugung;
Ergebnisse der exakten Naturwissensch., Bd. 13, S. 127-234; 1950
- [Schr85] *J. Schramm;*
Über den Einfluß von Mikrohohlräumen auf die elektrische Festigkeit glasfaserverstärkter Epoxidharz-Formstoffe;
Dissertation; TU Braunschweig, 1985
- [Schu96] *V. Schuster;*
Untersuchungen zur verbesserten Fehlerbeschreibung mit der akustischen Holographie;
Dissertation, Universität Dortmund; Verlag Natur & Wissenschaft Harro Hieronimus & Dr. Jürgen Schmidt; Solingen 1996
- [Schu99] *W.-D. Schuppe, W. Weißenberg;*
Innere Grenzflächen in Kabeln und Garnituren;
ETG Fachbericht 76, Einfluß von Grenzflächen auf die Lebensdauer elektrischer Isolierungen; S. 45-49; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 1999

- [Schü99] *A. Schütz, J. Seifert;*
Grenzflächen in gefüllten und faserverstärkten Kunststoffen;
ETG Fachbericht 76, Einfluß von Grenzflächen auf die Lebensdauer elektrischer Isolierungen; S. 37-44; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 1999
- [Schw05a] *O. Schwarz, F. Ebeling;*
Kunststoffkunde;
Vogel Buchverlag; Würzburg 2005
- [Schw05b] *O. Schwarz, F. Ebeling, B. Furth;*
Kunststoffverarbeitung;
Vogel Buchverlag; Würzburg 2005
- [Sei99] *J. Seifert;*
Grenzflächen- und Verbundprobleme in mineralisch gefüllten Epoxidharzformstoffen;
Dissertation; TU Braunschweig 1998; Shaker Verlag, Aachen 1999
- [Sek04] *A. Sekso-Telento;*
Unusual experience with HV insulators under extreme service & environmental conditions in Croatia;
INMR; Vol. 12, Nr. 3, S. 44-49, 2004
- [Smi03] *C. Smith et al.;*
The development of an ultrasound quality monitoring process for the manufacture of enhanced reliability HV and EHV XLPE cables;
Jicable'03, 6th International Conference on Insulated Power Cables, Beitrag A.2.6; Juni 2003
- [Sta03] *G. Stauch;*
Extrudierte Muffen aus SiR;
ETG Fachbericht 93, Silikonelastomere; S. 73-78; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2003

- [Sta04] *C. Starke*;
Ultraschall-Analyse des Formteilbildungsprozesses beim Thermoplast-Spritzgießen;
Dissertation; RWTH Aachen; IKV-Berichte aus der Kunststoffverarbeitung, Bd. 160; Verlagshaus Mainz GmbH, Aachen 2004
- [Ste93] *S. Steeb et al.*;
Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung;
Expert Verlag; Ehningen 1993
- [Ste00] *T. Stepinski, L. Ericsson*;
Signal Processing for Ultrasonic Testing of Material with Coarse Structure;
Proceedings of 15th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT), Rom Oktober 2000
- [Ste03a] *K. Steinfeld, B. Kruska, V. Hinrichsen*;
Bauarten silikonisierter Überspannungsableiter;
ETG Fachbericht 93, Silikonelastomere; S. 109-118; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2003
- [Ste03b] *H. Steinberger*;
Elektrisch leitfähige Siliconelastomere;
ETG Fachbericht 93, Silikonelastomere; S. 37-44; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2003
- [Sti01] *S. Stitz, W. Keller*;
Spritzgießtechnik;
Carl Hanser Verlag; München, Wien 2001
- [Str97] *W. Straßberger, H.-J. Winter*;
Silikonelastomere in der Mittel- und Hochspannungstechnik;
ETG Fachbericht 68, Silikonelastomere; S. 7-14; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 1997

