

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18207 N

Thema

Online-Monitoring des Vernetzungsgrades in polymer isolierten Energiekabeln

Berichtszeitraum

01.06.2015 - 30.11.2017

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.

Forschungsstelle(n)

Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.

Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen University

Mannheim/Aachen, 31.03.2018

Ort, Datum

Dr.-Ing. Gregor Brammer

Dr.-Ing. Ralf Puffer

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Inhaltsverzeichnis

Thema	1
Berichtszeitraum	1
Forschungsvereinigung	1
Forschungsstelle(n)	1
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Verzeichnis verwendeter Abkürzungen	V
1 Zusammenfassung	1
2 Forschungsstellen und Projektpartner	3
3 Forschungsinhalt	4
3.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	4
3.1.1 Ausgangssituation	4
3.1.2 Stand der Forschung	5
3.2 Forschungsziele	11
4 AP 1: Bestimmung der akustischen Materialkenndaten	13
4.1 Prüflingsproduktion	13
4.2 Prüfaufbau und Durchführung der Ultraschalluntersuchungen	14
4.3 Ergebnisse der Materialuntersuchungen	16
5 AP 2: Entwicklung und Implementierung eines Auswertungsansatzes	20
5.1 Multivariate Klassifikation von Ultraschallmessdaten	20
5.2 Ergebnisse der multivariaten Klassifikation	22
5.3 Berücksichtigung der Kabelgeometrie	24
5.4 Zwischenfazit Auswertungsansatz	25
6 AP 3: Labordemonstrator zur Messung des Vernetzungsgrades	26
6.1 Schematische Darstellung	26
6.2 Online-Auswertung	26
6.2.1 Einflussbewertung der Signalverarbeitung	28
6.2.2 Zwischenfazit Onlinemonitoring	32

7	AP 4: Untersuchung der Vernetzung in Kabelader-Prüflingen	33
7.1	Untersuchungen an einer Modellkabelader	33
7.1.1	Prüfstands Aufbau	34
7.1.2	Messergebnisse	35
7.1.3	Verfahrensbeschreibung	37
7.1.4	Validierung des Messverfahrens	38
7.1.5	Fazit	39
8	AP 5: Mechanische Nachführung der Messapparatur	40
8.1	Düsenanordnung	40
8.1.1	Entwicklung Freistrahldüse	40
8.1.2	Entwicklung mechanische und kontaktlose Nachführung	48
8.2	Demonstration des Verfahrens	50
8.2.1	Übersicht	50
8.2.2	Prüfaufbau	50
8.2.3	Detaillierte Darstellung der Kabeladerprüflinge	51
8.3	Vergleich von Labor- und Demonstratoruntersuchungen	55
9	Zusammenfassung	56
10	Innovativer Beitrag und Nutzen der erzielten Forschungsergebnisse	57
11	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	58
12	Literaturverzeichnis	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Hot-Set-Tester der Firma Elastocon (links), VPE Knochenprüflinge (rechts)	5
Abbildung 3.2:	Eindringtiefe über der Temperatur für verschiedene polymere Isolierstoffe (XLPE: englisch für VPE), Quelle: World Compound Ltd.....	7
Abbildung 3.3:	Gängige Ultraschallmessverfahren mit resultierenden Amplituden-Laufzeit-Diagrammen, links: Impuls-Echo-Verfahren, rechts: Durchschallungsverfahren	8
Abbildung 3.4:	Schallschwächungskoeffizient in Abhängigkeit der Temperatur für EPDM-DIN Mischung, Heizzeit 2 min und 22 min, nach [Kir01].....	10
Abbildung 3.5:	Schallgeschwindigkeit und mechanische Spannung für 200% Dehnung an einer DIN-EPDM Mischung in Abhängigkeit des Vernetzungsgrades, nach [Kir01].....	10
Abbildung 3.6:	Relativer Schallschwächungskoeffizient und Zugfestigkeit von EPDM über der Vernetzungsdauer des Polymers, nach [Kna11]	11
Abbildung 3.7:	Standard-Prüfaufbau zur Messung der akustischen Materialeigenschaften von Polymeren am IFHT	12
Abbildung 4.1:	Prüflingsherstellung mittels beheizbarer Pressvorrichtung	13
Abbildung 4.2:	Prüfaufbau zur Bestimmung der akustischen Materialparameter (links) und XLPE-Prüfling im Wechselrahmen (rechts)	15
Abbildung 4.3:	Schallgeschwindigkeit von vernetztem Polyethylen in Abhängigkeit der Temperatur und des Vernetzungsgrades	17
Abbildung 4.4:	Schallgeschwindigkeit von XLPE bei 45 °C und 5 MHz für unterschiedliche Prüflingsdicken	18
Abbildung 4.5:	Temperaturabhängigkeit der akustischen Schalldämpfung von XLPE bei 5 MHz	19
Abbildung 5.1:	Vorgehensweise zur Klassifikation	20
Abbildung 5.2:	Frequenzspektrum und mögliche Auswerteparameter	21
Abbildung 5.3:	Wahrheitsmatrix als Indikator für die Klassifikationsgenauigkeit des Modells „Bagged Trees“	22
Abbildung 5.4:	Genauigkeit der verschiedenen Klassifikationsalgorithmen	23
Abbildung 5.5:	Sensitivitätsanalyse des Modells „Bagged Trees“ für ein Ausgangssignal der Klasse A (links) und der Klasse D (rechts)	23
Abbildung 5.6:	Untersuchungen zur Geometrieabhängigkeit der Ultraschallreflexion	24
Abbildung 6.1:	Schematische (links) und reale (rechts) Darstellung des Technologie-Demonstrators	26
Abbildung 6.2:	Schematischer Aufbau Online-Auswertung	27
Abbildung 6.3:	Signalverarbeitung des Messsignals bei der Online-Auswertung	28
Abbildung 6.4:	Auswertung Kabeladerprüfling 1 ohne Optimierung	29
Abbildung 6.5:	Auswertung Kabeladerprüfling 1 mit Bandpassfilter	29
Abbildung 6.6:	Auswertung Kabeladerprüfling 1 mit Bandpassfilter und Schneiden.....	30

Abbildung 6.7	Auswertung Kabeladerprüfling 1 mit Bandpassfilter, Schneiden und Korrektur der Krümmung.....	31
Abbildung 6.8	Auswertung Kabeladerprüfling 1 mit Bandpassfilter, Schneiden, Korrektur der Krümmung und Mittelung	32
Abbildung 7.1:	Positionsabhängiger Vernetzungsgrad der Modellkabelader.....	34
Abbildung 7.2:	Skizze des Modellkabelprüfstands	35
Abbildung 7.3:	Ultraschallsignal der Reflexion am Modellkabel (links) und ermittelte Laufzeit in der Isolierschicht (rechts)	35
Abbildung 7.4:	Schallgeschwindigkeit und Schalldämpfung in Abhängigkeit der Kabellänge	36
Abbildung 7.5:	Mittelwert der Schallgeschwindigkeit als Ergebnis des Algorithmus zum Monitoring des Vernetzungsgrades mit oberen und unteren Warn- und Eingriffsgrenzen (links) und Standardabweichung (rechts).....	38
Abbildung 8.1	Draufsicht Prüfkopfhalterung.....	40
Abbildung 8.2	Prüfkopfhalterung und Stab-Düse Lang	41
Abbildung 8.3	Prüfkopfhalterung und Stab-Düse Kurz.....	42
Abbildung 8.4	Prüfkopfhalterung und Kegeldüse Glatt.....	42
Abbildung 8.5	Prüfkopfhalterung und Kegeldüse Rund.....	43
Abbildung 8.6	Laminardüse mit integrierter Prüfkopfhalterung.....	44
Abbildung 8.7	Düsenanordnung mit Wasserströmung bei zu wenig Druck	45
Abbildung 8.8	Düsenanordnung mit Wasserströmung bei zu hohem Druck.....	45
Abbildung 8.9	Düsenanordnung mit Wasserströmung bei korrektem Druck.....	46
Abbildung 8.10	Düsenanordnung mit Wasserstrahl bei 90°	46
Abbildung 8.11	Düsenanordnung mit Wasserstrahl bei 45°	47
Abbildung 8.12	Prüfstandanordnung mit zwei Ultraschallprüfköpfen.....	47
Abbildung 8.13	Kontaktlose Nachführung der Prüfkopfanordnung	48
Abbildung 8.14	Mechanische Nachführung	49
Abbildung 8.15	Schematische Darstellung des Messaufbaus.....	50
Abbildung 8.16	Auswertung Kabeladerprüfling 2 mit Bandpassfilter, Schneiden und Korrektur der Krümmung.....	51
Abbildung 8.17	Auswertung Kabeladerprüfling 3 mit Bandpassfilter, Schneiden und Korrektur der Krümmung.....	52
Abbildung 8.18	Auswertung Kabeladerprüfling 4 mit Bandpassfilter, Schneiden und Korrektur der Krümmung.....	52
Abbildung 8.19	Auswertung Kabeladerprüfling 5 mit Bandpassfilter, Schneiden und Korrektur der Krümmung.....	53
Abbildung 8.20	Auswertung Kabeladerprüfling 6 mit Bandpassfilter, Schneiden und Korrektur der Krümmung.....	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Vernetzungsklassen.....	14
Tabelle 4.2:	Parametervariation der Messreihen	16
Tabelle 5.1:	Merkmale zur multivariaten Klassifikation.....	21
Tabelle 8.1	Übersicht Kabeladerprüflinge	50
Tabelle 8.2	Übersicht der Auswertungsergebnisse aller Kabeladerprüflinge.....	54

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

BSP	Beispiel
FGH	Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft
FIFO	First in first out
HDPE	High density polyethylene
IFHT	Institut für Hochspannungstechnik
LDPE	Low density polyethylene
PE	Polyethylen
POM	Polyoxymethylen
VPE	Vernetztes Polyethylen
XLPE	Cross-linked polyethylene (VPE)

1 Zusammenfassung

In diesem Projekt wird die Online-Bewertung der Qualität des Vernetzungsgrades in Energiekabeln untersucht. Heutzutage wird zu Beginn der Energiekabelproduktion ein Hot-Set-Test an den ersten produzierten Metern durchgeführt, um die Qualität der Vernetzung zu bewerten. Nach erfolgreichem Test wird das Kabel mit den aktuellen Prozessparametern produziert, um abschließend am Kabelende erneut einen Hot-Set-Test durchzuführen. Änderungen oder Schwankungen während der Produktion bleiben hier unentdeckt und können lediglich durch anschließende zerstörende Tests erkannt werden. Dies kann allerdings zu hohem Ausschuss führen und verlängert die Produktionszeiten, da das gesamte Kabel erneut produziert werden muss. Aus diesem Grund wird in diesem Projekt das Online-Monitoring als produktionsbegleitende Bewertung der Qualität des Vernetzungsgrades untersucht, um Änderungen oder Schwankungen in der Produktionslinie bereits frühzeitig erkennen und gegensteuern zu können. Für die Untersuchungen sollen zunächst Materialuntersuchungen durchgeführt werden. Ein darauf basierend entwickelter Auswertalgorithmus soll anschließend eine Modellkabelader auf die Qualität der Vernetzung untersuchen. Zusätzlich wird ein Demonstrator entwickelt und aufgebaut, in dem Kabeladerprüflinge mit realen Querschnitten bis zu einer Länge von 2m untersucht werden. Das Projekt ist dazu in folgende 5 Arbeitspakete unterteilt.

In AP 1 werden zunächst Prüflinge produziert, die anschließend in einem Prüfaufbau untersucht werden. Es werden die akustischen Materialkennndaten bestimmt, die einen Rückschluss auf den Vernetzungsgrad zulassen.

In AP 2 werden verschiedene Auswertungsansätze behandelt. Bei der multikriteriellen Auswertung werden verschiedene Klassifizierungsalgorithmen ausgewählt und bewertet, dazu wird ein Training und eine Validierung mit einem Lerndatensatz durchgeführt. Variiert wird hierbei die Anzahl und Auswahl der Kenngrößen. Ergebnis der Untersuchungen ist, dass zur Bestimmung der Vernetzungsklasse die Schallgeschwindigkeit am besten geeignet ist, unter eventuellem Einbezug der Dämpfung.

In AP 3 wird ein Labordemonstrator aufgebaut, der eine Produktionslinie für Energiekabel nachbildet. In der Produktionslinie würde eine Messvorrichtung zur Bewertung des Vernetzungsgrades des extrudierten Kabels stationär befestigt werden. Im Labor ist die Bewegung eines Energiekabels jedoch nicht abbildbar, weshalb zur Nachbildung abweichend die Messvorrichtung bewegt wird. Dazu muss sowohl eine Linearachse vorhanden sein, als auch eine Vorrichtung, um das Koppelmedium für das Einkoppeln der Ultraschallsignale in das Energiekabel aufzufangen. Die entwickelte Messvorrichtung inklusive der Düsenanordnung und Nachführung wird in AP 5 beschrieben. Außerdem werden Optimierungsmöglichkeiten für die Ultraschallsignale gezeigt, die für das Online-Monitoring verwendet werden können.

In AP 4 wird ein Prüfstand aufgebaut, an dem eine Modellkabelader untersucht wird. Die Kabelader ist aus unterschiedlich vernetzten Kabelstücken zusammengesetzt. Das hier entwickelte Messverfahren ist geeignet zur kontinuierlichen Überwachung des Vernetzungsgrades, unabhängig von der Geometrie.

In AP 5 wird eine Freistrahldüse entwickelt, um unabhängig von einem Wasserbecken Ultraschalluntersuchungen an einem Energiekabel durchführen zu können. Außerdem muss während einer Messung die Ausrichtung der Ultraschallanordnung zum Kabel konstant gehalten werden, weshalb zwei entwickelte Konzepte von Nachführungen vorgestellt werden. Der entwickelte Technologiedemonstrator wird verwendet, um sechs Kabeladerprüflinge auf den Vernetzungsgrad zu untersuchen. Bei drei Kabeladerprüflingen

handelt es sich um Kabelstücke aus einer regulären Produktionslinie. Außerdem werden drei experimentell hergestellte Kabeladerprüflinge untersucht, die unterschiedliche Vernetzungsgrade aufweisen. Die Untersuchungen zeigen, dass das hier entwickelte Online-Monitoring geeignet ist, um Änderungen am Vernetzungsgrad festzustellen. Die gemessenen Schallgeschwindigkeiten entsprechen den Werten aus den Materialuntersuchungen.

Insgesamt zeigt sich, dass ein Onlinemonitoring des Vernetzungsgrades möglich ist. Die Schallgeschwindigkeit kann zur Bewertung der Vernetzung verwendet werden und damit eine Abgrenzung zwischen verschiedenen Vernetzungsgraden durchgeführt werden.

2 Forschungsstellen und Projektpartner

Folgende Partner haben am Projekt mitgearbeitet:

- Nexans Deutschland GmbH
- nkt Cables GmbH & Co.KG
- VOGT Ultrasonics GmbH
- SebaKMT GmbH
- Driescher Wegberg KG
- Consentec GmbH

Forschungsstellen:

Forschungsstelle 1:

Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft
für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e. V.
Besselstr. 20-22, 68219 Mannheim
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Albert Moser
Dr.-Ing. Gregor Brammer

Leiter der Forschungsstelle:
Projektleiter:

Forschungsstelle 2:

Institut für Hochspannungstechnik der
RWTH Aachen,
Schinkelstraße 2, 52056 Aachen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler
Dr.-Ing. Ralf Puffer

Leiter der Forschungsstelle:
Projektleiter:

3 Forschungsinhalt

3.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

3.1.1 Ausgangssituation

Die aktuelle Situation der Energiepolitik stellt neue Herausforderungen an das Energieübertragungsnetz. Neben dem erforderlichen Ausbau des Übertragungsnetzes sind auch im Verteilungsnetz Investitionen notwendig. Wegen der erhöhten Zunahme dezentraler Energieeinspeisung sind eine Verstärkung der vorhandenen Übertragungsleitungen sowie der Bau neuer Leitungsverbindungen erforderlich [Den12]. Der Notwendigkeit neuer Leitungsverbindungen stehen vielfältige Interessen gegenüber, wodurch insbesondere in den Verteilungsnetzen häufig Kabelsysteme anstelle von Freileitungen gewählt werden. Somit kommen Kabelsystemen bei der Umsetzung der Energiewende eine weiter steigende Bedeutung zu.

Moderne Energiekabel werden überwiegend aus polymeren Kunststoffen gefertigt. So hat vernetztes Polyethylen (VPE) im Bereich der Kabelisolierung die papierisolierten Öl- und Massekabel weitgehend ersetzt [Thu99]. Der erhebliche Vorteil der polymeren Isoliersysteme liegt neben der besseren Umweltverträglichkeit in der einfacheren Handhabung während der Installation eines Kabelsystems.

Eng verbunden mit der Wirtschaftlichkeit sind die hohe Übertragungsleistung und eine lange Lebensdauer des Energiekabels. Daher werden höchste Ansprüche an das Isoliersystem bezüglich der Qualität gestellt. Hierbei wird durch die Vernetzung des Polymers die thermische Stabilität des Isoliersystems deutlich verbessert, sodass höhere Betriebstemperaturen und somit höhere Ströme im Kabel zugelassen werden können. Die Vernetzung stellt einen komplexen chemischen Prozess dar, der in der Produktion kontrolliert wird. Insbesondere stellt sich während dieses Prozesses ein Vernetzungsprofil über der Querschnittsfläche der Kabelisolierung ein. Die Kontrolle des Vernetzungsgrades geschieht in der Regel als stichprobenartiger Dehnungstest (Hot-Set-Test) am Anfang und am Ende des produzierten Kabels. Nachteilig ist hier insbesondere, dass ein abschließender Test zur Verifikation des Vernetzungsgrades erst nach der Produktion der gesamten Kabellänge durchgeführt werden kann. Bei Vernetzungsfehlern kann es daher zu entsprechend großem Ausschuss kommen.

Eine kontinuierliche Überwachung des Vernetzungsgrades schon während des Produktionsprozesses ist sinnvoll, um eine hohe Vernetzungsqualität und einen folglich geringen Ausschuss zu erreichen. Verfahren zur kontinuierlichen Vernetzungskontrolle während der Produktion sind bisher nicht etabliert. Daher soll in diesem Forschungsvorhaben ein Verfahren zur Klassifizierung des Vernetzungsgrades von VPE während des Produktionsprozesses entwickelt werden. Hierzu ist die Ultraschalltechnik geeignet, da Untersuchungen an Silikonelastomer und Ethylen-Propylen-Dien-Monomer (EPDM) bereits messbare Zusammenhänge zwischen Vernetzungsgrad und Ultraschallsignalen zeigen [Cor03, Kir01, Kna11]. Mit den erworbenen Resultaten wird ein Demonstrator entwickelt, der mittels Ultraschallmessung den Vernetzungsgrad eines Kabelisoliersystems bestimmt. Somit wird durch das Forschungsvorhaben die Methodik zur Bestimmung des Vernetzungsgrades maßgeblich verbessert und bietet eine kontinuierliche Überprüfung der Qualität eines Energiekabels während des Produktionsprozesses. Gleichzeitig lassen sich aus den Ergebnissen neue Produkte auf dem Gebiet der Qualitätssicherung im Bereich der Energiekabelherstellung entwickeln.

3.1.2 Stand der Forschung

Fertigung des Isoliersystems eines Energiekabels

Ein zentrales Element eines Energiekabels stellt das polymere Isoliersystem bestehend aus innerer Leitschicht, Isolierung und äußerer Leitschicht dar. Abhängig von Spannungsebene und Kabeldesign variiert die Isolierwanddicke von 4 mm (Mittelspannung) bis zu 40 mm (Höchstspannung). Das dreischichtige Isoliersystem wird auf den Leiter in einem Prozessschritt im sogenannten 3-fach-Extruderkopf extrudiert und anschließend im Vernetzungsrohr bei hoher Temperatur und hohem Druck chemisch vernetzt. Der komplexe Prozess der Vernetzung des Polymers erfordert eine genaue Kenntnis von Einflussparametern auf den Prozess und basiert meist auf langjähriger Erfahrung der Kabelhersteller. Die Temperatur des Polymers während der Vernetzung stellt einen wichtigen Prozessparameter dar. Temperaturen von ca. 200 °C dienen als Aktivierungsenergie für den Vernetzungsprozess [Mai99]. Die Prozesswärme wirkt innerhalb des Vernetzungsrohrs von außen auf die frisch extrudierte Kabelader. Bei Energiekabeln größerer Isolierwanddicke müssen folglich Parameter wie Heizleistung und Produktionsgeschwindigkeit angepasst werden, damit die von außen eingebrachte Prozesswärme bis zu den inneren polymeren Schichten der Kabelader durchdringen kann. Durch die Bewegung der Ader im Vernetzungsrohr wirkt die Prozesswärme auf die Ader örtlich teilweise unterschiedlich, so dass innerhalb des Isoliersystems ein Temperaturprofil entsteht. Aufgrund dieses Temperaturprofils ergibt sich während des Prozesses ebenso ein Vernetzungsprofil in der Kabelader. Nach anschließender Kühlung der entstandenen Kabelader erfolgt das Aufspulen auf eine Kabeltrommel für die weiteren Produktionsschritte des Energiekabels.