- [Str99] *H. Straube, R. Heinemeyer, H.-J. Klös;*
Verhalten von Grenzflächen zwischen Werkstoffen mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften – Beispiel eingegossener Vakuumschalter;
ETG Fachbericht 76, Einfluß von Grenzflächen auf die Lebensdauer elektrischer Isolierungen; S. 259-265; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 1997
- [Szi82] *J. Szillard;*
Ultrasonic Testing;
John Wiley & Sons; Chichester 1982
- [Tak05] *T. Takahashi, T. Okamoto, Y. Ohki, K. Shibata;*
Breakdown Strength at the Interface between Epoxy Resin and Silicone Rubber;
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation; Vol. 12, Nr. 4, S. 719-724; August 2005
- [Thu90] *R. Thurston, A. Pierce;*
Ultrasonic Measurements Methods;
Academic Press Inc.; Boston, San Diego, New York 1990
- [Tie71a] *H. D. Tietz;*
Methoden der Fehlergrößenabschätzung mit Ultraschall, vergleichende und kritische Betrachtungen;
Wissen. Zeitschrift der Techn. Hochsch. Magdeburg 15, S.429-446, 1971
- [Tie71b] *H. D. Tietz;*
Fehlergrößenabschätzung mit Ultraschall nach einem Kugeler-satzfehler;
Feingerätetechnik 20; Heft 10, S. 463-467, 1971
- [Tom90] *A. Tomanek;*
Silicone & Technik;
Carl Hanser Verlag; München 1990

- [Töp03] *J. Töpker;*
Ultraschallmesstechnik zur Online-Erfassung und Analyse des Injektions- und Härungsablaufs beim Resin Transfer Moulding;
Dissertation; RWTH Aachen; IKV-Berichte aus der Kunststoffverarbeitung, Bd.137; Verlagshaus Mainz GmbH, Aachen 2003
- [Trö05] *A. Tröger, C. Cornelissen, A. Schnettler, H. Negle;*
Application of Syntactic Foam as High Performance Insulating Material: Microscopic and Electric Properties;
HVDC-Symposium, Delft, Niederlande Oktober 2005
- [Uen06] *H. Ueno, P. Walter, C. Cornelissen, A. Schnettler;*
Resolution Evaluation of Ultrasonic Diagnosis Tools for Electrical Insulation Devices and the Detection of Electrical Trees;
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation; angenommener Beitrag, 2006
- [Vog99] *H. Vogel;*
Gerthsen Physik;
Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York 1999
- [Wac00] *Wacker-Chemie GmbH;*
Grundierungen für Wacker RTV-2 Siliconkautschuk;
Wacker-Chemie GmbH; Merkblatt Nr. 5257 8.00; Burghausen 2000
- [Wac02] *Wacker-Chemie GmbH;*
Siliconkautschuk für die Mittel- und Hochspannungstechnik;
Wacker-Chemie GmbH; Informationsbroschüre Nr. 6004d/1102; Burghausen 2002
- [Wac04] *Wacker-Chemie GmbH;*
Datenblätter zu den verwendeten Silikonelastomeren;
ELASTOSI LR 3002/35 A,B; Version 2.00 / 30-04-04 / Gr;
POWERSIL 600 A/B; Version 3.00 / 01-02-06 / pm;
POWERSIL XLR 630 A/B; Version 3.00 / 01-02-06 / pm;
POWERSIL 660 A/B gray; Version 3.00 / 16-02-04 / Wi;
POWERSIL 665 A/B; Version 3.00 / 16-02-04 / Wi;
Wacker-Chemie GmbH; 2004/2006

- [Wal00] *B. Waldron, G. Kauth;*
Ultraschall-Array-Technik für industrielle Anwendungen;
ZfP-Zeitung 69, S. 50-52, März 2000
- [Wal03] *H. Walter;*
Morphologie-Zähigkeits-Korrelationen von modifizierten Epoxidharzsystemen mittels bruchmechanischer Prüfmethode an Miniaturprüfkörpern;
Dissertation; Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale) 2003
- [Wal05a] *P. Walter, T. Wirz, C. Cornelissen, A. Schnettler;*
Evaluation Algorithms for Ultrasonic Condition Assessment of Polymeric Insulation Systems;
14th International Symposium of High Voltage Engineering (ISH), Peking, China, August 2005
- [Wal05b] *P. Walter, T. Wirz, C. Cornelissen, A. Schnettler;*
Zustandsbewertung innerer Grenzflächen mittels Ultraschall;
ETG Fachbericht 99, Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen; S. 247-252; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2005
- [Wat98] *E. Watanabe, T. Moriya, M. Yoshizawa;*
Ultrasonic Visualization Method of Electrical Trees Formed in Organic Insulating Materials;
IEEE Trans. on DEI.; Vol. 5, No. 6, S. 767-773, 1998
- [Wen05] *A. Wendemuth;*
Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung;
Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York 2005
- [Wes01] *G. Westheimer;*
Updating the Classical Approach to Visual Acuity;
Clinical and Experimental Optometry, Bd. 84, S. 258-263, 2001
- [Wiz02] *F. Wiznerowicz;*
Kabeltechnik auf der Cigré 2002;
Elektrizitätswirtschaft; Vol. 101, No. 26, 2002, S. 36-41

- [Wir06] *T. Wirz, P. Walter, C. Cornelissen, A. Schnettler;*
Automated Ultrasonic Diagnosis for Condition Assessment of Electrical Insulation Systems;
9th European Conference on Non-Destructive Testing, Berlin, September 2006
- [Wos05] *R. Woschnitz, M. Muhr, C. Sumereder;*
Quality Control of XLPE Cables by means of Impulse Voltage Test;
ETG Fachbericht 99, Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen; S. 213-215; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2005
- [Wu05] *J. Wu, C. Cornelissen, A. Schnettler;*
Untersuchungen des Überschlagverhaltens nanostrukturierter Lotus-Effekt-Isolieroberflächen;
ETG Fachbericht 99, Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen; S. 61-66; VDE Verlag; Berlin, Offenbach 2005
- [Yas67] *T. Yasui, Y. Yamada;*
Theoretical Analysis and Experiments on the Internal Discharge in a Spherical Void;
Sumitomo Electric Technic. Review, Nr. 10, 1967
- [Zwe00] *T. Zweschper;*
Zerstörungsfreie und berührungslose Charakterisierung von Fügeverbindungen mittels Lockin Thermografie;
ZFP-Zeitung 71; S. 43-46; Oktober 2000

Anhang A: Ergänzungen zu Abschnitt 5.2.2

Fehlerrechnung

In Abschnitt 5.2.2 wird beschrieben, dass eine Temperaturänderung einen Einfluss auf die Größenbestimmung von Fehlstellen nach der Vergleichskörpermethode aufweist. Die Diagramme zur Bestimmung der Ersatzreflektorgröße wurden bei Raumtemperatur ($T = 22^\circ\text{C}$) ermittelt. Durch die steigende Temperatur wird die Schallgeschwindigkeit verringert, wodurch sich die gemessene Laufstrecke eines reflektierten Echoimpulses einer Fehlstelle verlängert, obwohl der physikalische Ort unverändert geblieben ist. Eine geringe Ausdehnung des Materials wird an dieser Stelle vernachlässigt. Eine Erhöhung der Temperatur bewirkt somit, dass die Fehlstellenposition zu tief bestimmt wird. Bei der Entdämpfung auf die Tiefe 0 mm wird demnach für die Echoamplitude ein zu hoher Skalierungsfaktor verwendet. Weil der ermittelte Durchmesser des kugelförmigen Ersatzreflektors linear mit der Echoamplitude steigt, führt eine Erhöhung der Temperatur zu einer zu groß bemessenen Ersatzreflektorgröße.