Die Überprüfung immer ausreichender Vernetzung der Kabelader wird derzeit stichprobenartig am Anfang und Ende der Ader-Produktion durchgeführt. Aus der Isolierschicht von ausgeschnittenen Kabelader-Proben werden Knochenprüflinge ausgestanzt und in ein Gerät zur Erfassung der Dehnung bei erhöhter Temperatur eingespannt. Die Prüflinge werden über eine definierte Zeitdauer mit einer für jeden Prüflingstyp vorgegebenen Zugkraft belastet und die Längenausdehnung gemessen. Dieser sogenannte Hot-Set-Test nach IEC60811 liefert einen relativen Dehnungswert der Materialprobe, welcher in Korrelation mit dem Grad der Vernetzung steht. Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft ein Gerät der Firma Elastocon mit eingespannten Materialproben aus einer Kabelader-Produktion.



Abbildung 3.1: Hot-Set-Tester der Firma Elastocon (links), VPE Knochenprüflinge (rechts)

Die Prüfung wird am Ende der Produktionslänge zur Verifikation wiederholt, um sicherzustellen, dass Vernetzungsgrad und somit die Prozessparameter mit den anfänglichen Werten übereinstimmen. Mittels dieses Vergleiches wird die Kontinuität des Produktionsprozesses abgeleitet, und gefolgert, dass die gesamte Produktionslänge den Anforderungen entspricht. Den entscheidenden Nachteil stellt dabei die Diskontinuität der Prüfung dar. Genauere und verlässliche Aussagen über den Zustand der Kabelader zwischen den beiden geprüften Teilstücken am Anfang und Ende der Produktionslänge sind nicht möglich. Etwaige Schwankungen in den Prozessparametern können sich unmittelbar auf den Vernetzungsgrad der polymeren Isolierung auswirken, bleiben jedoch aufgrund der nicht-kontinuierlichen Erfassung des Vernetzungsgrades unentdeckt. Weiterhin besteht frühestens am Ende der Produktion einer Kabelader die Möglichkeit zur Verifikation. Liegen die Vernetzungswerte am Ende der Produktion außerhalb der Sollwerte, ist die produzierte Länge für die Weiterverarbeitung nicht verwendbar. Relevant wird dies bei großen Kabellängen, da sich das Risiko von Schwankungen in den Prozessparametern erhöht. Des Weiteren muss für Kabel mit großer Isolierwanddicke (Hoch-, Höchstspannung) sichergestellt werden, dass die im Vernetzungsrohr zugeführte Wärmeenergie ausreicht, um auch die inneren Bereiche des Isoliersystems zu vernetzen. Hier besteht das Risiko in einem inhomogenen Vernetzungsprofil, welches im Inneren – in Leiternähe – eine geringere Vernetzung und folglich geringere thermische Stabilität aufweist. Die Folge im Betrieb des Kabels ist eine Deformierung des Isoliersystems, wodurch die Isolierfestigkeit des Kabels nicht mehr gewährleistet ist.

Auswirkungen der Vernetzung auf die Langzeitstabilität des Energiekabels

Während der letzten Dekaden hat sich VPE als Standard-Isolier-Werkstoff im Bereich der Energiekabel durchgesetzt. Damit ersetzen sie öl- und masseisolierte Kabel, da sie neben der Umweltverträglichkeit auch deutliche Vorteile hinsichtlich der Handhabung und Installation bieten. Des Weiteren weisen PE- oder VPE-isolierte Kabel einen deutlich geringeren dielektrischen Verlustfaktor auf, welches zur Wirtschaftlichkeit längerer Übertragungstrecken beiträgt. Während in der Anfangszeit verstärkt rein PE-isolierte Kabel gefertigt und verwendet wurden, kommen heute im Bereich der Mittel- und Hochspannung fast ausschließlich VPE-isolierte Kabel zum Einsatz. Als maßgeblicher Vorteil einer VPE-Isolierung gegenüber einer reinen PE-Isolierung gelten die verbesserten thermischen Eigenschaften, wodurch die maximal zulässige Betriebstemperatur von zuvor 70 °C bei PE-Isolierung auf 90 °C erhöht werden konnte. Die thermische Stabilität lässt sich anhand der mechanischen Eindringtiefe in das Polymer bei verschiedenen Temperaturen qualitativ ableiten. Abbildung 3.2 zeigt die Eindringtiefe eines Messstempels in verschiedene Polymere in Abhängigkeit der Temperatur.

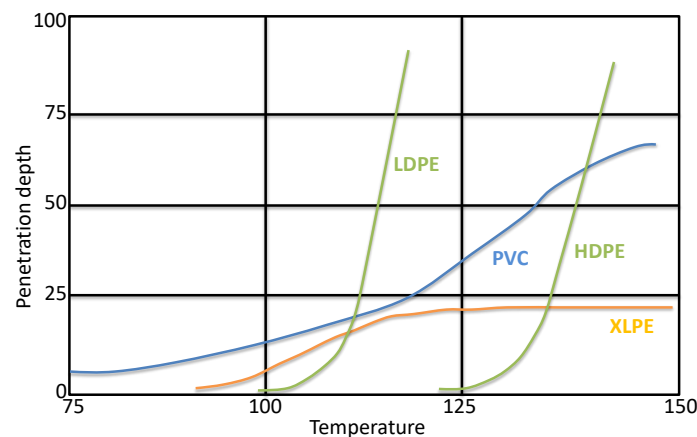


Abbildung 3.2: Eindringtiefe über der Temperatur für verschiedene polymere Isolierstoffe (XLPE: englisch für VPE), Quelle: World Compound Ltd.

LDPE (Low Density Polyethylen) und HDPE (High Density Polyethylen) verlieren ab einer gewissen Grenztemperatur an Form und beginnen zu schmelzen, wodurch sich ein erhebliches Eindringen des Messstempels ergibt. Es zeigt sich, dass VPE gegenüber LDPE und HDPE bei höheren Temperaturen grundsätzlich eine bessere Formstabilität aufweist. Übertragen auf den Fall der Energiekabel bedeutet dies, dass deutlich höhere Temperaturen und Ströme in Normalbetrieb und Kurzschlussfall zulässig werden, ohne dass eine Deformierung des Isoliersystems stattfindet. Dies wiederum wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit des Kabels aus.

Diese thermischen Eigenschaften von VPE stehen über den E-Modul des Polymers im direkten Zusammenhang mit dessen Vernetzungsgrad [Nie62]. Um die geforderte thermische Stabilität der Kabelisolierung bei dauerhaften Betriebstemperaturen von 90 °C zu erreichen, ist ein homogener und ausreichender Vernetzungsgrad der Kabelisolierung unabdingbar. Andernfalls besteht die Gefahr der Deformierung des dreischichtigen Isoliersystems und von Ablösungen an den inneren Grenzflächen, wodurch einerseits die homogene Verteilung des elektrischen Feldes gestört wird und andererseits Teilentladungen in den Hohlräumen der Ablösung entstehen können.

Der Grad der Vernetzung spielt demnach in der Produktion und im Betrieb eines Energiekabels eine erhebliche Rolle. Aufgrund des unter 3.1.1 beschriebenen aktuell genutzten Verfahrens zur Bestimmung des Vernetzungsgrades stellt sich z.B. ein zu niedriger Vernetzungsgrad erst am Ende einer Produktionslänge heraus. Nach Fertigstellung des gesamten Kabels erfolgt die elektrische Stückprüfung gemäß VDE 0472 und VDE 0481, in welcher der Schwerpunkt auf der Spannungs- und Teilentladungsprüfung liegt. Die Auswirkungen unzureichender Vernetzung auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften des Kabels sind nicht erkennbar, da etwaige Schädigungen durch thermische Lastzyklen hervorgerufen werden, nicht jedoch durch angelegte elektrische Spannung.

Ultraschalldiagnostik zur Zustandsbewertung polymerer Isoliersysteme

Die traditionelle Anwendung findet die Ultraschalltechnik in der Prüfung von metallischen Werkstoffen. Dabei stehen die Detektion von Fehlstellen, Korrosion und Rissen im Vordergrund, welche sich langfristig auf die mechanische Stabilität der Komponente auswirken können. Im Bereich der Kunststofftechnik werden mittels Ultraschall beispielsweise mechanische Materialkenngrößen ermittelt [Kra86]. Die Prüffrequenz liegt bei der Untersuchung von Kunststoffen typischerweise im Bereich zwischen 2 MHz und 10 MHz. Grundsätzlich stellt Ultraschall eine mechanische Welle dar, die sich aus Schwingungen von Stoffteilchen in festen oder flüssigen Medien um ihre Ruheposition aufbaut. Durch die mechanische Kopplung der Stoffteilchen untereinander breitet sich die Schallwelle mit der materialspezifischen Schallgeschwindigkeit im Festkörper oder der Flüssigkeit aus (Abbildung 3.3). Es wird grundsätzlich zwischen zwei Methoden unterschieden. Zum einen existiert die Impuls-Echo-Methode (Abbildung 3.3, links), bei welcher der Ultraschallprüfkopf gleichzeitig als Sender und Empfänger der Ultraschallsignale fungiert. Zum anderen findet die Durchschallungsmethode, bei welcher Ultraschallsender und –empfänger gegenüber angeordnet sind, Verwendung (Abbildung 3.3, rechts). Trifft die gesendete Schallwelle auf eine Grenzfläche zu einem angrenzenden Medium (bspw. $Z_w \leftrightarrow Z_1$), so wird die Schallwelle teilweise transmittiert und reflektiert.

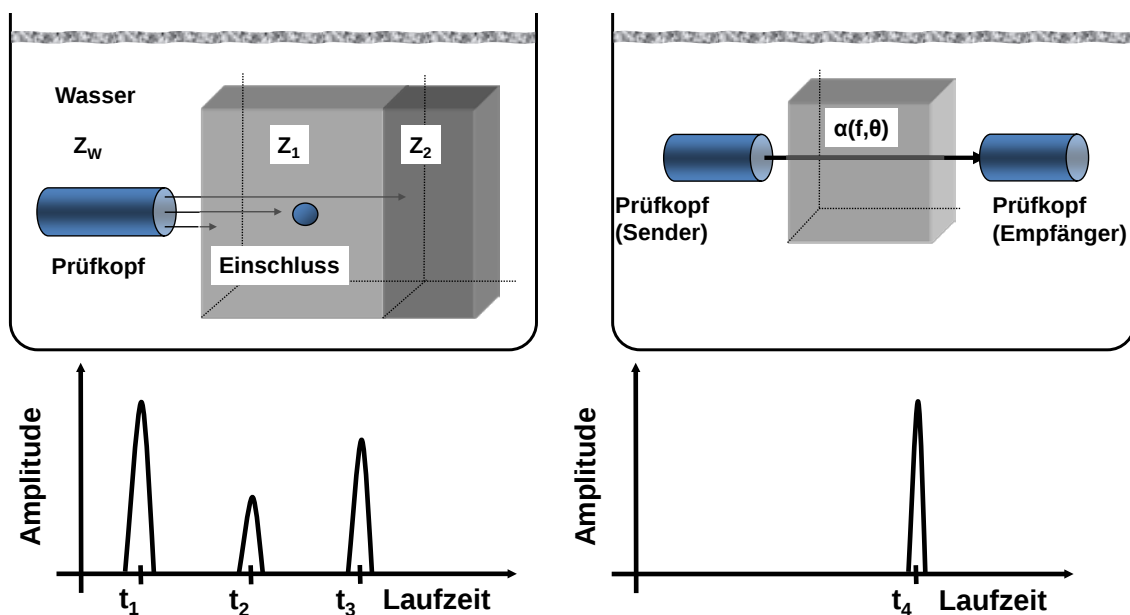


Abbildung 3.3: Gängige Ultraschallmessverfahren mit resultierenden Amplituden-Laufzeit-Diagrammen, links: Impuls-Echo-Verfahren, rechts: Durchschallungsverfahren

Die empfangenen Ultraschallsignale werden in dem Amplituden-Laufzeit-Diagramm (A-Scan) dargestellt, wobei jede Grenzfläche einen Amplitudenausschlag verursacht. Mittels des reflektierten Anteils können in der Impuls-Echo-Methode beispielsweise etwaige Einschlüsse detektiert werden. Bei der Bestimmung von Materialkennwerten wie der Schallschwächung $\alpha(\text{Frequenz } f, \text{ Temperatur } \theta)$ wird die Durchschallungsmethode bevorzugt, welche ausschließlich den transmittierten Signalanteil nutzt.

Im Bereich der polymeren Isolierstofftechnik bietet die Ultraschalltechnik gegenüber den herkömmlichen Prüfmethoden mehrere Vorteile. Während mechanische Prüfungen oder Prüfungen unter Verwendung von (Hoch-)Spannung erst nach Fertigstellung des Produktes und zudem gegebenenfalls zerstörend durchgeführt werden, lassen sich mittels Ultraschallprüfung, welche ein zerstörungsfreies Prüfverfahren darstellt, schon in Zwischenschritten der Produktion Aussagen über Zustand und Qualität des Produktes machen. Durch die Bewertung von Ultraschallmessdaten, wie z.B. Schalldruckamplitude, Impulslaufzeit, Phasenlage und Frequenzspektrum liegen nützliche Informationen über Qualität und Beschaffenheit der Messobjekte vor. Dazu zählen beispielsweise die Vermessung von Wanddicken, Detektion von Fremdstoffeinschlüssen im Isoliermedium und Ablösungen an inneren Grenzflächen, sowie die Messung der Temperatur an inneren Grenzflächen [Auc90, Auc96, Cor03, Schm98, Wal06, Wir11, Bra13]. Einen weiteren Vorteil stellt die berührungslose Messung dar. Das Ultraschallmessverfahren kann demnach an empfindliche Produktionsprozesse adaptiert werden, ohne mechanischen Einfluss auf das Messobjekt zu nehmen. Speziell bei der Fertigung des Isoliersystems eines Kabels ist dies eine unabdingbare Anforderung, da bei einer Berührung das Isoliersystem beschädigt und somit unbrauchbar werden kann. Weiterhin bietet Ultraschall die Möglichkeit, die innere Beschaffenheit von Messobjekten zu untersuchen. So lässt sich der Zustand innerer Grenzflächen in Kabelisoliersystemen mittels Ultraschallmessungen bewerten. Dazu gehören Ablösungen von Grenzflächen [Wal06, Bra11], Fehlstellen in der Isolierschicht oder Unregelmäßigkeiten an inneren Leitschichten (Protrusionen) [Smi03].

Forschungsergebnisse für Elastomere verifizieren den theoretischen Zusammenhang zwischen dem Vernetzungsgrad des Elastomers und der Schallgeschwindigkeit des Materials. Der Zusammenhang zwischen mechanischem E-Modul E und Schallgeschwindigkeit c ist durch

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (\text{F } 1)$$

gegeben, wobei μ die Poissonkonstante und ρ die Dichte beschreiben. Da der mechanische E-Modul mit steigendem Vernetzungsgrad zunimmt, wird die Schallgeschwindigkeit ebenso ansteigen, welches in [Cor03] für Spritzgusskomponenten aus Silikonelastomer (SIR) gezeigt wird. Somit ist eine Aussage über die Homogenität der Vernetzung in der Komponente möglich. Weiterhin zeigen Untersuchungen an Ethylen-Propylen-Dien-Kopolymer (EPDM) und Acrylnitril-Butadien Kautschuk (NBR), dass eine Abhängigkeit der akustischen Kenngrößen wie Schallgeschwindigkeit und Schallschwächung von dem Vernetzungsgrad besteht [Kir01]. So zeigt beispielsweise die akustische Schallschwächung von EPDM eine Zunahme bei steigendem Vernetzungsgrad. Abbildung 3.4 stellt den Schallschwächungskoeffizienten α von EPDM über der Materialtemperatur während der Ultraschallmessung für zwei unterschiedliche Vernetzungsgrade dar.

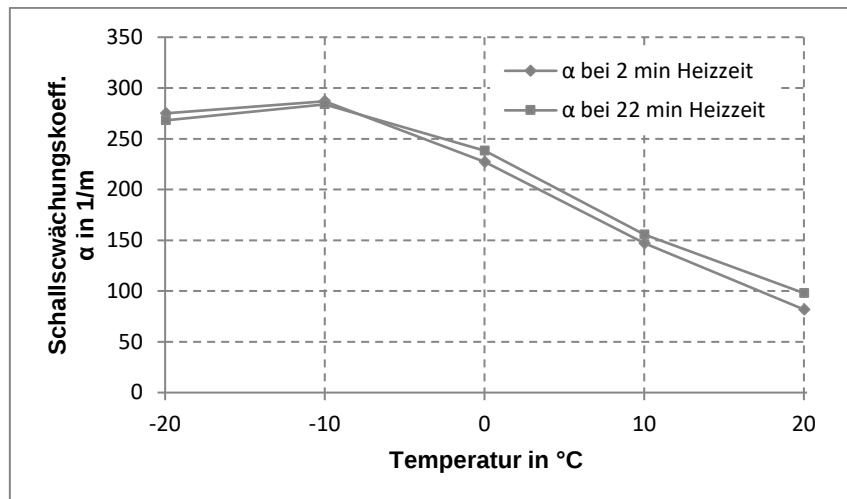


Abbildung 3.4: Schallschwächungskoeffizient in Abhängigkeit der Temperatur für EPDM-DIN Mischung, Heizzeit 2 min und 22 min, nach [Kir01]

Wie bei [Cor03] für SIR gezeigt, weist EPDM ebenfalls eine Zunahme der Schallgeschwindigkeit bei höherem Vernetzungsgrad auf. Zudem besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Änderung der Schallgeschwindigkeit mit dem Vernetzungsgrad und der Änderung der mechanischen Spannung σ bei 200% Dehnung, wie in Abbildung 3.5 ersichtlich wird.

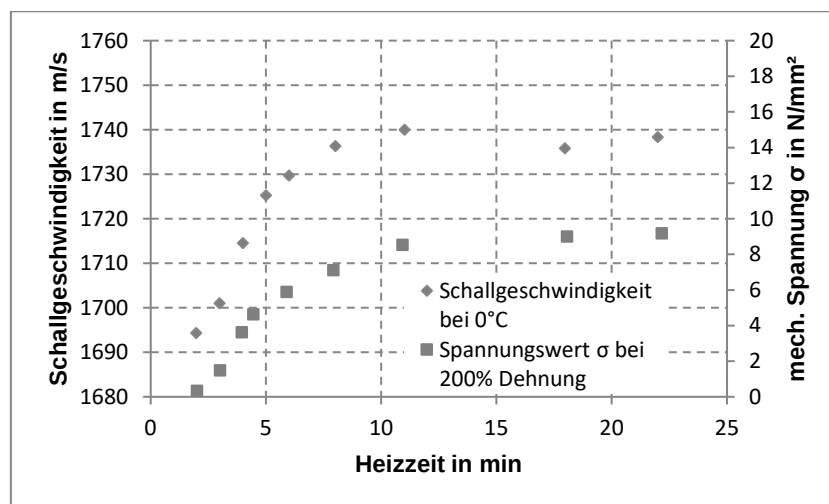


Abbildung 3.5: Schallgeschwindigkeit und mechanische Spannung für 200% Dehnung an einer DIN-EPDM Mischung in Abhängigkeit des Vernetzungsgrades, nach [Kir01]

Im Rahmen von Untersuchungen an EPDM-Prüfkörpern aus der Produktion von Mittelspannungskabeln konnte am Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen University (Forschungsstelle 2) der Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften wie Zugfestigkeit und den akustischen Materialparametern verifiziert werden [Kna11]. In Abbildung 3.6 sind der ermittelte relative Schallschwächungskoeffizient und die maximal erreichte mechanische Spannung (Zugfestigkeit) von EPDM über der Vernetzungsdauer dargestellt. Mit steigender Vernetzungsdauer nimmt der Vernetzungsgrad

im Polymer zu. Beide Messgrößen, der Schallschwächungskoeffizient und die Zugfestigkeit, zeigen einen monotonen Anstieg über dem Vernetzungsgrad. Prinzipiell lässt sich somit der Vernetzungsgrad sowohl aus der Schallgeschwindigkeit als auch aus der Schallschwächung bestimmen.

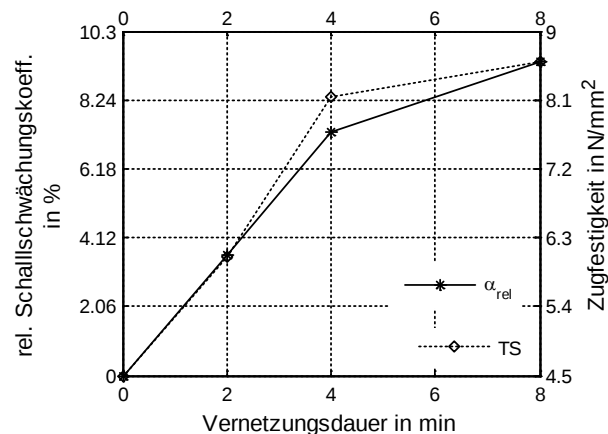


Abbildung 3.6: Relativer Schallschwächungskoeffizient und Zugfestigkeit von EPDM über der Vernetzungsdauer des Polymers, nach [Kna11]

3.2 Forschungsziele

Bisherige Untersuchungsergebnisse zeigen messbare physikalische Zusammenhänge zwischen dem Vernetzungsgrad eines polymeren Elastomers und seinen akustischen Kenndaten. Zentraler Punkt des Forschungsvorhabens ist die Erweiterung dieser Erkenntnisse auf den Bereich der vernetzten Polyethylene, welche standardmäßig in der Kabelindustrie eingesetzt werden. Anhand von Ultraschalluntersuchungen an VPE-Prüflingen unterschiedlicher Vernetzungsgrade sollen Auswertungsmerkmale identifiziert werden, durch welche eine Klassifizierung des Vernetzungsgrades möglich ist. Die messtechnisch ermittelten akustischen Eigenschaften, wie Schallgeschwindigkeit oder akustische Schallschwächung, werden mit abschließenden Dehnungstests zur Bestimmung der Vernetzung der Prüflinge korreliert. Der sich ergebene Zusammenhang wird auf das Isoliersystem eines Energiekabels übertragen und durch Messungen verifiziert. Mit Blick auf ein später anzustrebendes Online-Messsystem werden produktionsbedingte Störeinflüsse, wie die unvorhersehbare Bewegung des Prüflings, untersucht und kompensiert. Die Resultate bieten die Möglichkeit zur Entwicklung eines Online-Messverfahrens und Prüfgerätes in der Kabelproduktion, so dass eine kontinuierliche Messung und Überwachung des Vernetzungsgrades erreicht wird.

Zur Erreichung des Forschungsziels sind experimentelle Untersuchungen mit mehreren Versuchsaufbauten notwendig. Die Bestimmung der akustischen Materialkenndaten gemäß Arbeitspaket (AP) 1 erfolgt in den Laboren der Forschungsstelle 2 (Institut für Hochspannungstechnik). Dazu werden VPE-Materialproben aus der Energiekabelproduktion untersucht (Abbildung 3.7).

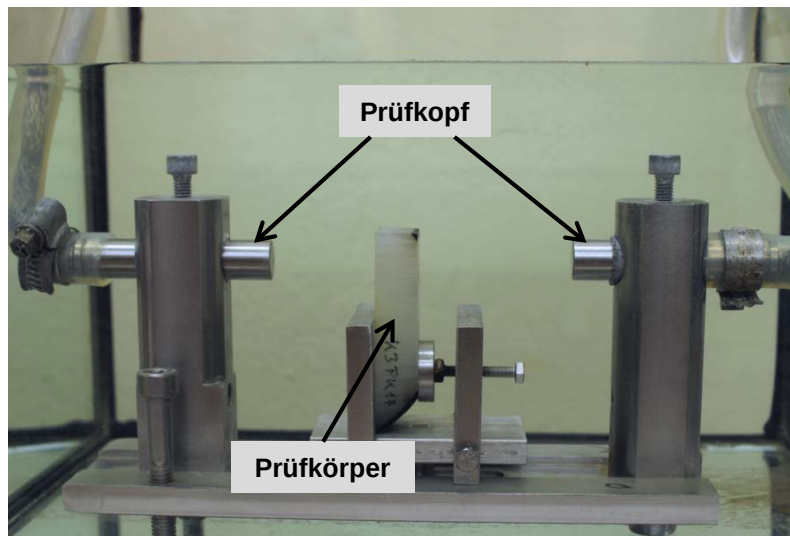


Abbildung 3.7: Standard-Prüfaufbau zur Messung der akustischen Materialeigenschaften von Polymeren am IFHT

Zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Materialparameter ist eine Erweiterung der Ultraschallprüfstände und Messtechnik in Forschungsstelle 2 geplant. Insbesondere sind die vorhandenen Standard-Ultraschallprüfköpfe nur für den Betrieb bei Raumtemperatur geeignet. Da die Prüfköpfe aufgrund des Messverfahrens der gleichen Temperatur wie der Prüfling ausgesetzt sind, ist die Anschaffung spezieller temperaturfester Ultraschallprüfköpfe notwendig. Des Weiteren erfolgt organisatorisch über die Forschungsstelle 2 die Bestimmung der mechanischen Parameter der VPE-Materialproben, damit die direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse der akustischen und mechanischen Messungen sichergestellt ist. Für die nötigen Hot-Set-Tests stellen die Kabelhersteller aus dem projektbegleitenden Ausschuss die Prüfgeräte zur Verfügung.

Die Auswertung und Gegenüberstellung der mechanischen und akustischen Messdaten erfolgt in AP2. Aus den Ergebnissen dieses Vergleichs werden Ansätze zur automatisierten Auswertung der Laborergebnisse entwickelt. Hierbei werden die in früheren Arbeiten an der Forschungsstelle 2 entstandenen Auswertalgorithmen verwendet und weiterentwickelt.

Aufbauend auf der automatisierten Auswertung der Laborergebnisse werden in der Forschungsstelle 1 (Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e. V.) entsprechende Routinen zur messungsbegleitenden Online-Auswertung implementiert, welche als Basis für die zu entwickelnde Online-Auswerte-Software in AP3 dienen. Im Rahmen von AP3 wird in der Forschungsstelle 1 ein Prüfstand zur Vermessung von Kabelader-Prüflingen errichtet. Die Erkenntnisse aus AP 2 hinsichtlich der akustischen Eigenschaften fließen in die Bearbeitung ein. Anschließend erfolgt in AP4 die Verifizierung des entwickelten Auswertungsverfahrens anhand von Messungen an unterschiedlich stark vernetzten Kabelader-Prüflingen (Forschungsstelle 2). Parallel zu AP4 wird in AP5 eine Messapparatur entwickelt, welche an den realen Produktionsprozess angepasst ist (Forschungsstelle 1). Somit kann das entwickelte System auf entsprechende Rahmenbedingungen aus der Produktion, wie zum Beispiel die Auslenkung der Kabelader aus der Messposition, automatisch reagieren und eine kontinuierlich gleichbleibende Messqualität gewährleisten.

4 AP 1: Bestimmung der akustischen Materialkennndaten

4.1 Prüflingsproduktion

Die Grundlage des angestrebten Verfahrens wird durch den Zusammenhang zwischen akustischen Kennndaten und dem Grad der Vernetzung des Polyethylens (PE) gebildet. Da es aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich ist, Kabeladern mit definiert unterschiedlichem Vernetzungsgrad aus der regulären Produktionslinie zu erhalten, werden im ersten Schritt an synthetischen Blockprüfkörpern die verschiedenen akustischen Parameter, wie insbesondere Schallgeschwindigkeit und Schallschwächung auf ihre Abhängigkeit von dem Vernetzungsgrad des vernetzten Polyethylens (VPE) untersucht. Da Energiekabeladern ein Vernetzungsprofil über dem Kabelquerschnitt aufweisen, werden neben homogen vernetzten Blockprüfkörpern weitere Prüflinge mit einem inhomogenen, jedoch definierten Vernetzungsprofil untersucht.

Für die Probenherstellung wird in Abstimmung mit den beiden projektbegleitenden Kabelherstellern eine Polyethylenmischung ausgewählt, die den verwendeten Materialien in der Hoch- und Mittelspannungskabelproduktion entsprechen. Die Herstellung der Prüfkörper erfolgt in den Laboren der Kabelhersteller, wobei Material und Produktionsmaschinen zur Verfügung gestellt werden. Im Gegensatz zur zylindrischen Geometrie einer Kabelader werden in speziellen, beheizbaren Pressen quaderförmige Blockprüfkörper hergestellt (Abbildung 4.1). Hierbei wird eine metallische Prüflingsform zwischen zwei individuell heizbare Metallplatten gelegt und mit vernetzbarem PE als Rohmaterial gefüllt. Die Vernetzung des Materials wird durch das Aufheizen des Materials aktiviert. Durch umfangreiche Vorstudien werden eine optimale Vernetzungstemperatur und verschiedene Heizzeiten ermittelt, da die Realisierung verschiedener Vernetzungsgrade durch eine Variation der Heizzeit erreicht wird. Weiterhin können durch die individuelle Regelung der oberen und unteren Heizplattentemperatur Prüflinge mit homogenen als auch inhomogenen Vernetzungsprofilen erzeugt werden.

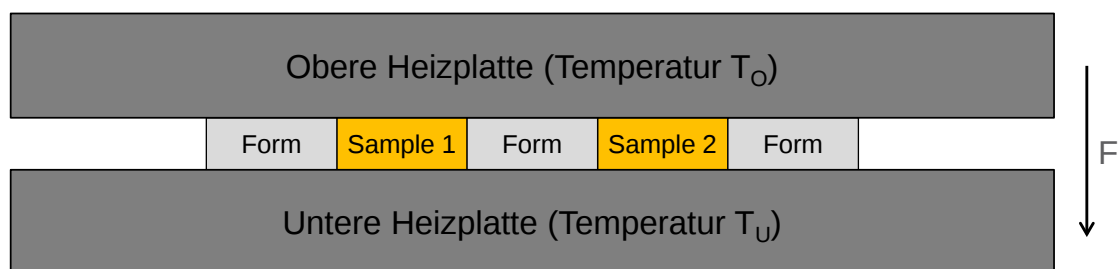


Abbildung 4.1: Prüflingsherstellung mittels beheizbarer Pressvorrichtung

Die PE-Pellets werden zu Beginn der Produktion aufgeschmolzen und bei 120 °C in der Prüflingsform vorgewärmt. Zu Herstellung der homogenen Prüflinge wird die Temperatur beider Heizplatten auf 150 °C erhöht. Je nach gewünschtem Vernetzungsgrad wird die Temperatur direkt wieder abgesenkt oder bis zu 60 min gehalten (Tabelle 4.1). Die inhomogenen Prüflinge werden mit einer oberen Plattentemperatur $T_O = 120$ °C und einer unteren Plattentemperatur $T_U = 180$ °C vernetzt. Zum Abschluss des Vernetzungsprozesses werden die Prüflinge forciert heruntergekühlt.

Nach der Herstellung wird die Kategorisierung der einzelnen Prüfkörper anhand des Vernetzungsstadiums durch eine genormte Wärmedehnungsprüfung (DIN EN 60811-507) verifiziert und festgelegt. Die homogen vernetzten Blockprüfkörper werden in vier

Typen (A-D) klassifiziert (Tabelle 4.1). Sie reichen von unvernetzt über unzulässig vernetzt, und grenzwertig bis hin zu voll vernetzt. Dabei bezeichnet der Ausdruck „grenzwertig vernetzt“ Prüflinge, die die Leistungsanforderung der DIN EN 60811-507 gerade erfüllen und „unzulässig vernetzt“ Prüflinge, die den Test nicht bestehen.

Tabelle 4.1: Vernetzungsklassen

Bezeichnung	Vernetzungsgrad	Heizzeit (min)	Hot-Set-Wert
Typ A	Unvernetzt	0	Prüfling reißt
Typ B	Unzulässig vernetzt	30	225 %
Typ C	Grenzwertig vernetzt	50	173 %
Typ D	Vollvernetzt	60	77 %
Typ I	Inhomogen	60 (Unterseite 180 °C)	Oberseite reißt Unterseite 32 %

4.2 Prüfaufbau und Durchführung der Ultraschalluntersuchungen

Zur Durchführung der Ultraschalluntersuchungen wird ein Prüfstand aufgebaut, der die parallele Messung von mehreren Prüflingen bei verschiedenen Ultraschallprüffrequenzen ermöglicht, um die Messdauer zu reduzieren und gleichzeitig einen möglichen Einfluss der Prüffrequenz auf die Messbarkeit des Vernetzungsgrades zu identifizieren. Die Temperierung der Proben erfolgt in einem Wasserbad mittels eines Kälteumwälzthermostates. Da die Temperatur der Kabelader nach Austritt aus der Vernetzungslinie im Bereich von 40-55°C liegen, wird die Temperatur während der Messung im Bereich 25-75°C variiert. Das Wasserbad bewirkt zusätzlich eine homogene Temperaturverteilung innerhalb der Prüfkörper, so dass die Abhängigkeiten der akustischen Materialparameter von Vernetzungsstadium und Materialtemperatur differenziert betrachtet werden können.

Zur Evaluation einer geeigneten Prüffrequenz werden verschiedene Ultraschallprüfköpfe eingesetzt und deren Einfluss auf die Messbarkeit des Vernetzungsgrades von XLPE analysiert. Der Bereich der Prüffrequenzen wird auf 2 bis 5 MHz eingeschränkt, da bei niedrigeren Frequenzen das Auflösungsvermögen von kleinen Schichtdicken, wie beispielsweise der inneren Leitschicht, verringert wird. Frequenzanteile oberhalb 5 MHz werden in polymeren Materialien stark geschwächt, so dass keine zuverlässige Auswertung aufgrund des geringen Signal-Rausch-Abstandes im Messsignal möglich ist. Bei der Messung der akustischen Materialparameter werden daher die drei Prüffrequenzen 2, 4 und 5 MHz eingesetzt, um den möglichen Prüffrequenzbereich abzudecken.

In ein metallisches Prüfbecken werden die drei Prüfkopfpaare mit den Prüffrequenzen 2, 4 und 5 MHz parallel eingebracht (Abbildung 4.2). Dabei werden die temperaturbeständigen Prüfköpfe mithilfe von Kabeldurchführungen in den Seitenwänden des Beckens befestigt. Die Außenwand des Beckens wird zusätzlich thermisch isoliert, um auch bei hohen Temperaturen eine konstante Temperaturverteilung im Becken zu erreichen. Die Temperierung des Beckens erfolgt mittels eines angeschlossenen Kälte-

Umwälzthermostaten, der eine hochgenaue Temperierung auf einem Bereich von -20 °C bis 200 °C bei einer Temperaturkonstanz von $\pm 0,02$ °C ermöglicht.

Zur Ultraschallmessung können die Prüflinge mit Hilfe von Wechselrahmen einfach und schnell in den Schallweg zwischen zwei Prüfköpfen eingesetzt werden, wodurch der Zeitaufwand für eine Messreihe erheblich reduziert werden kann. Weiterhin können zusätzliche Prüflinge einer Messreihe im Bad des Thermostaten bereits konditioniert werden, wodurch die Gesamtmessdauer weiter verkürzt wird. Die Temperaturmessung erfolgt mit einem Digitalthermometer des Typs K204 unter Einsatz von K-Typ Thermoelementen. Die Temperaturmessdaten werden mit einer Genauigkeit von $\pm(0,2\%+1\text{ K})$ aufgezeichnet und gespeichert. Im Zuge der Auswertung der Ultraschallmessdaten wird jedem Messsignal die zum Messzeitpunkt vorherrschende Temperatur zugeordnet.

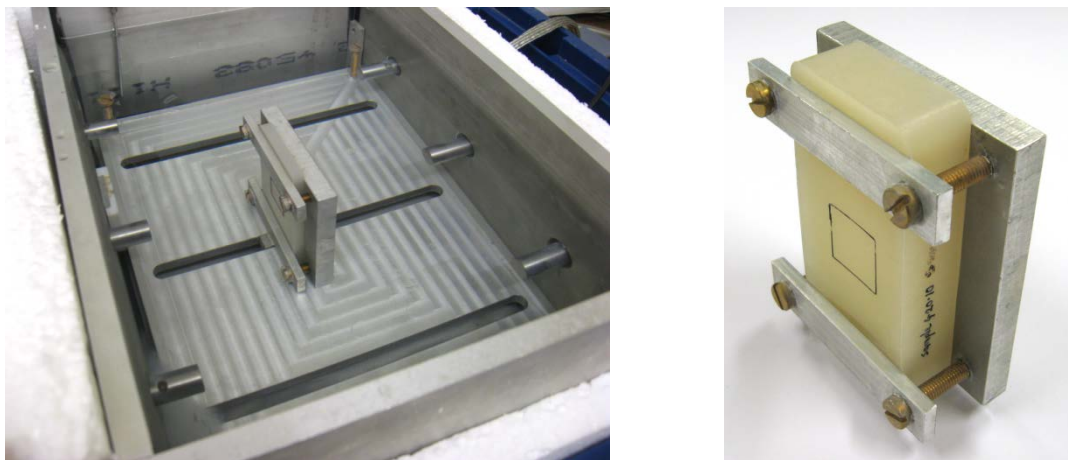


Abbildung 4.2: Prüfaufbau zur Bestimmung der akustischen Materialparameter (links) und XLPE-Prüfling im Wechselrahmen (rechts)

Während einer Messreihe wird die Temperatur zwischen 25 °C und 75 °C in Stufen von 10 °C variiert, um den Temperaturbereich des Isoliersystems in der Kühllinie während der Produktion abzubilden. Zur Sicherstellung eines homogenen Temperaturprofils im Prüfling wird die Ultraschallmessung erst durchgeführt, sobald ein stationärer Wert der Schallgeschwindigkeit erreicht ist. Begrenzt durch die Heizleistung des Umwälzthermostates wird die Zieltemperatur im Prüfbecken nach ca. 40 min erreicht. Nach einer Stunde konstanter Temperatur im Prüfbecken ist die Schallgeschwindigkeit des Prüflings auf einen Wert eingeschwungen, der weniger als 1 m/s vom Endwert abweicht. Dieser Wert liegt im Bereich der Messgenauigkeit im Labor.

Mit Erreichen des stationären Zustandes werden an jedem Prüfling der Messreihe 10 bis 15 Einzelmessungen durchgeführt, um die statistische Sicherheit der ausgewerteten Größen zu erhöhen. Insgesamt werden somit 50 Prüflinge aus XLPE bei sechs Temperaturstufen und drei Prüffrequenzen untersucht (Tabelle 4.2). Die Größe des aufgenommenen Datensatzes beträgt circa 13.000 Messsignale, deren detaillierte Auswertung im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Tabelle 4.2: Parametervariation der Messreihen

Parameter	Durchschallungsmessungen
Temperatur	25-75 °C in 10 °C Schritten
Vernetzungsgrad	Typ A-D, Typ I
Prüflingsdicken	6 und 20 mm
Prüffrequenz	2, 4, 5 MHz

4.3 Ergebnisse der Materialuntersuchungen

Im Rahmen des Projektes werden sowohl Durchschallungs- als auch Impuls-Echo-Messungen an den Blockprüflingen durchgeführt. Aufgrund des Produktionsprozesses weisen die Blockprüflinge keine planparallelen Oberflächen auf. In fast allen Fällen ist die Oberfläche aufgrund des Materialschrumpfs während der Abkühlung konkav gewölbt. Während die Durchschallungsmessung wenig empfindlich auf geometrische Abweichungen in Bezug auf die Prüfkopfoberfläche reagiert, zeigen die Ergebnisse der Impuls-Echo-Messung eine sehr starke Abhängigkeit von der Ausrichtung. Bereits eine Fehlausrichtung um einen Winkel von weniger als 1° kann eine signifikante Abnahme der Amplitude bedeuten. Verschiedene Ansätze zur Bearbeitung der Oberfläche mittels Schneiden oder Schleifen konnten die Aussagekraft der Impuls-Echo-Messungen nicht verbessern, da die durch die mechanische Bearbeitung entstehende Wärme lokal die Materialeigenschaften des Prüflings verändert hat. Für die genaue Bestimmung der Materialparameter werden daher nur die Messdaten der Durchschallungsmessungen verwendet und im Folgenden präsentiert.

Die Auswertungen der Ultraschallmessdaten zeigen an den unterschiedlich vernetzten Proben eine deutliche Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeiten von der Temperatur (Abbildung 4.3). Mit steigender Temperatur nimmt die Schallgeschwindigkeit für Prüfkörper mit identischem Vernetzungsstadium ab. Ferner nimmt die Schallgeschwindigkeit mit steigendem Vernetzungsgrad der Prüfkörper betrachtet bei einer konstanten Temperatur ab.

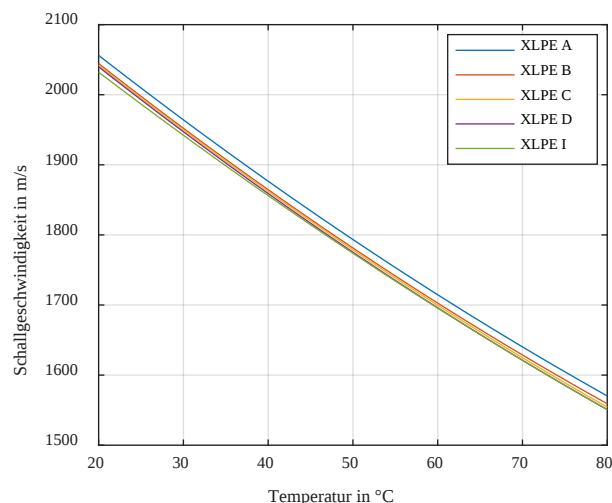


Abbildung 4.3: Schallgeschwindigkeit von vernetztem Polyethylen in Abhängigkeit der Temperatur und des Vernetzungsgrades

Um die Temperaturabhängigkeit (θ) der Schallgeschwindigkeit der polymeren Materialien zu beschreiben, wird für XLPE ein quadratisches Modell verwendet, da dieses Modell eine höhere Anpassungsgüte als ein lineares Modell aufweist.

$$c(\theta) = a \cdot \theta^2 + b \cdot \theta + \theta_0 \quad (\text{F } 2)$$

Die Parameter a , b und θ_0 werden für jeden Vernetzungsgrad mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate getrennt gefittet. Das Bestimmtheitsmaß R^2 zeigt für jede Vernetzungsklasse einen Wert größer als 0,997, wobei ein Wert von 1 bedeutet, dass die Messdaten vollständig durch das Modell erklärt werden.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und da die Temperaturabhängigkeit der Materialien generell untersucht werden soll, sind in der Abbildung 4.4 für XLPE-Proben nur die Ergebnisse der Prüfkörper mit einer Materialstärke von 20 mm dargestellt. Die Proben mit 6 mm Materialstärke zeigen eine vergleichbare Temperaturabhängigkeit. Ebenso werden in dieser Grafik keine Konfidenzbereiche präsentiert. Die maximalen Residuen der Modelle als Maß für die Streuung liegen für jeden Fall in einem Bereich kleiner als $\pm 20 \text{ m/s}$. Die Parameter a und b , die die Steigung der Kurven beschreiben, sind für alle Vernetzungsklassen nahezu identisch. Es ist daher davon auszugehen, dass die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit im untersuchten Temperaturbereich nicht vom Vernetzungsgrad abhängt. Im Allgemeinen ist der quadratische Anteil von $0,02 \text{ m/(s} \cdot \text{K}^2)$ für XLPE signifikant niedriger als der lineare Anteil von $-10,3 \text{ m/(s} \cdot \text{K)}$. Der Offset θ_0 zeigt andererseits eine direkte Abhängigkeit vom Vernetzungsgrad des XLPE. Die Schallgeschwindigkeit des Isoliermaterials nimmt mit zunehmendem Vernetzungsgrad ab.

Eine detailliertere Übersicht über die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vom Vernetzungsgrad liefert die Beobachtung der Ergebnisse bei konstanter Temperatur (Abbildung 4.4). Wenn nicht ausdrücklich anders angegeben, werden in diesem Bericht die 95% -Konfidenzintervalle der gemessenen Daten als Maß für die Streuung verwendet. Die abnehmende Tendenz der Schallgeschwindigkeit bei zunehmendem Vernetzungsgrad für die homogenen Prüfkörper A-D ist hier deutlich zu erkennen. Der Unterschied zwischen Typ A und Typ D liegt bei ca. 20 m/s .

Die Schallgeschwindigkeit zeigt außerdem eine Abhängigkeit von der Probendicke. Dieser Zusammenhang lässt sich durch die Dispersion aufgrund der akustischen Dämpfung erklären. Die Dämpfung des Materials wirkt auf das Ultraschallsignal als Tiefpass, eine höhere Materialdicke entspricht dabei einer niedrigeren Grenzfrequenz des Tiefpasses. So wird die Signalform eines Ultraschallimpulses bei einer Dicke von 20 mm stärker verformt als bei 6 mm. Die Laufzeitverzerrung führt schließlich zu einer geringeren Schallgeschwindigkeit.

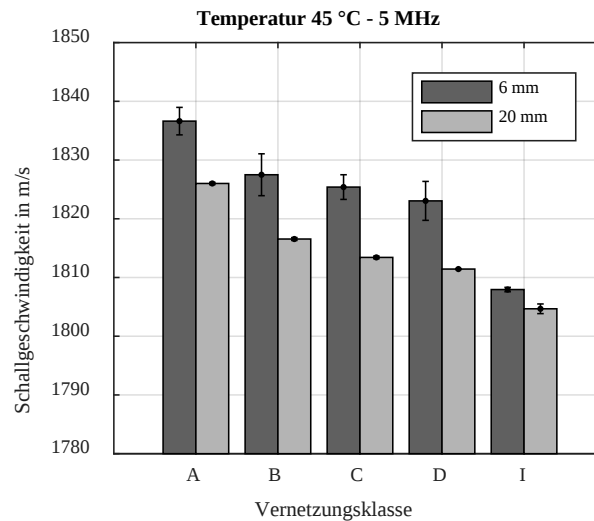


Abbildung 4.4: Schallgeschwindigkeit von XLPE bei 45 °C und 5 MHz für unterschiedliche Prüflingsdicken

Die Proben des inhomogenen Typs besitzen eine geringere Schallgeschwindigkeit als der vollständig vernetzte Typ D. Ausgehend von Dichtemessungen und Hot-Set-Messungen an den verschiedenen vernetzten Proben kann davon ausgegangen werden, dass die Proben des Typs I trotz der einseitigen Vernetzung im Durchschnitt einen höheren Vernetzungsgrad aufweisen als die Proben des Typs D. Um eine mögliche Anisotropie der Materialeigenschaften der inhomogen vernetzten Proben zu untersuchen, werden die Ultraschallimpulse in zwei Messungen einmal von der Ober- und einmal von der Unterseite der Probe eingekoppelt. Bei der Berechnung der Schallgeschwindigkeit kann jedoch keine Richtungsabhängigkeit festgestellt werden. Die Signalf orm des empfangenen Impulses ist unabhängig von der Ausrichtung des Prüflings identisch.

Die vorgestellten Ergebnisse beziehen sich alle auf die Ausbreitung longitudinaler Ultraschallwellen. In weiteren Versuchen soll der Einfluss des Vernetzungsgrades auf die Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle untersucht werden. Dabei soll insbesondere festgestellt werden, ob durch Transversalwellen eine Unterscheidung zwischen homogenen und inhomogenen Prüflingen ermöglicht werden kann. Zur Erzeugung der Transversalwellen wird ein Prüfaufbau mit verschiedenen Anstellwinkeln des Prüflings in Relation zum Ultraschallprüfkopf eingesetzt, da sich bei schrägem Schalleinfall (d.h. bei einem vom Lot verschiedenen Winkel) Transversalwellen im Material ausbilden. Zur Verifikation des Prüfaufbaus werden zunächst Messungen an PVC durchgeführt, bei denen die Ausbildung einer Transversalwelle nachgewiesen werden konnte. Weitere Untersuchungen an XLPE hingegen zeigen, dass es nicht möglich ist, messbare Transversalwellen durch schräg einfallende Ultraschallimpulse zu erzeugen. Falls im Material eine Transversalwelle entsteht, so wird diese durch das Material so stark gedämpft, dass sie nicht mehr detektiert werden kann.

Der zweite akustische Parameter, der auf seine Abhängigkeit vom Vernetzungsgrad untersucht wird, ist der Schalldämpfungskoeffizient bei konstanter Frequenz (Abbildung 4.5). Der Dämpfungskoeffizient wird für jeden Prüfling separat ermittelt und der Mittelwert über alle Prüflinge einer Vernetzungs-kategorie gegen die Temperatur aufgetragen. Im Gegensatz zur Schallgeschwindigkeit wird kein monotoner Verlauf des Dämpfungskoeffizienten beobachtet. Die Schalldämpfung besitzt ein Maximum von ca. 28 dB/cm für 5 MHz bei 35 °C und sinkt zu

höheren Temperaturen ab. Insgesamt ist mit zunehmendem Vernetzungsgrad tendenziell eine Zunahme der Dämpfung zu beobachten. Nur der unvernetzte Typ A ist deutlich von den Werten der anderen Klassen zu unterscheiden. Während eine Klassifizierung des Vernetzungsgrades anhand der Schallgeschwindigkeit bereits möglich erscheint, ist der Dämpfungskoeffizient bei einer festen Frequenz aufgrund des geringen Abstands zwischen den verschiedenen Klassen (Größenordnung 1 dB / cm) als alleiniges Klassifizierungsmerkmal noch nicht geeignet. Durch eine Auswertung über den gesamten Frequenzbereich des Ultraschallsignals kann die Schalldämpfung jedoch neben anderen Signalparametern zur Bestimmung des Vernetzungsgrades herangezogen werden.

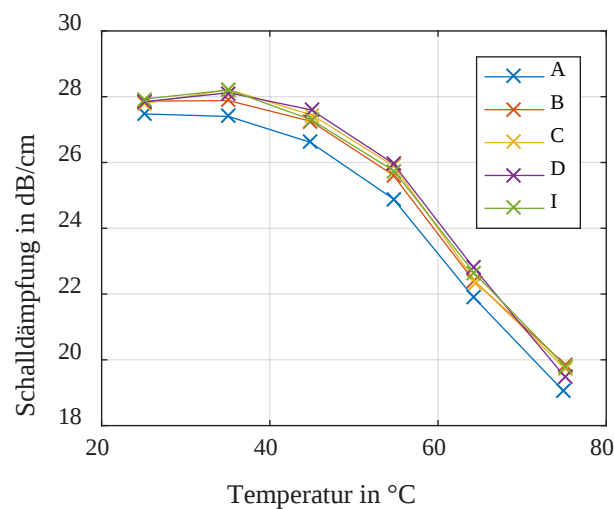


Abbildung 4.5: Temperaturabhängigkeit der akustischen Schalldämpfung von XLPE bei 5 MHz

5 AP 2: Entwicklung und Implementierung eines Auswertungsansatzes

5.1 Multivariate Klassifikation von Ultraschallmessdaten

Bei der univariaten Auswertung, d. h. der Analyse einer einzelnen Variable beispielsweise der Schallgeschwindigkeit, ist die Variation der akustischen Materialparameter mit dem Vernetzungsgrad eindeutig messbar. In vielen Fällen kann jedoch die Genauigkeit eines Klassifizierungsverfahrens durch eine ganzheitliche Betrachtung verschiedener Auswerteparameter verbessert werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden daher multivariate Klassifikationsverfahren auf ihre Eignung zur Bestimmung der Vernetzungsstufe eines Prüflings auf der Basis von Ultraschallmessdaten untersucht. Das Gesamtproblem kann in die Klasse der Mustererkennungsprobleme eingeordnet werden. Grundsätzlich erfolgt hierbei eine Klassifizierung des Prüflings in eine vordefinierte Klassenstruktur auf der Basis unterschiedlicher Eigenschaften eines Messsignals. Neben der zuvor beschriebenen Schallgeschwindigkeit und -dämpfung stehen eine ganze Reihe weiterer potenzieller Signalparameter wie das Frequenzverhalten des Signals zur Verfügung. Werden mehrere Parameter ausgewertet wird der aufgespannte Parameterraum schnell sehr komplex und bei Dimensionen größer als drei schwierig zu visualisieren. Die Klassifizierung durch den Betrachter ist für mehrdimensionale Probleme schwierig bis unmöglich. Für die Lösung werden daher Methoden des überwachten maschinellen Lernens eingesetzt.

Die Vorgehensweise ist grundsätzlich für alle Methoden gleich (Abbildung 5.1). Die Messdaten werden nach der Erfassung durch das Ultraschallmesssystem aufbereitet. Durch die Auswahl geeigneter Filter wie Mittelwert und Bandpassfilter wird das Messrauschen reduziert und es werden fehlerhafte Messwerte aussortiert. Aus den Rohdaten jeder einzelnen Messung werden dann verschiedene Merkmale extrahiert, die ein einzelnes Signal mit hinreichender Genauigkeit charakterisieren. Die einzelnen Merkmale können hinsichtlich ihres Einflusses auf die Klassifizierung bewertet und damit der Gesamtumfang reduziert werden. Für die Klassifizierung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Im Rahmen dieses Projektes haben sich die Methoden der k-Nächste-Nachbarn Klassifikation, der Entscheidungsbäume und der neuronalen Netze als vorteilhaft erwiesen. Zum Training und der Validierung der Modelle wird die Statistics and Machine Learning Toolbox von MATLAB verwendet.

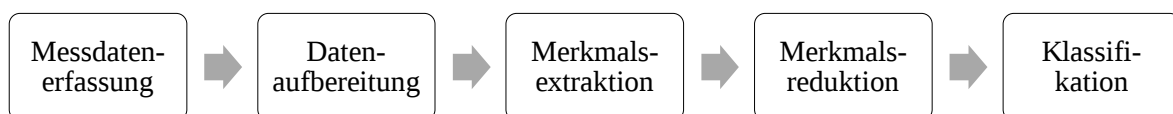


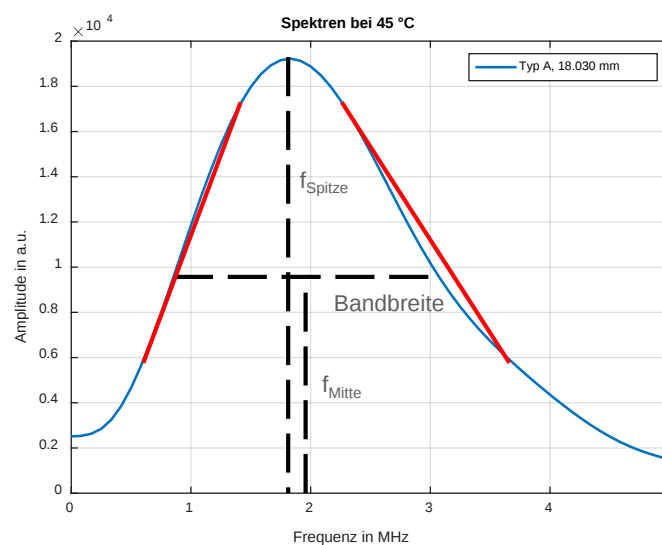
Abbildung 5.1: Vorgehensweise zur Klassifikation

Die Abhängigkeit der konventionellen akustischen Parameter vom Vernetzungsgrad wurde bereits beschrieben. Darüber hinaus sollen einige unkonventionelle Parameter für die Ultraschallmesstechnik ausgewertet und in der Datenbank für die multivariate Klassifikation gespeichert werden. Einen Überblick über die untersuchten Merkmale M1-M18 gibt , die die Schallgeschwindigkeit (M1) und die Dämpfung bei verschiedenen diskreten Frequenzen (M2-M7) beinhaltet. Weiterhin werden die externen Parameter Materialtemperatur und –dicke (M10/M11) erfasst.

Tabelle 5.1: Merkmale zur multivariaten Klassifikation

Bezeichnung	Merkmal	Bezeichnung	Merkmal
M1	Schallgeschwindigkeit	M10	Temperatur
M2	Dämpfung bei Mittenfrequenz	M11	Materialdicke
M3	Dämpfung bei 1 MHz	M12	Erwartungswert
M4	Dämpfung bei 2 MHz	M13	Varianz
M5	Dämpfung bei 3 MHz	M14	Standardabweichung
M6	Dämpfung bei 4 MHz	M15	Schiefe
M7	Dämpfung bei 5 MHz	M16	Exzess
M8	Mittenfrequenz	M17	Steigende Flanke
M9	Bandbreite	M18	Fallende Flanke

Weitere auswertbare Parameter sind die Bandbreite (M9), definiert durch die Reduzierung der Amplitude um 50 % im Frequenzspektrum, und die Mittenfrequenz (M8). Beide sind ebenfalls als konventionelle Parameter anzusehen (Abbildung 5.2).

**Abbildung 5.2: Frequenzspektrum und mögliche Auswerteparameter**

Um den Frequenzgang weiter zu charakterisieren, werden u.a. die Gradienten der steigenden (M17) und fallenden Flanken (M18) des Spektrums ausgewertet. Zu diesem Zweck wird eine Linie durch die Punkte bei 30% und 90% der maximalen Amplitude gelegt und ihre Gradienten werden in der Datenbank gespeichert. Ferner werden Methoden der Statistik verwendet, um weitere Kenngrößen aus dem Spektrum abzuleiten, da das Frequenzspektrum eines Ultraschallimpulses einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ähnelt. Insbesondere die Berechnung des Erwartungswertes, der Varianz und der höheren Momente (M12-M16) werden als weitere Merkmale zur Klassifikation genutzt.

5.2 Ergebnisse der multivariaten Klassifikation

Aus dem Gesamtdatensatz der Messsignale wird für jede einzelne Messung der Merkmalsvektor berechnet. Im Rahmen des Projektes werden verschiedene Klassifikationsalgorithmen für unterschiedliche Merkmalsvektoren, die nur ausgewählte Teile der gesamten Merkmale enthalten, untersucht. Beispielfhaft werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse für eine Klassifizierung mit Entscheidungsbäumen dargestellt. Die Größe des Trainingsdatensatzes beträgt in diesem Beispiel 2544 Beobachtungen und die Größe des Validierungsdatensatzes 500 Beobachtungen. Als Merkmale werden die Schallgeschwindigkeit (M1), Dämpfung (M3-M7), Temperatur (M10), Materialdicke (M11), Varianz (M13) und Flankensteilheit (M17-M18) verwendet.

Die Klassifizierungsgenauigkeit des trainierten Modells erreicht Werte von nahezu 100 % (Abbildung 5.3). Während alle Beobachtungen des Testdatensatzes für Prüflinge der Klasse A (unvernetzt) richtig klassifiziert werden, nimmt die Genauigkeit für die mittleren Vernetzungsstufen ab. Dabei sind insbesondere die Fälle, die oberhalb der Diagonalen liegen, kritisch für die Produktqualität. Beispielsweise wird in 2,4 % der Fälle ein unvernetzter (A, 0.8 %) oder unzulässig vernetzter (B, 1.6 %) Prüfling als ausreichend vernetzt (C) klassifiziert. Dadurch würden unzulässige Produktionszustände nicht erkannt. Die Fälle unterhalb der Diagonale, wie die Einordnung eines ausreichend vernetzten Prüflings (C) als unzureichend vernetzt (B) ist aus Produktqualitätssicht zunächst nicht kritisch. Möglicherweise werden jedoch unnötige Gegenmaßnahmen im Produktionsprozess vorgenommen, die zusätzliche Kosten verursachen. Die hohe Genauigkeit der Vorhersage in Kombination mit der Möglichkeit einer kontinuierlichen Überwachung und Trendanalyse des Klassifikationsergebnisses ermöglicht jedoch eine zuverlässige Überwachung des Vernetzungsprozesses.

Wahre Klasse	A	100 %	0 %	0.8 %	0 %
	B	0 %	98.5 %	1.6 %	0 %
	C	0 %	1.5 %	97.6 %	0.8 %
	D	0 %	0 %	0 %	99.2 %
		A	B	C	D
		Vorhergesagte Klasse			

Abbildung 5.3: Wahrheitsmatrix als Indikator für die Klassifikationsgenauigkeit des Modells „Bagged Trees“

Die Betrachtung weiterer Klassifikationsalgorithmen zeigt, dass sich auch andere Verfahren, die beispielsweise auf der k-nächste Nachbarn Methode beruhen, zur Klassifikation von Ultraschallsignalen eignen (Abbildung 5.4). In Bezug auf die Messung des Vernetzungsgrades haben sich die Entscheidungsbäume jedoch wie bereits präsentiert als bestes Verfahren herausgestellt. Die Verwendung neuronaler Netze hingegen scheint zunächst ungeeignet. Als Ursache ist hier unter anderem die begrenzte Größe des Trainingsdatensatzes zu nennen. Bei Vorlage eines größeren Datensatzes aus dem Monitoring einer industriellen Produktionslinie, wobei sogar zusätzliche externe

Prozessparameter als Merkmale in die Klassifizierung eingehen könnten, könnte der Einsatz neuronaler Netze neu bewertet werden.

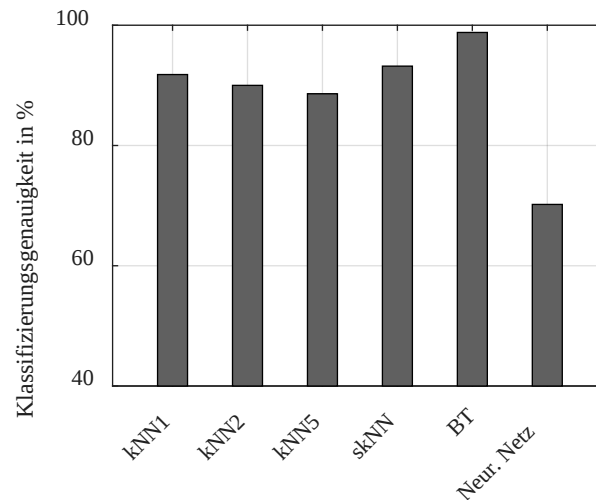


Abbildung 5.4: Genauigkeit der verschiedenen Klassifikationsalgorithmen

Die hohe Klassifikationsgenauigkeit der verschiedenen Modelle ist zunächst als sehr positiv zu bewerten. Im Rahmen der Laboruntersuchungen liegen jedoch alle Messdaten mit einer höheren Genauigkeit vor, als sie in einem industriellen Umfeld gewährleistet werden können. Beispielsweise beträgt die Fehlergrenze der Bügelmessschraube zur Bestimmung der Schichtdicke des Isoliermaterials laut Datenblatt des Herstellers $6\ \mu\text{m}$. Ebenso kann die Materialtemperatur im Labor mit einer Genauigkeit von $\pm(0,2\%+1\ \text{K})$ gemessen werden. Daher wird im nächsten Schritt die Sensitivität des Klassifikationsmodells der „Bagged Trees“ gegenüber Messfehlern in den externen Eingangsdaten betrachtet (Abbildung 5.5). Dazu wird ein Ultraschallsignal von einem Prüfling ausgewählt, dessen Vernetzungsklasse bekannt ist. Die Schichtdickenmessung als auch Temperaturmessung werden im Folgenden mit einem Messfehler beaufschlagt und in das Klassifikationsmodell gegeben. Im Falle eines Signals der Klasse A ist ab $+100\ \mu\text{m}$ Messfehler eine Klassifizierung als Klasse B zu verzeichnen (Abbildung 5.5 links). Ebenso ist für einen Prüfling der Klasse D ab $+100\ \mu\text{m}$ eine Fehlklassifikation in Klasse C zu erwarten (Abbildung 5.5 rechts). Kritischer ist im zweiten Fall die Fehlklassifikation eines Prüflings der Klasse D (unvernetzt) in Klasse B ab einem Schichtdickenfehler von ca. -150 bis $-200\ \mu\text{m}$. Dieser würde unnötige Eingriffe in den Produktionsprozess hervorrufen.

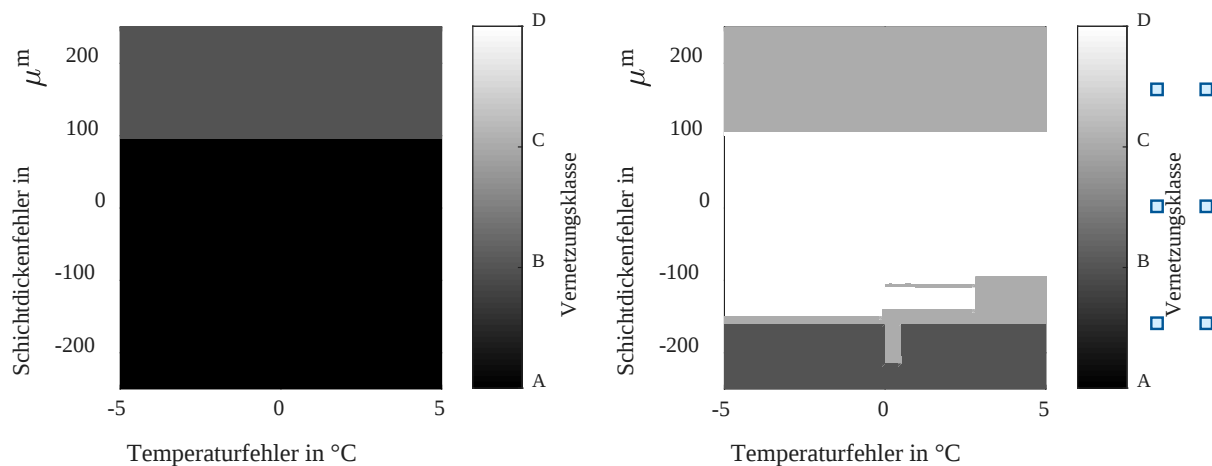


Abbildung 5.5: Sensitivitätsanalyse des Modells „Bagged Trees“ für ein Ausgangssignal der Klasse A (links) und der Klasse D (rechts)

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass insbesondere die Schichtdickenmessung einen sehr großen Einfluss auf das Klassifikationsergebnis besitzt, während die Abhängigkeit vom Fehler der Temperaturmessung vergleichsweise gering ist. Da unter Produktionsbedingungen eine Messungenauigkeit der Schichtdickenmessung im Bereich von 100 μm oder höher zu erwarten ist, ist die Aussagekraft der multivariaten Klassifikationsmodelle eingeschränkt. Weiterhin konnte bei der Untersuchung verschiedener Parametersätze und Klassifikationsmodelle keine Verbesserung der Sensitivität festgestellt werden. Abschließend zeigen Untersuchungen zum Einfluss der verschiedenen Merkmale, dass vor allem die Schallgeschwindigkeit gefolgt von der akustischen Dämpfung das Klassifikationsergebnis dominiert. Die quantitative Aussagekraft kann somit durch die multivariate Auswertung nicht signifikant verbessert werden. Im Folgenden wird daher ein univariater Ansatz zum qualitativen, kontinuierlichen Produktionsmonitoring weiter verfolgt.

5.3 Berücksichtigung der Kabelgeometrie

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Laboruntersuchungen wurden an planparallelen Blockprüflingen durchgeführt. Dadurch kann der Einfluss der Geometrie auf das Reflexionsverhalten und somit auf die Amplitude des reflektierten Signals vernachlässigt werden. Eine Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten ist somit sehr einfach möglich. Zur quantitativen Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten bei der Messung an einer Kabelader muss jedoch der Geometrieeinfluss der gekrümmten Oberfläche berücksichtigt werden. Die Untersuchungen zur Geometrieabhängigkeit sind im Rahmen des Projektes parallel zur Entwicklung des Auswerteverfahrens erfolgt. Da die Auswertung der Materialuntersuchungen bereits ein relatives und qualitatives Monitoring des Vernetzungsprozesses anhand der Schallgeschwindigkeit nahelegen, ist hierfür eine Betrachtung des Geometriefaktors prinzipiell nicht notwendig. Aus Gründen der Vollständigkeit sollen die Ergebnisse dennoch kurz präsentiert werden.

Der Geometriefaktor ist allgemein als materialunabhängig anzusehen. Aufgrund der einfacheren Herstellung werden zur Untersuchung der Geometrieabhängigkeit Zylinderprüflinge aus Polyoxymethylen (POM) hergestellt. Dabei werden Prüflinge mit verschiedenen Innen- und Außendurchmessern gefertigt, um möglichst das gesamte Spektrum verschiedener Energiekabeldesigns abzubilden. Der Innenradius wird im Bereich der Leiterquerschnitte von 185-3000 mm^2 und die Isolierschichtdicke – und somit der Außendurchmesser – entsprechend der Spannungsebenen von 10-500 kV variiert. Insgesamt ergeben sich 31 unterschiedliche Prüflinge, die einzeln mittels Ultraschall in Impuls-Echo-Technik vermessen werden. Zusätzlich wird ein ebener Referenzreflektor untersucht, der ebenfalls aus POM gefertigt ist. Durch Quotientenbildung der reflektierten Schalldruckamplitude an einem gekrümmten Prüfling zur Reflexion am ebenen Prüfling kann der Geometriefaktor bestimmt werden (Abbildung 5.6 links).

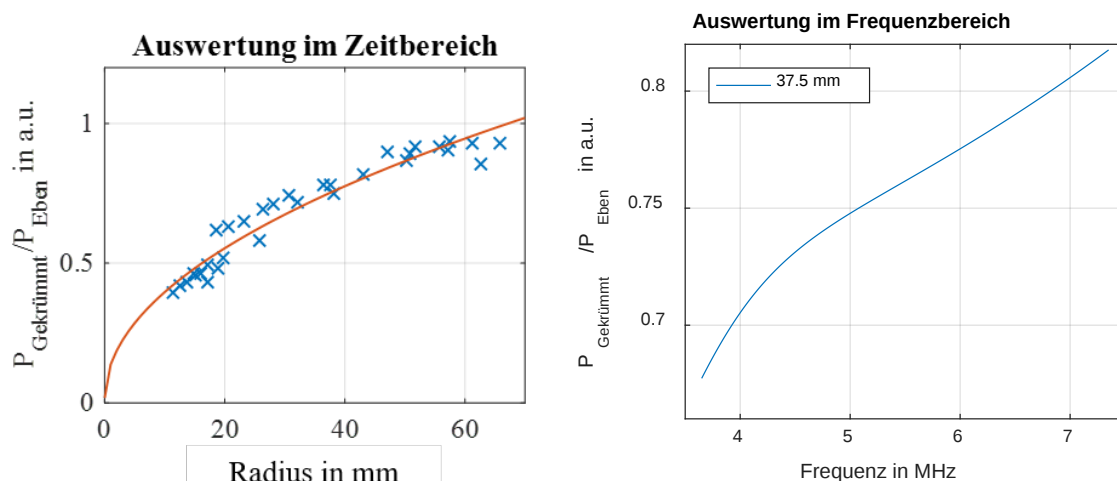


Abbildung 5.6: Untersuchungen zur Geometrieabhängigkeit der Ultraschallreflexion

Das Verhältnis der Schalldrücke im Zeitbereich folgt der Literatur nach einer Wurzelfunktion [Kra86].

$$R_{geo} = \frac{P_{Gekrümmt}}{P_{Eben}} = \frac{\sqrt{2 \cdot r}}{\lambda \cdot z^{1.5}} \quad (F\ 3)$$

Dabei ist r der Radius des Reflektors, λ die Wellenlänge des Signales und z der Abstand zwischen Ultraschallprüfkopf und der Reflektoroberfläche. Der Abstand zur Oberfläche und die Prüffrequenz wird während der Messung für alle Prüflinge konstant gehalten, sodass eine alleinige Abhängigkeit vom Reflektorradius entsteht. Die Auswertung zeigt, dass die Messdaten sehr gut mit dem Verlauf des Fittings übereinstimmen und somit die Geometrieabhängigkeit falls notwendig einfach analytisch angenähert werden kann (Abbildung 5.6 links). Zusätzlich ist aufgrund der Abhängigkeit von der Wellenlänge keine Frequenzabhängigkeit des Geometriefaktors festzustellen (Abbildung 5.6 rechts). Für die verschiedenen Kabelgeometrien liegt mit Abschluss des Projektes ein Datensatz über die Frequenzabhängigkeit des Geometriefaktors vor, der zur quantitativen Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten verwendet werden kann.

5.4 Zwischenfazit Auswertungsansatz

Während der multikriteriellen Auswertung wurden verschiedene Klassifizierungsalgorithmen (z.B. k-nächste-Nachbarn-Algorithmus) ausgewählt und bewertet. Dabei werden die Klassifizierungsalgorithmen auf Basis eines Lerndatensatzes bestehend aus den Kenngrößen der Messsignale trainiert und validiert. Die Ausgabegröße der Klassifizierungsalgorithmen ist hierbei die Vernetzungsklasse. Neben der Variation der Algorithmen wird eine Variation der Eingabeparameter durchgeführt. Beispielsweise werden Klassifizierungen mit allen – konventionellen und unkonventionellen – Kenngrößen als auch mit einer Auswahl (z.B. allein Schallgeschwindigkeit und Schalldämpfung) durchgeführt. Als Ergebnis der Untersuchungen lässt sich festhalten, dass die Schallgeschwindigkeit am besten zur Bestimmung des Vernetzungsgrades geeignet ist. Während auch die Schalldämpfung als möglicherweise geeignet erscheint, verursacht die Zunahme der unkonventionellen Kenngrößen zum Eingangsparametersatz eine Verschlechterung der Klassifizierungsergebnisse. Für die qualitative Onlineauswertung kommen daher prinzipiell die Signallaufzeit und Signalamplitude in Frage, wobei die Amplitudenmessung fehleranfälliger ist und daher die Auswertung der Laufzeit bevorzugt wird.

6 AP 3: Labordemonstrator zur Messung des Vernetzungsgrades

6.1 Schematische Darstellung

Der Technologie-Demonstrator bildet die Produktionslinie eines Energiekabels nach. Der Demonstrator soll zeigen, dass während der Produktion kontinuierlich der Vernetzungsgrad ermittelt werden kann.

Im Labor ist es nicht möglich reale Kabellängen einer Produktionslinie von bis zu 900m zu untersuchen. Daher sieht das Konzept (vgl. Abbildung 6.1) vor, Kabeladerprüflinge (1) von bis zu 2m Länge zu verwenden, die statisch auf einer Haltekonstruktion (2) gelagert werden. Die relative Bewegung des Kabels zu der Ultraschallmessanordnung in der Produktionslinie wird hingegen durch eine Linearachse (4) nachgebildet. An dem linear bewegten Ausleger (5) können verschiedene Ultraschall-Prüfanordnungen (6) befestigt werden, womit die relative Bewegung zwischen Kabel und Messvorrichtung aus der Produktionslinie gut nachgebildet ist. Die Ultraschalluntersuchungen nutzen als Koppelmedium Wasser, weshalb der Kabeladerprüfling und die Haltekonstruktion von einem Auffangbehälter (3) umgeben sind.

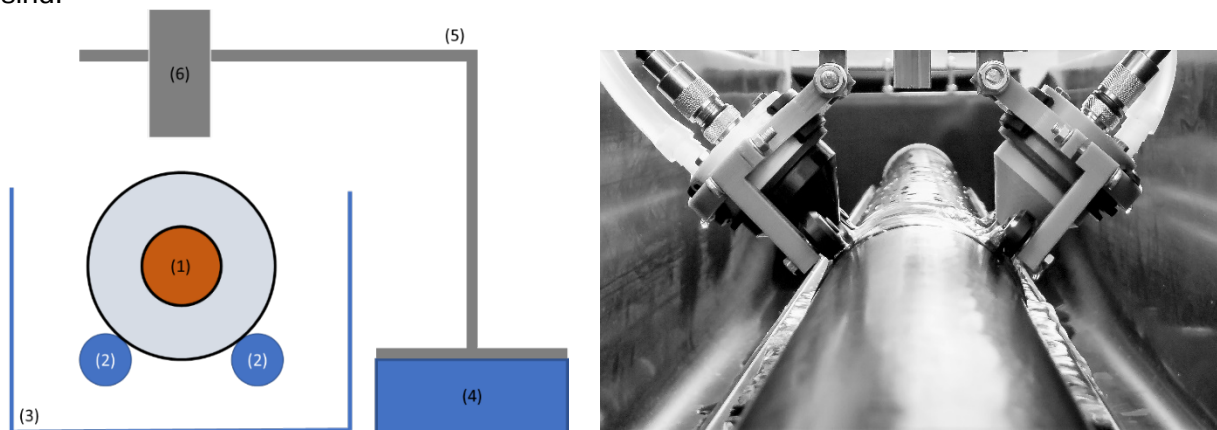


Abbildung 6.1 Schematische (links) und reale (rechts) Darstellung des Technologie-Demonstrators

6.2 Online-Auswertung

In diesem Abschnitt wird zunächst das Konzept der Online-Auswertung dargestellt. Anschließend werden die verschiedenen Auswertemöglichkeiten vorgestellt und bewertet.

Der schematische Ablauf der Online-Auswertung ist in Abbildung 6.2 gegeben. Die relative Bewegung zwischen Prüfkopf-anordnung und Kabeladerprüfling wird in der Produktionslinie durch Positionsänderung des Kabels erreicht, im Laboraufbau durch die Positionsänderung der Prüfkopf-anordnung. Die Messwernerfassung und die kontinuierliche relative Bewegung zwischen Kabel und Prüfkopf-anordnung sind unabhängig voneinander, sodass keine Positionsinformation zu den Messwerten vorliegt. Zwar könnte durch aufwendige weitere Sensorik eine Position bestimmt werden, dies wird allerdings hier nicht weiter untersucht. Die Messwernerfassung besteht aus diskret abgetasteten Einzelmessungen, die A-Scan bezeichnet werden. Jeder A-Scan wird an einer Messstelle aufgenommen, der Signalverlauf entspricht den Laufzeiten des Ultraschalls und der Reflektion an verschiedenen Grenzschichten des Kabeladerprüflings. Nach der Messwernerfassung durch das Ultraschallmesssystem wird jeweils ein A-Scan für die Online-Auswertung herangezogen. Abschließend kann damit eine Bewertung des Vernetzungsgrades durchgeführt werden. Die Online-Auswertung wird im Folgenden detailliert erklärt.

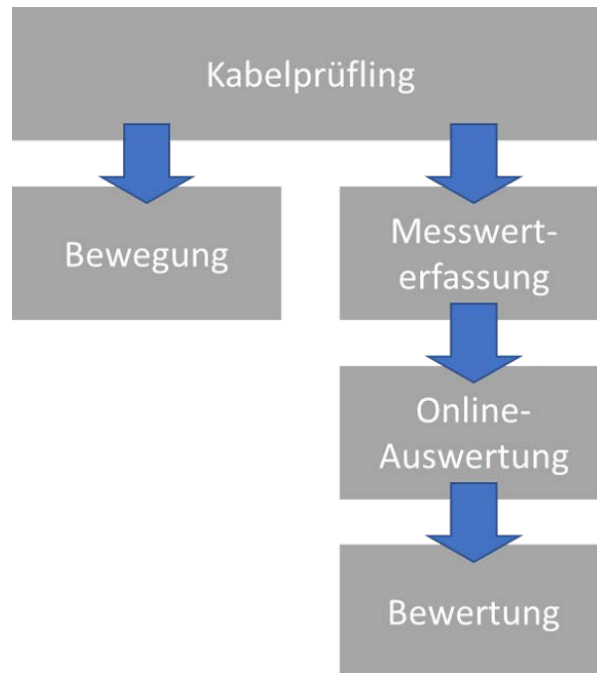


Abbildung 6.2 Schematischer Aufbau Online-Auswertung

Die Online-Auswertung besteht aus mehreren Berechnungsschritten zur Datenaufbereitung und Filterung. Die untersuchten Berechnungsschritte sind in Abbildung 6.3 gegeben. Diese sind individuell aktivierbar, so dass eine gezielte Untersuchung der Einzeleinflüsse auf das Auswertungsergebnis möglich ist. Als Eingangs-Messdatensatz wird jeweils ein A-Scan des Ultraschallmesssystems verwendet. Lediglich bei der Mittelung werden mehrere aufeinander folgende A-Scans verwendet und der Mittelwert gebildet, sodass mit dem daraus resultierenden A-Scan die weitere Auswertung durchgeführt wird. Durch Anwendung einer Fourier-Transformation wird der A-Scan in den Frequenzbereich transformiert und durch Begrenzung des Frequenzbereichs auf den nutzbaren Anteil reduziert. Ein A-Scan für die weiteren Auswerteschritte wird daraus mit der Inversen Fourier-Transformation bestimmt. Wie bereits in den Laboruntersuchungen angewendet, kann für eine bessere Vergleichbarkeit verschiedener Kabeladerprüflinge, vor allem mit verschiedenen Abmessungen und Krümmungen, ein A-Scan auf eine ebene Fläche transformiert werden. Dabei werden bei der Online-Auswertung die aus den Laboruntersuchungen bestimmten Korrekturkurven im Zeit- und Frequenzbereich verwendet. Die letzte Signalaufbereitung findet durch das Schneiden des A-Scans statt. Dazu wird nur im Bereich der relevanten Oberflächenübergänge das Signal verwendet, um den Anteil von irrelevanten Störsignalen, wie z.B. Fremdstoffeinschlüssen oder Messrauschen, zu reduzieren.

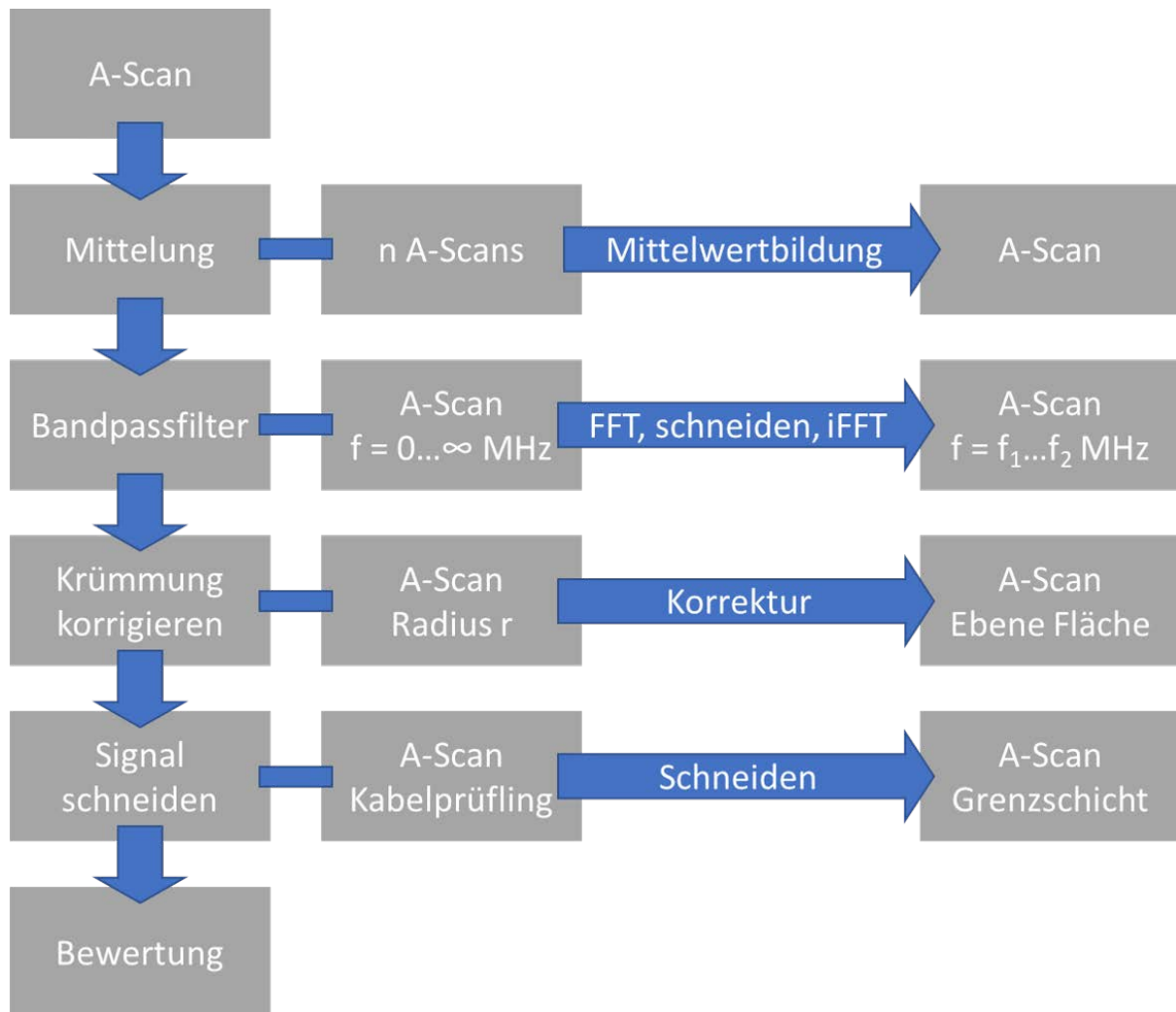


Abbildung 6.3 Signalverarbeitung des Messsignals bei der Online-Auswertung

6.2.1 Einflussbewertung der Signalverarbeitung

Im Folgenden werden die möglichen Optimierungen an einem Beispielkabeladerprüfling gezeigt. Bei dem Kabeladerprüfling 1 handelt es sich um ein 2 m Kupferkabel der Spannungsebene 245 kV mit einem mehrdrähtigen Leiter (RM). Abschließend wird ein Auswerteverfahren für den Ergebnisteil ausgewählt. Für die Bewertung des Vernetzungsgrades werden folgende drei Werte berechnet und grafisch dargestellt:

- Schallgeschwindigkeit
- Mittenfrequenz
- Dämpfung

Die berechneten Werte von Schallgeschwindigkeit, Mittenfrequenz und Dämpfung für die A-Scans entlang dem Kabeladerprüfling 1 sind in Abbildung 6.4 grafisch dargestellt. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

- Schallgeschwindigkeit $c = 1935 \dots 1990 \text{ m/s}$,
- Mittenfrequenz $f_{m, \text{mean}} = 1,35 \text{ MHz}$
- Dämpfung $\alpha_{\text{mean}} = 0,33$

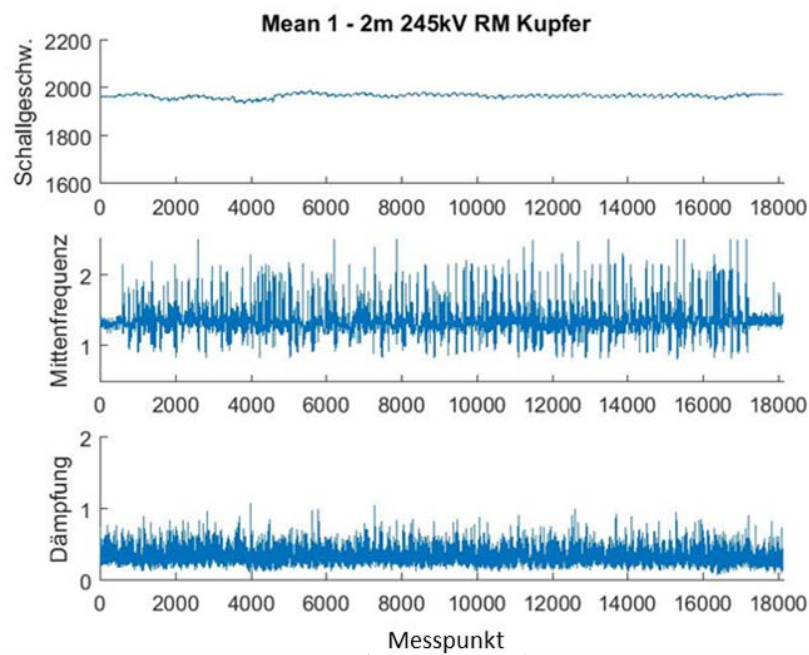


Abbildung 6.4 Auswertung Kabeladerprüfling 1 ohne Optimierung

Wird der Bandpassfilter mit $f_1 = 0,3$ MHz und $f_2 = 7$ MHz auf den A-Scan angewendet, ergibt sich für den Kabeladerprüfling 1 die in Abbildung 6.5 gezeigte Änderung der berechneten Werte. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

- Schallgeschwindigkeit $c = 1978 \dots 2016$ m/s
- Mittenfrequenz $f_{m,mean} = 1,35$ MHz (unverändert)
- Dämpfung $\alpha_{mean} = 0,33$ (unverändert)

Somit hat der Bandpassfilter lediglich einen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit.

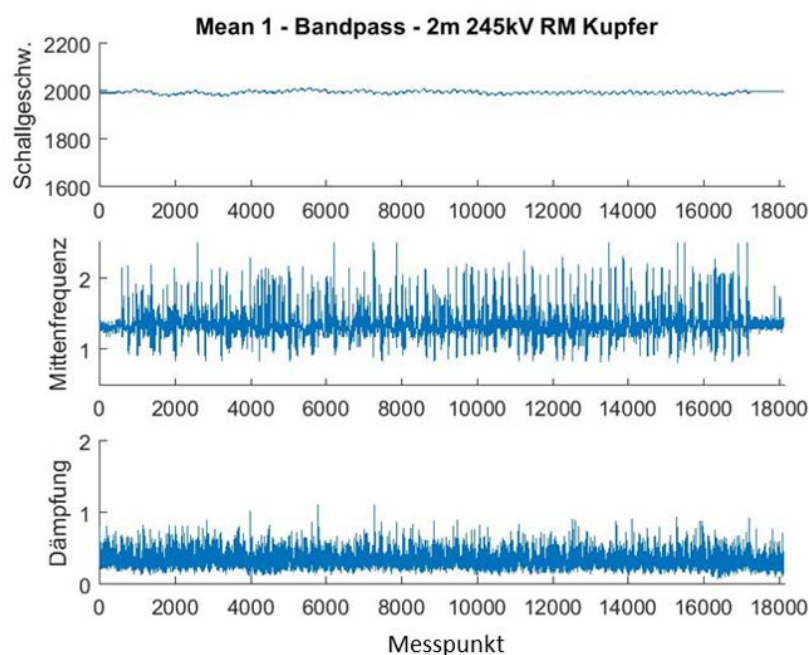


Abbildung 6.5 Auswertung Kabeladerprüfling 1 mit Bandpassfilter

In Abbildung 6.6 ist die Auswertung, mit den angewandten Optimierungsmethoden Bandpassfilter und Schneiden, dargestellt. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

- Schallgeschwindigkeit $c = 1978 \dots 2016$ m/s (unverändert)
- Mittenfrequenz $f_{m,mean} = 1,34$ MHz
- Dämpfung $\alpha_{mean} = 0,47$

Das Schneiden hat somit einen Einfluss auf Mittenfrequenz und Dämpfung, die Schallgeschwindigkeit bleibt unverändert (vgl. Abbildung 6.5).

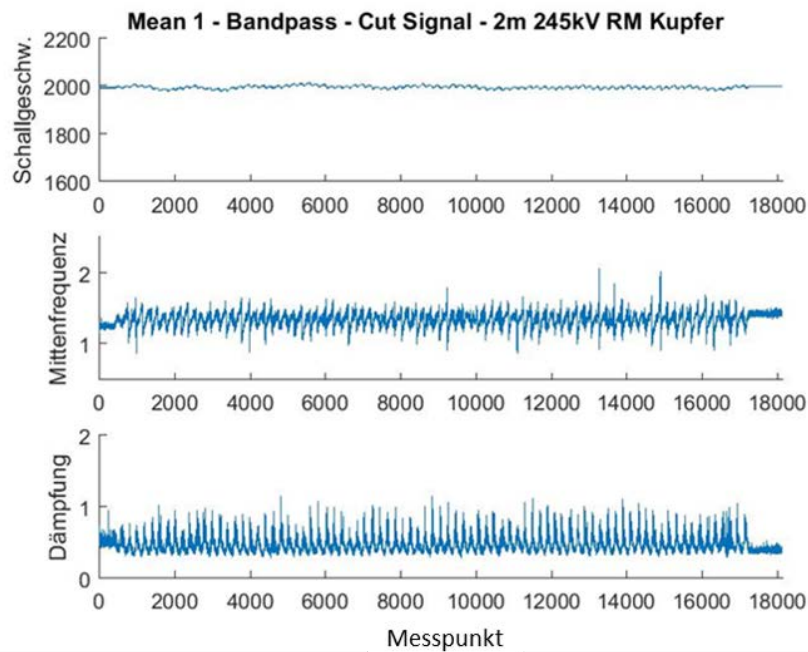


Abbildung 6.6 Auswertung Kabeladerprüfling 1 mit Bandpassfilter und Schneiden

Als nächstes wird zusätzlich zum Bandpass und dem Schneiden die Korrektur auf die ebene Fläche durchgeführt. Die berechneten Werte sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

- Schallgeschwindigkeit $c = 1978 \dots 2016$ m/s (unverändert)
- Mittenfrequenz $f_{m,mean} = 1,40$ MHz
- Dämpfung $\alpha_{mean} = 0,45$

Die Korrektur hat somit einen Einfluss auf die Mittenfrequenz und einen kleinen Einfluss auf die Dämpfung, die Schallgeschwindigkeit bleibt unverändert (vgl. Abbildung 6.6).

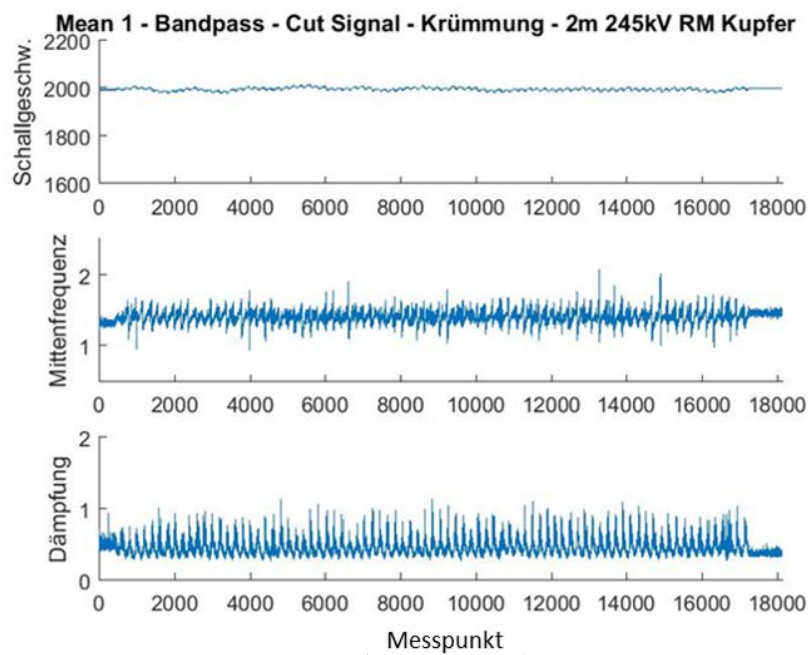


Abbildung 6.7 Auswertung Kabeladerprüfling 1 mit Bandpassfilter, Schneiden und Korrektur der Krümmung

Die Auswertung unter zusätzlicher Verwendung der Mittelung ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

- Schallgeschwindigkeit $c = 1948 \dots 1982$ m/s
- Mittenfrequenz $f_{m, \text{mean}} = 1,40$ MHz
- Dämpfung $\alpha_{\text{mean}} = 0,41$

Die Mittelung hat somit einen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit, die Mittenfrequenz wird nicht beeinflusst und auch die Dämpfung ist vergleichbar mit der Auswertung ohne Mittelung (vgl. Abbildung 6.7).

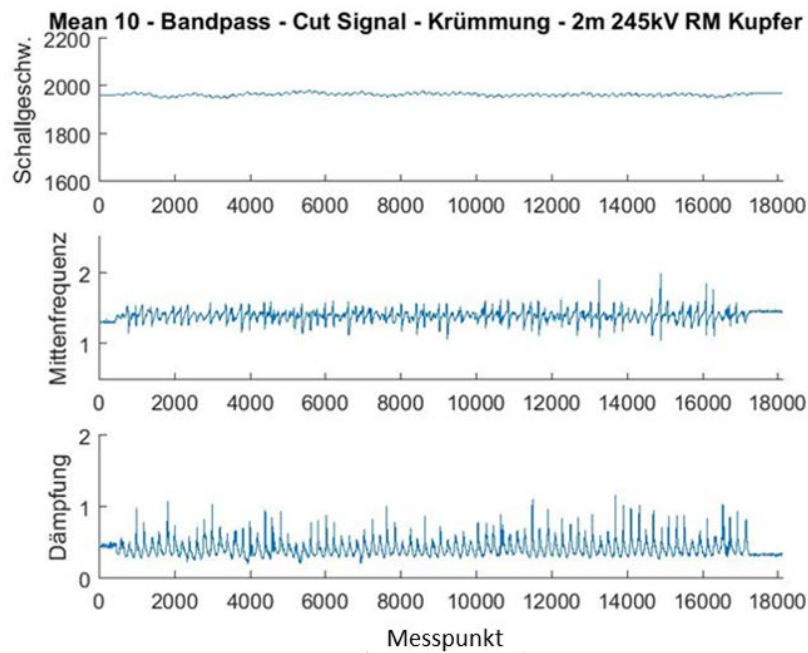


Abbildung 6.8 Auswertung Kabeladerprüfling 1 mit Bandpassfilter, Schneiden, Korrektur der Krümmung und Mittelung

6.2.2 Zwischenfazit Onlinemonitoring

Die vorhergehenden Optimierungsmöglichkeiten wurden beispielhaft an einem Kabeladerprüfling vorgestellt. Im Ergebnisteil von AP 5 wird eine Auswertung für alle untersuchten Kabeladerprüflinge durchgeführt und dargestellt. Die dabei verwendeten Optimierungen sind wie folgt festgelegt. Der Bandpassfilter wird verwendet, da Messrauschen und Störeinflüsse damit reduziert werden können und die Nutzfrequenzen werden herausgefiltert. Das Schneiden des Signals reduziert weiterhin die irrelevanten Signale abseits der betrachteten Grenzflächen und wird daher auch angewandt. Die verwendeten Optimierungen vermindern somit Rausch- und Störeinflüsse. Außerdem dient die Korrektur auf die ebene Fläche der Vergleichbarkeit von Messdaten zwischen verschiedenen Kabeladerprüflingen.

Die Mittelung von mehreren A-Scans wird nicht weiter betrachtet und für die Auswertung nicht verwendet, es besteht lediglich ein erhöhter Zeitbedarf bei der Erfassung der A-Scans und Bestimmung der Mittelung. Die Betrachtung von einzelnen A-Scans ist für die Auswertung ausreichend.

7 AP 4: Untersuchung der Vernetzung in Kabelader-Prüflingen

Die Kernpunkte der grundlegenden Untersuchungen aus AP 1 und AP 2 sind folgend noch einmal zusammengefasst und um Expertenwissen der am projektbegleitenden Ausschuss beteiligten Herstellern erweitert:

1. Die akustischen Materialeigenschaften von XLPE sind vom Vernetzungsgrad und der Materialtemperatur abhängig, wobei Schallgeschwindigkeit und Schalldämpfung die höchste Abhängigkeit vom Vernetzungsgrad aufweisen.
2. Die Messwerte der Ultraschallmessungen, insbesondere der Laufzeitmessungen, werden als normalverteilt angenommen. Diese Annahme kann durch einen erfolgreichen Kolmogorow-Smirnow-Test bestätigt werden.
3. Die Schichtdicken des Isoliersystems sind in ihrem Mittelwert und ihrer Streuung hinreichend genau bekannt. Diese Information kann beispielsweise aus Röntgenmessungen oder Erfahrungswerten der Linienführer stammen.
4. Zu Beginn der Produktion wird ein Hot-Set-Test durchgeführt, der die ausreichende Vernetzung des Isoliersystems bestätigt. Dieser Wert kann als Kalibrierungsgröße für ein Monitoring-Verfahren verwendet werden.
5. Aufgrund der langen thermischen Zeitkonstanten der Produktionslinie wird kein sprunghafter Anstieg der Temperatur oder des Vernetzungsgrades auftreten.
6. Zumindest eine Ultraschallmessung erfolgt in einem Wasserbad am Ende der Produktionslinie vor dem Aufwickler, da dort die Temperaturverteilung homogener als am Austritt aus dem Vernetzungsrohr ist.

Auf der Grundlage dieser Annahmen wird ein univariates, qualitatives Monitoringverfahren entwickelt und anschließend validiert. Da im Rahmen des Projektes keine Möglichkeit besteht, das Messverfahren in einer realen Produktionslinie zu validieren, werden in beiden Forschungsstellen Laborprüfstände eingerichtet, um die Bedingungen in der Produktionslinie zu simulieren. Dabei werden zwei unterschiedliche Konzepte verfolgt. Zu diesem Zweck wird für die Untersuchungen an der Forschungsstelle 2 ein sogenanntes Modellkabel verwendet, das den gleichen Aufbau wie ein Mittel- oder Hochspannungskabel hat, jedoch mit skalierten Abmessungen. Darüber hinaus werden dieselben Rohstoffe für die Produktion verwendet. Die Messung erfolgt hier im Tauchtechnikverfahren und wird im nächsten Abschnitt genauer beschrieben. Die Messungen an der Forschungsstelle 1 erfolgen an kürzeren Kabelstücken realer Hochspannungskabeladern der 245 kV-Ebene im Freistrahilverfahren. Durch die Freistrahlanordnung ergibt sich eine erhöhte Adaptivität an die Produktionslinie, sodass der Einbau erleichtert, und sogar eine mobile Lösung für Stichprobenmessungen ermöglicht wird. Die Ergebnisse werden im Anschluss ebenfalls präsentiert.

7.1 Untersuchungen an einer Modellkabelader

Das Modellkabel wird in den Laboren von einem der am Projekt beteiligten Kabelhersteller in einem zweistufigen Verfahren hergestellt. Im ersten Schritt wird das dreischichtige Isoliersystem auf einen Kupferleiter mit einem Querschnitt von $1,5 \text{ mm}^2$ extrudiert. Die Schichtdicken betragen ca. $150 \text{ }\mu\text{m}$ für die äußere leitfähige Schicht, $1500 \text{ }\mu\text{m}$ für die Isolierung und $700 \text{ }\mu\text{m}$ für die innere leitfähige Schicht. In einem zweiten Schritt wird das unvernetzte Modellkabel mittels Dampfdruckvernetzung vernetzt. Zu Prozessbeginn ist die Vernetzungsanlage nicht aktiv, so dass im Anfangsbereich der Kabellänge die Vernetzung nicht gestartet wird. Im Verlauf des Prozesses wird der Dampfdruck im Vernetzungsrohr von 0 auf 15 bar erhöht, wodurch die Temperatur von Raumtemperatur bis ca. $200 \text{ }^\circ\text{C}$ variiert wird. Dadurch erhöht sich der Vernetzungsgrad bis zur vollständigen Vernetzung am Ende

der Kabellänge. Der erwartete Grad der Vernetzung des Modellkabels wird mit der Hilfe eines numerischen Simulationsmodells berechnet (Abbildung 7.1).

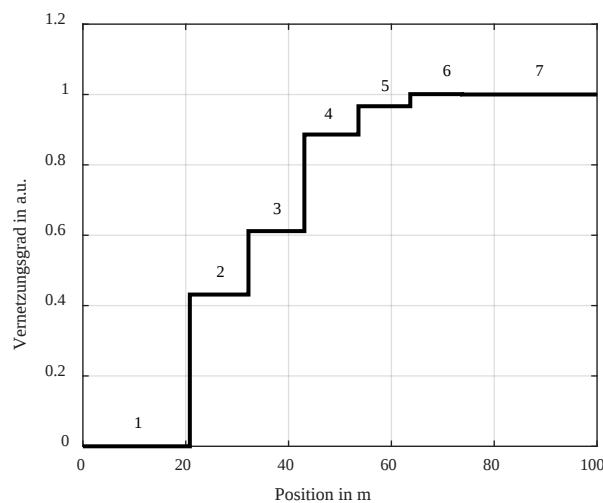


Abbildung 7.1: Positionsabhängiger Vernetzungsgrad der Modellkabelader

Bedingt durch das Produktionsverfahren weist das Kabel eine hohe Exzentrizität in den Bereichen auf, in denen die Vernetzung langsam beginnt und gleichzeitig das Isolationssystem noch nicht formstabil ist. Für die Laborversuche werden sieben Einzelsegmente, in denen die Exzentrizität weniger ausgeprägt ist, aus der gesamten Kabellänge herausgenommen und zu einem neuen Prüfkörper verbunden. Die Simulation zeigt, dass der Vernetzungsgrad des Modellkabels mit zunehmender Kabellänge und Segmentnummer zunimmt. Ein Vergleich der Hot-Set-Tests von den Materialuntersuchungen mit Simulationsergebnissen zeigt eine ausreichende Vernetzung für das verwendete Material, sobald ca. 90% des Peroxids umgewandelt wurden. Dementsprechend hat das Modellkabel eine unzureichende Vernetzung für die Segmente 1 bis 4 und eine ausreichende Vernetzung in den Segmenten 5 bis 7. Eine messtechnische Überprüfung des Vernetzungsgrades mittels Hot-Set-Test kann am Modellkabel nicht durchgeführt werden, da aus dem Modellkabel aufgrund seiner geringen Abmessungen kein normkonformes Sample entnommen werden kann. Die Erfahrungen der Kabelhersteller bestätigen jedoch die Resultate der Simulationen.

7.1.1 Prüfstandsaufbau

Der für die Validierung verwendete Testaufbau soll die industriellen Produktionsbedingungen so weit wie möglich simulieren (Abbildung 7.2). In einem Prüfbecken wird Wasser zirkuliert, das dem Kühlwasser der Vernetzungslinie entspricht. Der Modellkabeladerprüfling befindet sich zunächst vollständig auf einer Kabelspule A. Während der Messung wird das Modellkabel auf eine zweite Spule B gewickelt, um die Bewegung der Kabelader während der Produktion nachzubilden. Dabei wird das Kabel durch mehrere Rollen geführt und somit in der Mitte des Beckens zentriert. An der Zentrierstelle ist ein 5 MHz Ultraschallprüfkopf zur kontinuierlichen Überwachung des Prozesses installiert. Die Validierungsuntersuchungen werden bei Raumtemperatur und homogenem Temperaturprofil durchgeführt. Dies ist eine vereinfachende Annahme der tatsächlichen Produktionsbedingungen. Jedoch ist aufgrund der Erkenntnisse der Materialuntersuchungen davon auszugehen, dass die Messergebnisse und Klassifizierung bei einer höheren Linien-Austrittstemperatur von 40-55°C verbessert werden. Bei entsprechender Wahl der Messposition in der Produktionslinie kurz vor dem Aufwickeln der Kabelader kann jedoch von nahezu homogenen Temperaturverhältnissen

ausgegangen werden. Außerdem ändert sich das Temperaturprofil während einer fehlerfreien Produktion im Normalfall nicht. Als weiterer Parameter wird die Messgeschwindigkeit an die Produktionsbedingungen angepasst. Die 100 m lange Modellkabelprobe wird hierzu innerhalb einer Stunde umgespult und vermessen. Mit einer Geschwindigkeit von ca. 1,7 m/min liegt dies im Bereich der Produktionsgeschwindigkeit typischer Hochspannungskabellinien.

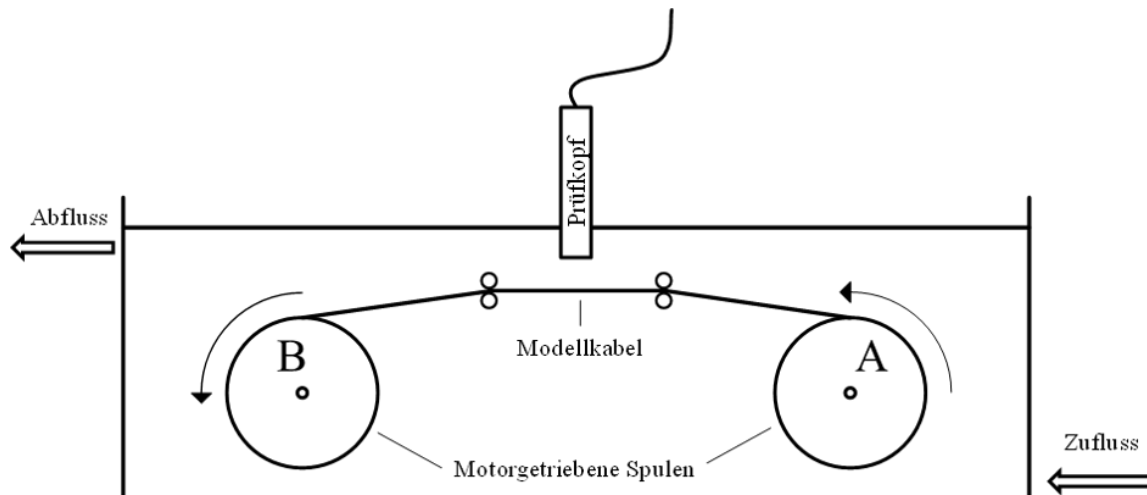


Abbildung 7.2: Skizze des Modellkabelprüfstands

7.1.2 Messergebnisse

Durch die Bewegung des Modellkabels in vertikaler und lateraler Richtung während der Messung, sowie der unterschiedlichen Exzentrizität des Prüflings können Messfehler bei der Ultraschallmessung nicht ausgeschlossen werden. Um die akustischen Materialparameter zu bestimmen, müssen die Rohdaten daher gefiltert und entsprechend vorverarbeitet werden. In einem zweiten Schritt werden die relevanten Parameter der verschiedenen Reflexionen im Modellkabelkern automatisch aus dem Gesamtsignal extrahiert (Abbildung 7.3 links). Dabei werden die Reflexionen an Kabeloberfläche, innerer Leitschicht und Leiter automatisch getrennt und deren Laufzeit und Amplitude ausgewertet. Eine Betrachtung der Reflexion zwischen äußerer Leitschicht und dem Isoliersystem ist aufgrund der sehr geringen Schichtdicke nicht zuverlässig möglich. In realen Kabeln sind die Schichtdicken jedoch im Regelfall größer und somit auflösbar. Abschließend werden die akustischen Messwerte mit den externen Messwerten wie der Schichtdicke verknüpft, um beispielsweise die Schallgeschwindigkeit zu berechnen.

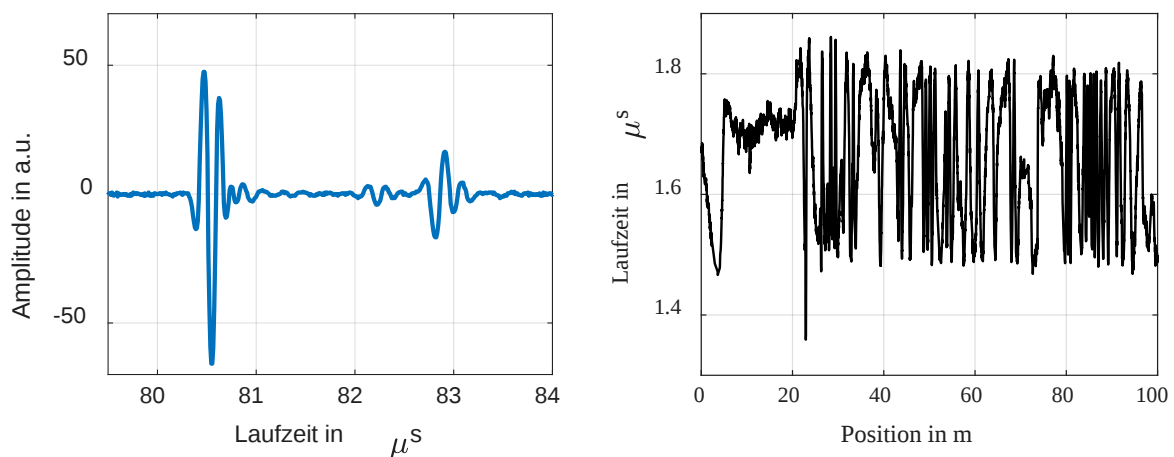


Abbildung 7.3: Ultraschallsignal der Reflexion am Modellkabel (links) und ermittelte Laufzeit in der Isolierschicht (rechts)

Zunächst wird exemplarisch die Laufzeit der XLPE-Isolationsschicht entlang der Kabellänge untersucht (Abbildung 7.3 links). Eine Abhängigkeit der Laufzeit mit zunehmender Messposition und damit vom Vernetzungsgrad ist nicht ersichtlich. Die Laufzeit erstreckt sich über den Bereich von ca. 1,5 bis 1,8 μs und ist in den einzelnen Segmenten meist periodisch. Diese Streuung ist auf die Exzentrizität des Kabels und die damit verbundene schwankende Schichtdicke zurückzuführen. Die Variation kann durch die Eigenschaften eines Extrusionsprozesses erklärt werden. Während der Extrusion des Polymers auf den metallischen Leiter wird der Volumenstrom des Extrudats in Abhängigkeit der Liniengeschwindigkeit gesteuert. Die Welligkeit wird somit durch die Parametrierung und Ungenauigkeit der Steuerung der Extrudereinheit bestimmt.

Die Periodizität der Laufzeit ist somit auf den Bereich zwischen dem minimalen Wert für die kleinste Schichtdicke und ihrem maximalen Wert für die höchste Schichtdicke begrenzt. Um die Schichtdickenvariation zu erfassen, werden mehrere Schnittpräparate des Isolationsystems an Resten des Modellkabels vorgenommen und unter einem Lichtmikroskop vermessen. Die Messung ergibt unterschiedliche Mittelwerte und Standardabweichungen der Schichtdicke für die Kabelsegmente 1-7. Während die Bestimmung der Schichtdicke in den Segmenten 1 und 7 eine Standardabweichung von ca. 95 μm liefert, kann in den Bereichen 3 und 4 eine Standardabweichung von ca. 130 μm beobachtet werden. Zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit wird der Wertebereich der Laufzeiten auf den Wertebereich der Schichtdicke abgebildet, so dass die minimale Laufzeit mit der minimalen Schichtdicke verknüpft wird. Die Auswertung der Mittelwerte je Segment zeigt, dass die Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Kabellänge und damit zunehmendem Vernetzungsgrad abnimmt (Abbildung 7.4 links). Der absolute Wert der Schallgeschwindigkeit liegt im erwarteten Bereich von 2000 m/s. In Bereichen hoher Exzentrizität des Modellkabels kann trotz der zuvor beschriebenen Verknüpfung eine hohe Streuung der Schallgeschwindigkeit detektiert werden (Segment 3 und 4). Um die Aussagekraft der gemessenen Schallgeschwindigkeit in einem Segment zu bewerten, muss neben den Mittelwerten die Standardabweichung der Messwerte während der Prozessüberwachung mit aufgezeichnet werden.

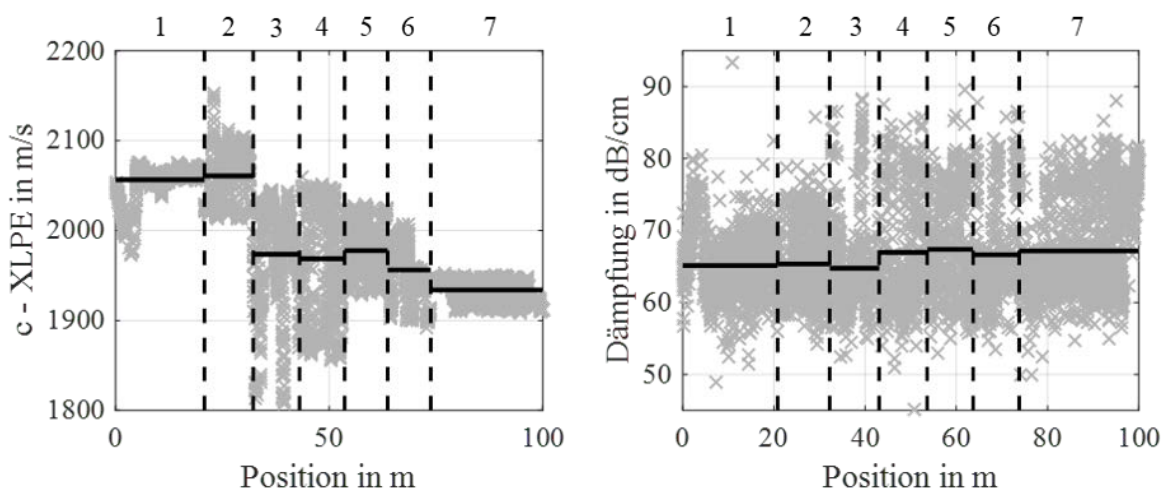


Abbildung 7.4: Schallgeschwindigkeit und Schalldämpfung in Abhängigkeit der Kabellänge

Als zweiter akustischer Parameter wird die akustische Schalldämpfung in der Isolationsschicht des Modellkabels berechnet. Für jede Position wird für die Schichtdicke der bei der Schallgeschwindigkeitsberechnung ermittelte Wert gewählt. Die Gleichung zur Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten des Isoliermaterials hängt sowohl von der Geometrie des Kabels als auch von dem Reflexionskoeffizienten an den verschiedenen Grenzflächen ab. Es ist zwar möglich, die Geometrieabhängigkeit der Reflexions-

koeffizienten sowohl simulativ als auch messtechnisch zu bestimmen. Dies ist jedoch aufgrund der großen Anzahl unterschiedlicher Kabelkonstruktionen nicht praktikabel und für ein qualitatives Monitoring nicht notwendig, da während eines einzigen Produktionslaufs weder Materialwechsel noch eine Änderung der Kabelgeometrie erfolgen. Daher wird der vereinfachte Dämpfungskoeffizient α^* verwendet.

$$\alpha^*(f) = \frac{1}{-2d} \cdot \log\left(\frac{P_{LS}(f)}{P_{EP}(f)}\right) \quad (F 1)$$

Der Dämpfungskoeffizient wird somit maßgeblich durch das Amplitudenverhältnis der Reflexion an der Kabeloberfläche P_{EP} und der Reflexion an der inneren Leitschicht P_{LS} bestimmt. Im Gegensatz zur Schallgeschwindigkeit zeigt der Dämpfungskoeffizient eine wesentlich höhere Streuung (Abbildung 7.4 rechts). Dies ist hauptsächlich auf den Messaufbau zurückzuführen, da der Prüfkopf der Bewegung des Kabels nicht folgt. Eine Nachführung wie in AP 5 entwickelt ist aufgrund der geringen Abmessungen des Modellkabels nicht möglich. Während der Messung ist der Einfluss einer seitlichen Bewegung des Kabels auf die Amplitude deutlich höher als auf die Laufzeit. Insgesamt wird die Tendenz einer Erhöhung der Schalldämpfung mit steigendem Vernetzungsgrad, die auch bei den Materialuntersuchungen beobachtet wurde, bestätigt. Aufgrund der hohen Streuung der Messdaten erscheint die Schalldämpfung als Parameter für ein Monitoringverfahren jedoch zunächst ungeeignet.

7.1.3 Verfahrensbeschreibung

Basierend auf den bisher präsentierten Ergebnissen besitzt die kontinuierliche Aufzeichnung der Schallgeschwindigkeit und deren statistische Auswertung das größte Potenzial für eine qualitative Überwachung der Vernetzungslinie. Das hieraus entwickelte Verfahren ist in drei Hauptphasen unterteilt. In der ersten Phase wird das Messsystem zu Beginn der Produktion auf die Kabelgeometrie und den Hot-Set-Test-Wert kalibriert. Die Detektion der relevanten Reflexionen und die Berechnung des positionsabhängigen Laufzeitvektors laufen automatisiert ab. Die Dauer der Kalibrierungsphase kann dabei entweder automatisch oder durch Angabe einer maximalen Kalibrierlänge festgelegt werden. Sobald das Abbruchkriterium der Kalibrierungsphase erreicht wird (z.B. 10 m Produktionslänge oder 10.000 Messsignale), wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Schallgeschwindigkeit ermittelt. Sowohl die Fensterbreite der Kalibrierung, d.h. die Anzahl der erfassten Messwerte, als auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung werden als Referenz gespeichert.

Nach der Kalibrierungsphase folgt in der Messphase eine kontinuierliche Überwachung der Schallgeschwindigkeit. Der neueste gemessene Wert wird in einen FIFO-Speicher geschrieben (first in - first out) und der älteste Messwert wird verworfen. Die Größe des FIFO-Speichers wird durch die Fensterbreite der Kalibrierungsphase bestimmt. Abhängig von einer einstellbaren Aktualisierungsrate wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte im FIFO-Speicher ausgewertet und in einem neuen Vektor gespeichert. Durch diese Konstruktion läuft das Auswertungsfenster während der Produktion über die Messdaten ähnlich einem gleitenden Mittelwertfilter.

Im dritten Schritt wird das Ergebnis der Messung für den Linienführer visualisiert. Neben einer Darstellung der Wahrscheinlichkeitsverteilung des aktuellen Auswertefensters werden die vergangenen Messwerte in der Darstellung einer Qualitätsregelkarte aufgetragen. Hierbei wird die Standardabweichungskarte verwendet, d.h. die Standardabweichung der Messwerte während der Kalibrierungsphase wird zur Bewertung genutzt. Mit Hilfe der Standardabweichung können Warn- und Eingriffsgrenzen definiert werden, die eine einfache Bewertung der Prozessqualität ermöglichen [Die14].

7.1.4 Validierung des Messverfahrens

Die Validierung des Monitoringverfahrens basiert ebenfalls auf der Messung an der Modellkabelader. Die Kalibrierungsphase wird in Segment 7 gestartet, da das Kabel in diesem Segment vollständig vernetzt ist und den erwarteten Produktionsbedingungen entspricht. Sobald die Standardabweichung der Schallgeschwindigkeit im Auswertefenster weniger als 20 m/s beträgt, gilt die Kalibrierung als abgeschlossen. Die Schallgeschwindigkeit des Modellkabels beträgt im Kalibrierbereich, d.h. unter optimalen Produktionsbedingungen, im Mittel 1932 m/s bei einer Standardabweichung von 16 m/s. Basierend auf der Kalibrierung werden die Warngrenzen auf das Doppelte der Standardabweichung (2σ) und die Eingriffsgrenzen auf das Dreifache der Standardabweichung (3σ) eingestellt und grafisch dargestellt.

Der zeitliche Verlauf des Mittelwerts der Schallgeschwindigkeit ist in der Standardabweichungsregelkarte dargestellt (Abbildung 7.5 links). Sobald die Vernetzung des Modellkabels abnimmt, steigt die mittlere Schallgeschwindigkeit stetig an. Durch die gleitende Mittelwertbildung kann die Streuung der Messdaten weitgehend eliminiert und eine zuverlässige Bewertung der Prozessqualität ermöglicht werden. Sobald die Schallgeschwindigkeit die obere Warngrenze erreicht, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Prozessqualität verschlechtert. Die Prozessparameter sollten demnach überprüft werden, insbesondere für den Fall, dass sich die Messwerte lange Zeit an der Warngrenze befinden. Wenn der Vernetzungsgrad kritische Werte erreicht, die zu einer Verringerung der Funktionalität des Isolationssystems führen, wird die obere Eingriffsgrenze überschritten und es sind sofortige Eingriffsmaßnahmen erforderlich. Beispielsweise könnten an ausgewählten Messpositionen weitere stichprobenartige Hot-Set-Tests durchgeführt werden und im Zweifelsfall einzelne Teile der Produktion entsorgt werden. Als weiterer Parameter wird die Standardabweichung der Schallgeschwindigkeit kontinuierlich erfasst und ausgewertet, da diese weitere Hinweise auf die Prozesskontinuität geben kann (Abbildung 7.5 rechts). Beim Modellkabel besteht in den Bereichen, in denen die Standardabweichung stark ansteigt, eine erhöhte Exzentrizität des Kabels. Darüber hinaus können starke lokale Schwankungen der Standardabweichung, die im Bereich von 60 oder 80 m zu erkennen sind, auf Messfehler hinweisen. Bei der Messung am Modellkabeladerprüfling sind dies die harten Schnittstellen zwischen den einzelnen Segmenten, die jedoch in einer realen und fehlerfrei produzierten Kabelader nicht vorkommen.

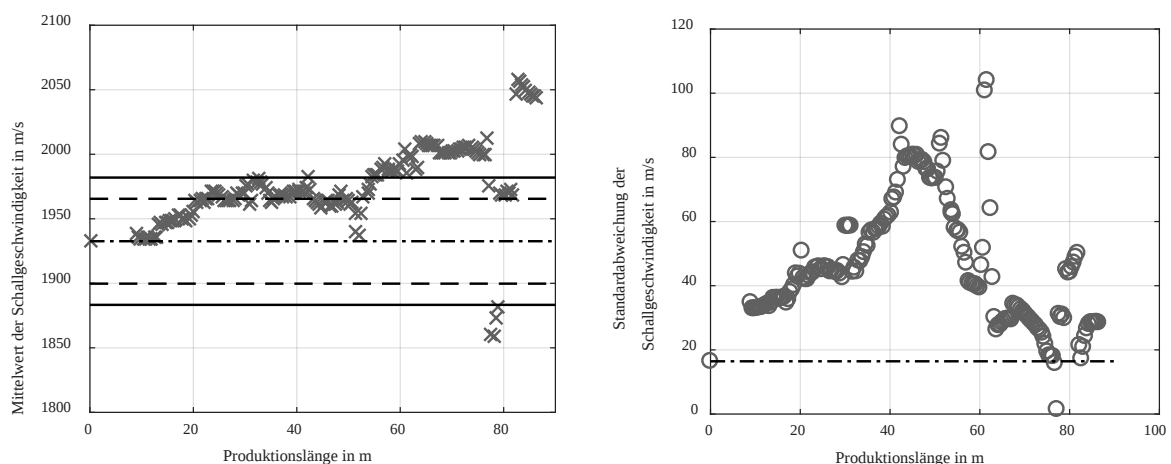


Abbildung 7.5: Mittelwert der Schallgeschwindigkeit als Ergebnis des Algorithmus zum Monitoring des Vernetzungsgrades mit oberen und unteren Warn- und Eingriffsgrenzen (links) und Standardabweichung (rechts)

7.1.5 Fazit

Das entwickelte Ultraschallmessverfahren eignet sich zur kontinuierlichen Überwachung des Vernetzungsprozesses in der Energiekabelproduktion. Erstens kann aufgrund der automatischen Kalibrierung die Geometrie des Kabels im Rahmen der Messung vernachlässigt werden. Weiterhin zeigen die Materialuntersuchungen an Probekörpern mit unterschiedlichen Materialstärken, dass in jedem Fall eine Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vom Vernetzungsgrad gemessen werden kann. Darüber hinaus hat sich das Verfahren sogar bei den extrem reduzierten Abmessungen eines Modellkabels als erfolgreich erwiesen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass das Verfahren für beliebige Energiekabelgeometrien geeignet ist.

Eine Vereinfachung der vorgestellten Untersuchungen ist die konstante und homogene Temperaturverteilung in der Kabelader. In der realen Produktion wird es am Ende der Produktionslinie auch ein schwach ausgeprägtes Temperaturprofil geben. Da die Temperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit hat, sollte sie während der Produktion ebenfalls aufgezeichnet werden. Zu diesem Zweck sollte die Oberflächentemperatur mittels zusätzlicher Temperatursensoren, z.B. basierend auf optischen Messmethoden, gemessen werden. So kann eine Änderung der Schallgeschwindigkeit möglicherweise einer Temperaturänderung zugeschrieben werden. Zusätzlich können existierende laufzeit- oder amplitudenbasierte Ultraschallmessverfahren verwendet werden, um die innere Grenzflächentemperatur an der inneren Leitschicht zu bestimmen und aufzuzeichnen [Bra13].

Für den Fall, dass keine zusätzliche Temperaturmessung möglich ist, kann durch Messung der Schallgeschwindigkeit dennoch eine qualitative Überwachung des gesamten Produktionsprozesses ermöglicht werden. Sowohl die Abhängigkeit der akustischen Materialparameter des XLPE vom Vernetzungsgrad als auch von der Temperatur sind mit Abschluss des Projektes genau bekannt. Sowohl eine Erhöhung des Vernetzungsgrades als auch eine Erhöhung der Temperatur führen zu einer Abnahme der Schallgeschwindigkeit. Produktionstechnisch sind der Vernetzungsgrad und die Materialtemperatur eng miteinander verknüpft. Eine höhere Materialtemperatur bedeutet in der Regel auch einen höheren Vernetzungsgrad, da die Reaktionsgeschwindigkeit der Vernetzungsreaktion temperaturabhängig ist. Wenn der Vernetzungsgrad während der Kalibrierungsphase bekannt ist, zeigt eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit einen höheren Vernetzungsgrad bzw. höhere Materialtemperatur an, wohingegen eine Erhöhung der Schallgeschwindigkeit eine Verschlechterung der Produktqualität impliziert.

Schließlich sollte berücksichtigt werden, dass die Ultraschallmesstechnik nicht als einziges Mittel zur Qualitätssicherung verwendet wird. Neben dimensionellen Messungen werden die Temperaturen und Heizleistungen der Vernetzungslinie überwacht und numerische Simulationsmethoden zur Abschätzung der Materialtemperatur verwendet. Nach dem derzeitigen Stand der Technik ist die Ultraschallmethode jedoch die einzige Methode, die eine direkte Messung der mechanischen Eigenschaften des Endprodukts ermöglicht. Daher sollte im Rahmen des Produktionsmonitorings immer eine gesamtheitliche Betrachtung des Vernetzungsprozesses erfolgen, wobei der Ultraschallmesstechnik aufgrund seiner Fähigkeit zur kontinuierlichen Überwachung eine besondere Bedeutung zukommt. Eine derartige, gesamtheitliche Betrachtung wäre beispielsweise durch die Implementierung eines Expertensystems mit den verschiedenen erfassbaren Messgrößen wie Temperatur und Wanddicken möglich.

8 AP 5: Mechanische Nachführung der Messapparatur

8.1 Düsenanordnung

Das direkt nach der Produktionslinie gefertigte Kabel soll mit Ultraschall untersucht werden, um eine Änderung des Vernetzungsgrades festzustellen. Die beste Möglichkeit dazu bietet ein Becken welches mit einem flüssigen Koppelmedium gefüllt ist, zum Beispiel ein Kühlwasserbecken. Da nicht überall ein geeignetes Becken zur Verfügung steht oder verwendet werden kann, soll eine Freistrahldüse entwickelt werden, die den Ultraschall über einen Wasserkreislauf an das Kabel koppelt.

8.1.1 Entwicklung Freistrahldüse

An die zu entwickelnde Freistrahldüse werden verschiedene Anforderungen gestellt. Der Ultraschallprüfkopf kann aufgrund der teilweise hohen Geschwindigkeit bei der Linearbewegung nicht in Kontakttechnik ausgeführt werden, zudem entstehen hierbei schädigende Kratzer und Schleifspuren auf der Kabelader, die diese unbrauchbar machen. Die Lösung bildet eine geführte Konstruktion, welche einen konstanten Abstand von der Kabeloberfläche sicherstellt. Für die Wasserführung wird zusätzlich eine Düse benötigt, mit der ein sicheres Einkoppeln der Ultraschallwellen in den Kabeladerprüfling sichergestellt wird. Die Düse benötigt zusätzlichen Bauraum, die den Abstand zwischen Ultraschallprüfkopf und Prüflingsoberfläche weiter erhöht. Der Mindestabstand des Ultraschallprüfkopfes wird außerdem durch die Mehrfachreflexion bestimmt, die zwischen Prüfkopf und Kabeloberfläche entsteht, sodass die Laufzeit zur Kabeloberfläche mindestens der Laufzeit zwischen Kabeloberfläche und Leiter entsprechen muss. Andernfalls wird das Mehrfachecho der Oberfläche als Leiter- oder Leitschichtecho fehlinterpretiert. Weitere Anforderungen an die Düsengeometrie sind eine homogene Wasserströmung, ein gerader, nicht diffuser Strahl an der Düsen Spitze und keine Bildung von Luftblasen.

Eine Draufsicht der für die Ultraschalluntersuchungen entwickelten Prüfkopfhalterung ist in Abbildung 8.1 dargestellt. Die Halterung verfügt über eine Öffnung für den Wassereinlauf (1) und eine Vertiefung für die Wasserverteilung (2) um die Öffnung für den Ultraschallprüfkopf (3). Die Prüfkopfhalterung muss mit einer geeigneten Düse erweitert werden, um einen forcierten Wasserstrahl auszubilden. Dafür verfügt die Prüfkopfhalterung über Schraubenlöcher (4) zur Befestigung der Düse.

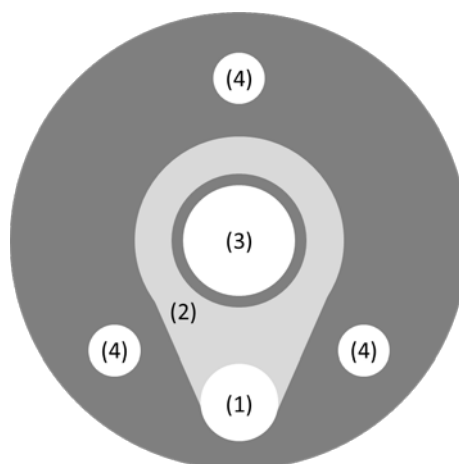


Abbildung 8.1 Draufsicht Prüfkopfhalterung

Düsengeometrien

Im Folgenden werden zunächst die fünf verschiedenen Düsengeometrien vorgestellt:

- Stab-Düse Lang
- Stab-Düse Kurz
- Kegeldüse Glatt
- Kegeldüse Rund
- Laminardüse

Anschließend werden die weiteren Faktoren und Parameter aufgezeigt, die für eine gute Ankopplung des Ultraschallsignals und damit für eine gute Signalqualität notwendig sind.

Die erste Düsengeometrie („Stab-Düse Lang“) mit Prüfkopfhalterung ist als Schnittbild in Abbildung 8.2 dargestellt. Das Wasser fließt durch die Öffnung (2) und umspült den Ultraschallprüfkopf (3). Ein Wasseraustritt zwischen Prüfkopfhalterung (1) und Düse (5) wird mit einer Gummidichtung (4) verhindert. Die Düsengeometrie ist so gewählt, dass das Wasser laminar von dem Ultraschallprüfkopf bis zum Düsenaustritt fließt und die Schallwellen damit auf die Kabeloberfläche koppelt. Bei dem Prüfkopf handelt es sich um den H5K der Firma GE mit 5 MHz Prüffrequenz und mit einem Fokuspunkt im Abstand von $d = 80$ mm. Der Fokuspunkt bildet den Punkt des höchsten Schalldrucks und der geringsten Breite des Schallfeldes, weshalb die Länge der Düse so gewählt ist, dass dieser am Wasseraustritt an der Düzenspitze liegt.

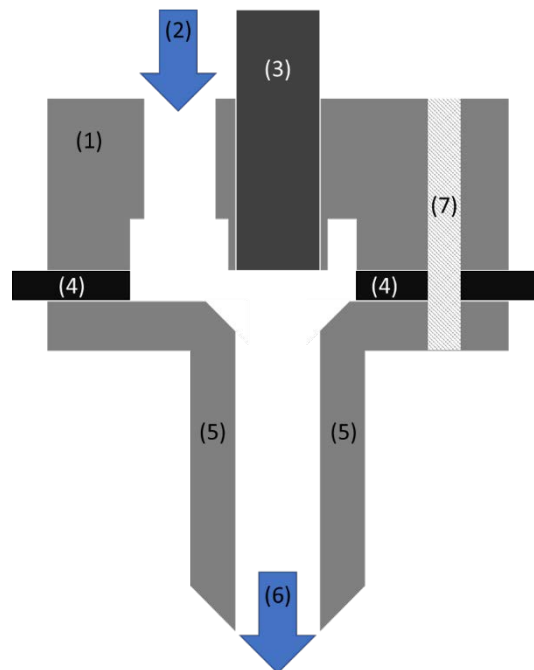


Abbildung 8.2 Prüfkopfhalterung und Stab-Düse Lang

Aufgrund der geringen Schallleistung des H5K wurde der Ultraschallprüfkopf für weitere Untersuchungen durch das Model Olympus V309 mit einer Prüffrequenz von 5 MHz und einem Fokuspunkt von $d = 50$ mm ersetzt. Abbildung 8.3 zeigt die modifizierte Düsengeometrie, die sich von der oberen Geometrie lediglich in der Düsen-Länge unterscheidet. Die Prüfkopfhalterung ist identisch.

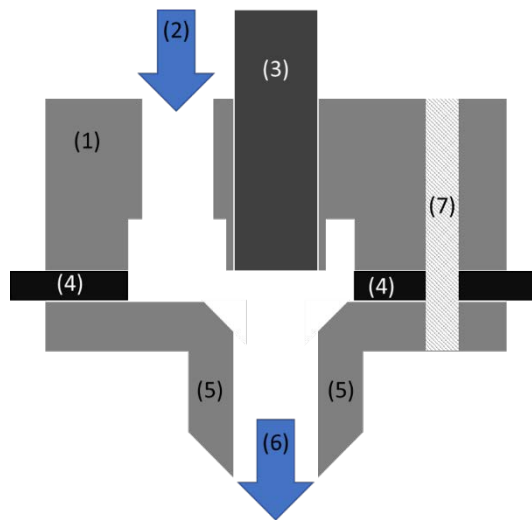


Abbildung 8.3 Prüfkopfhalterung und Stab-Düse Kurz

Die Schnittansicht der „Kugeldüse Glatt“ auf der Prüfkopfhalterung ist in Abbildung 8.4 dargestellt. Abweichend zu den vorhergehenden Düsen befindet sich zwischen Ultraschallprüfkopf und dem Düsenaustritt ein kegelförmiges Volumen, welches durch die Dichtung (4) und die Düse (5) begrenzt wird. Der Vorteil dieser Düsengeometrie besteht zum einen in der gleichmäßigeren Strömung, zum anderen in dem sich reduzierenden Querschnitt zum Düsenaustritt (6), sodass ein gleichmäßiger nicht diffuser Wasserstrahl entsteht. Die Düsenoberfläche wurde zur weiteren Verbesserung der Strömungseigenschaften chemisch behandelt und geglättet. Allerdings konnte nach der Oberflächenbehandlung keine Verbesserung des austretenden Wasserstrahls festgestellt werden, weshalb im Folgenden auf dieses Verfahren verzichtet wurde.

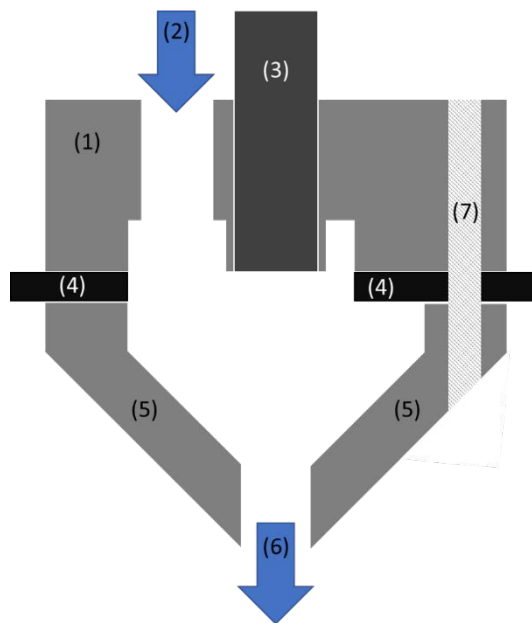


Abbildung 8.4 Prüfkopfhalterung und Kegeldüse Glatt

Die Düsengeometrie in Abbildung 8.5 unterscheidet sich nur unwesentlich von der kegelförmigen Düse aus Abbildung 8.4. Die Geometrie wurde angepasst, um die Strömung weiter zu beruhigen und die Verwirbelungen zu minimieren. Dazu ist das Volumen in der Düse nicht als Kegel ausgeführt, sondern die Oberfläche ist im Querschnitt abgerundet (5).

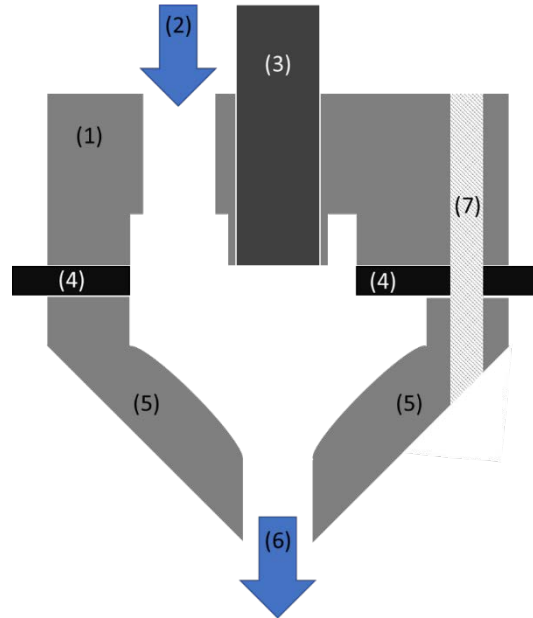


Abbildung 8.5 Prüfkopfhalterung und Kegeldüse Rund

Zur weiteren Optimierung wird ein weiterer Ansatz verfolgt. Das Schnittbild der Laminardüse ist in Abbildung 8.6 dargestellt. Die Düse (1) ist zylindrisch ausgeführt und weist eine zylindrische Aufnahme für den Ultraschallprüfkopf (3) auf. Das Wasser tritt über den Wasseranschluss (2) in das turbulente Sammelvolumen (4) in die Düse ein. Verwirbelungen und Turbulenzen müssen weitestgehend vermieden werden, weshalb sich unterhalb des Sammelvolumens kleine Rohre befinden, die das Wasser von einer turbulenten in eine laminare Strömung überführen. Im unteren Volumen strömt das Wasser wiederum um den Ultraschallprüfkopf, tritt durch die Öffnung (6) aus der Düse aus und koppelt damit den Ultraschall in das Kabelstück ein.

Diese Düsenanordnung lieferte zwar Ergebnisse mit guten und störungsarmen Ultraschallsignalen, zeigte jedoch in der Anwendung im Demonstrator entscheidende Nachteile. So ist die Inbetriebnahme der Laminardüse nur umständlich möglich, da die Luft in der Düse nur schwer und nicht selbstständig verdrängt wird. Die Folge sind häufige Luftblasen im Wasserstrahl, die das Messsignal stören, sodass diese Düsengeometrie nicht weiter verwendet wurde.

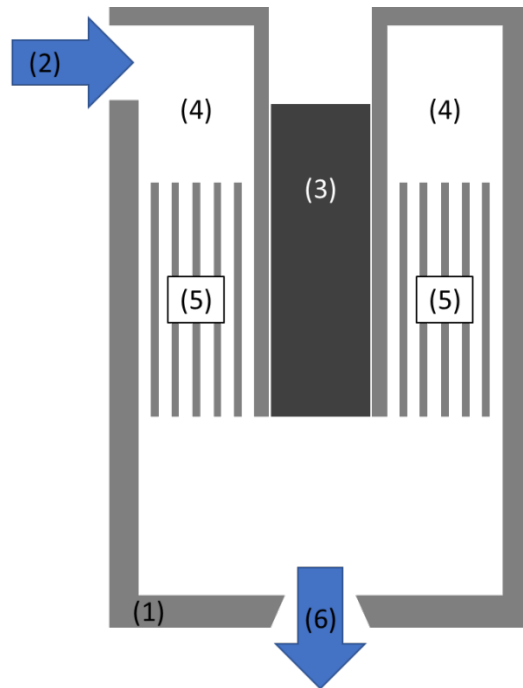


Abbildung 8.6 Laminardüse mit integrierter Prüfkopfhaltung

Parameter der Düse

Eine gute Ankopplung des Ultraschallsignals an die Kabeloberfläche ist neben der Düsengeometrie noch von weiteren Faktoren und Parametern abhängig.

Die festzulegenden Faktoren sind dabei der Querschnitt der Wasserzuleitung, des Wasseranschlusses und des Wasserauslasses. Der Durchmesser des Wasserauslasses wird durch die Breite des Schallfeldes vorgegeben und ist so gewählt, dass keine Reflektionen von der Düse im Ultraschallsignal sichtbar sind.

Einstellbare Parameter sind der Wasserdruck, der Winkel der Düsengeometrie und der Abstand zwischen Wasserauslass und Kabeloberfläche.

Der Wasserdruck bestimmt die Strömungsgeschwindigkeit in der Düse und damit auch im Wasserstrahl an der Düsen Spitze. Bei einem zu geringen Wasserdruck fließt das Wasser schneller aus der Düse als es durch den Wasseranschluss nachgeführt wird. Die Düse ist somit nicht mit Wasser gefüllt, die Luftblasen verhindern ein erfolgreiches Einkoppeln der Ultraschallwellen in das Kabel (vgl. Abbildung 8.7).

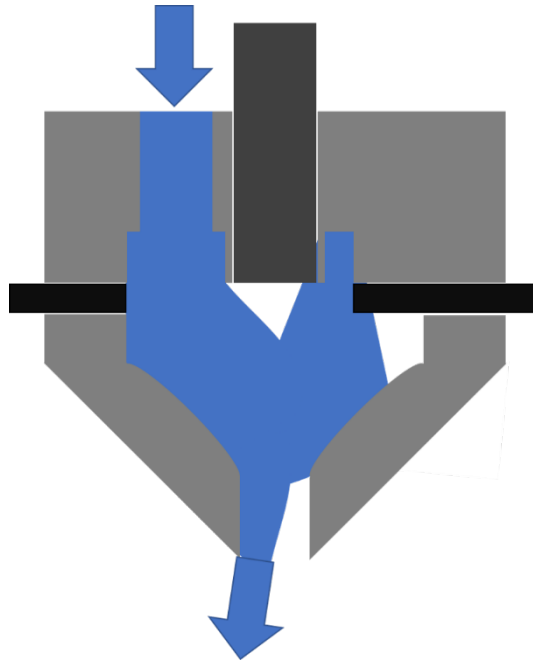


Abbildung 8.7 Düsenanordnung mit Wasserströmung bei zu wenig Druck

Luftblasen vor dem Ultraschallprüfkopf und in der Düse lassen sich durch einen höheren Wasserdruck verhindern. Die maximale Höhe des Wasserdrucks ist durch das Verhalten des Strahls am Wasserauslass begrenzt. Ein zu hoher Wasserdruck bewirkt einen diffusen Strahl, der keine Einkopplung des Ultraschalls in das Kabel ermöglicht (vgl. Abbildung 8.8).

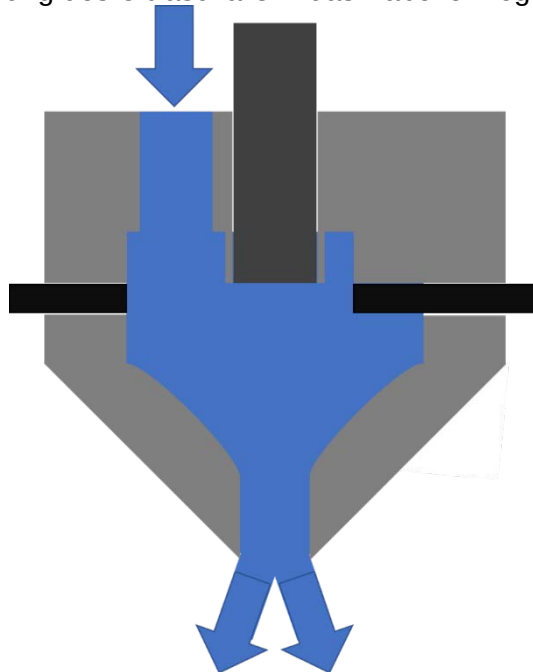


Abbildung 8.8 Düsenanordnung mit Wasserströmung bei zu hohem Druck

Der Wasserdruck muss dementsprechend gewählt werden, dass die beiden Randbedingungen erfüllt sind und ein zylindrischer homogener Wasserstrahl an der Düsen Spitze entsteht (vgl. Abbildung 8.9).