Im Folgenden wird die quantitative Abhängigkeit der ermittelten kugelförmigen Ersatzreflektorgröße von der Temperatur betrachtet:

Zu bestimmen ist der relative Fehler des ermittelten Durchmesser δD . Auf Grund der linearen Abhängigkeit zwischen dem Durchmesser und dem Echo-
druck (vgl. Gleichung 3.22) gilt:

$$\delta D = \delta p = \frac{\Delta p}{p_{\text{richtig}}} = \frac{p_{\text{bestimmt}} - p_{\text{richtig}}}{p_{\text{richtig}}} = \frac{p_{\text{bestimmt}}}{p_{\text{richtig}}} - 1 \quad (\text{A.1})$$

Wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben, wird bei der Größenbestimmung nicht die gemessene Echoamplitude der Fehlstelle in der Tiefenlage s verwendet, sondern eine auf die Tiefe von 0 mm nach Gleichung 3.11 entdämpfte Echoamplitude. Somit folgt für das Verhältnis $p_{\text{bestimmt}} / p_{\text{richtig}}$:

$$\frac{p_{\text{bestimmt}}}{p_{\text{richtig}}} = \frac{\left(p_0 e^{-\alpha_s \cdot 2 \cdot s_{\text{bestimmt}}}\right)^{-1}}{\left(p_0 e^{-\alpha_s \cdot 2 \cdot s_{\text{richtig}}}\right)^{-1}} = e^{\alpha_s \cdot 2 \cdot (s_{\text{bestimmt}} - s_{\text{richtig}})} = e^{\alpha_s \cdot 2 \cdot \Delta s} = e^{\alpha_s \cdot 2 \cdot \delta s_{\text{richtig}}} \quad (\text{A.2})$$

Der relative Fehler der Tiefenbestimmung durch eine erhöhte Temperatur ergibt sich gemäß Gleichung 3.12 durch die relative Verlängerung der gemessenen Laufzeit t :

$$\delta s = \delta t \quad (\text{A.3})$$

Die relative Änderung der gemessenen Laufzeit resultiert aus der relativen Verringerung der Schallgeschwindigkeit c :

$$t_{\text{bestimmt}} = \frac{2 \cdot s_{\text{richtig}}}{c_{\text{verändert}}} \rightarrow \delta t = -\delta c \quad (\text{A.4})$$

Für die Änderung der Schallgeschwindigkeit bei Veränderung der Temperatur T ausgehend von 22°C gilt nach Abbildung 5-13:

$$\delta c = \frac{c_{\text{Mess}} - c_{295,15K}}{c_{295,15K}} = \frac{-2,3 \cdot \frac{m/s}{K} \cdot (T_{\text{Mess}} - 295,15K)}{995m/s} = -0,0023 \cdot \frac{1}{K} \cdot \Delta T \quad (\text{A.5})$$

Der Schwächungskoeffizient α_s wird gemäß Abbildung 5-6 zu $\alpha_s = 58,5 \cdot 1/m$ bestimmt. Zusammen mit den Gleichungen A.2 bis A.5 bestimmt sich δD zu:

$$\delta D = e^{58,5 \frac{1}{m} \cdot 2 \cdot 0,0023 \frac{1}{K} \cdot \Delta T \cdot s_{\text{richtig}}} - 1 = e^{0,2691 \frac{1}{m \cdot K} \cdot \Delta T \cdot s_{\text{richtig}}} - 1 \quad (\text{A.6})$$

Der relative Fehler bei der Größenbestimmung bei einer Änderung der Temperatur hängt somit von der physikalischen Tiefenlage s_{richtig} der Fehlstelle und der Temperaturänderung ΔT bezüglich 22°C ab.

In Abschnitt 5.2.2 wird als Beispiel eine Temperatur von 40°C sowie eine Fehlstellentiefe von 25 mm angenommen. Dies führt zu einem relativen Fehler von:

$$\delta D = e^{0,2691 \frac{1}{m \cdot K} \cdot (313,15K - 295,15K) \cdot 0,025m} - 1 = 0,128 \quad (\text{A.7})$$

Anhang B: Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen:

ALOK	Amplituden-Laufzeit-Orts-Kurven
AOK	Amplituden-Ortskurve
AVG	Amplituden-Verstärkung-Größe
Cu	Kupfer
DISCUS	Software zur Auswertung von Ultraschall-Messungen
ECT	Electro-Chemical Tree
EL	Elastosil
EP	Epoxidharz
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Monomer
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
H5M	Prüfkopfbezeichnung
H10M	Prüfkopfbezeichnung
HT2	Epoxidharz
HTV-Silikon	Hochtemperaturvernetzendes Silikon
LLT	Longitudinal-Longitudinal-Transversal
LOK	Laufzeit-Ortskurve
LSR-Silikon	Liquid Silicone Rubber
PE	Polyethylen
PS	Powersil
PVC	Polyvinylchlorid
REM	Rasterelektronenmikroskop
RTV-1-Silikon	Raumtemperaturvernetzendes einkomponentiges Silikon
RTV-2-Silikon	Raumtemperaturvernetzendes zweikomponentiges Silikon
SAFT	Synthetic Aperture Focusing Technique
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SIR	Silikonelastomer (Silicone Rubber)
TE	Teilentladungen
TOFD	Time of Flight Diffraction
US	Ultraschall
VPE	Vernetztes Polyethylen
XLR	Extra Liquid Rubber
Z2M	Prüfkopfbezeichnung

Formelzeichen:

B	Bandbreite
C_{Intens}	Kapazität des Sendeschwingkreises
c	Schallgeschwindigkeit
D	Durchmesser
E	elektrische Feldstärke
E_D	Durchschlagfeldstärke
E_f	Energie der Signale $f(t)$ und $g(t)$
$E_{\parallel}$	Echodurchlässigkeit der Longitudinalwellen
E_m	Elastizitätsmodul
f	Frequenz
$f(t), g(t)$	zeitabhängige Signale
F_r	Reflektorfläche
G	Schubmodul
L	Schalldruck-Pegel
N	Nahfeldlänge
p	Schalldruck
R	Reflexionsfaktor
$R_{\text{Dämpf}}$	Dämpfungswiderstand des Sendeschwingkreises
r	Radius
s	Strecke
T	Transmissionsfaktor
t_n	zeitdiskrete Variable
U_{ein}	elektrische Einsatzspannung
Z	Schallimpedanz
z	Ausbreitungsrichtung
α_{ein}	Einfallswinkel
α_s	Schwächungskoeffizient
β_{aus}	Ausfallswinkel
γ	Öffnungswinkel
$\tan \delta$	Verlustfaktor
ϵ_r	Dielektrizitätszahl
λ	Schallwellenlänge
μ	Poissonnsche Zahl
ρ	Maximal-Korrelationskoeffizient
ρ_{Mat}	Dichte
ρ_{fg}	Korrelationskoeffizient der Signale $f(t)$ und $g(t)$

$\rho_{fg}(\tau)$	Korrelationsfunktion der Signale $f(t)$ und $g(t)$
σ	mechanische Spannung
σ_{el}	elektrische Leitfähigkeit
τ_m	diskrete Verschiebungsvariable

Lebenslauf

Persönliche Daten

Philipp James Ludwig Walter
geboren am 14.02.1978 in Düsseldorf
Sohn der Eheleute Klaus Walter
und Annelies Walter, geb. Sroka

Schulausbildung

1984 - 1988 Martin Luther Grundschule, Düsseldorf
1988 - 1997 Görres Gymnasium, Düsseldorf

Zivildienst

1997 - 1998 Zivildienst beim DRK, Düsseldorf

Studium

1998 - 2003 Studium der Elektrotechnik an der RWTH Aachen, Fachrichtung: Allgemeine Elektrotechnik
Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufstätigkeit

2003 - 2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen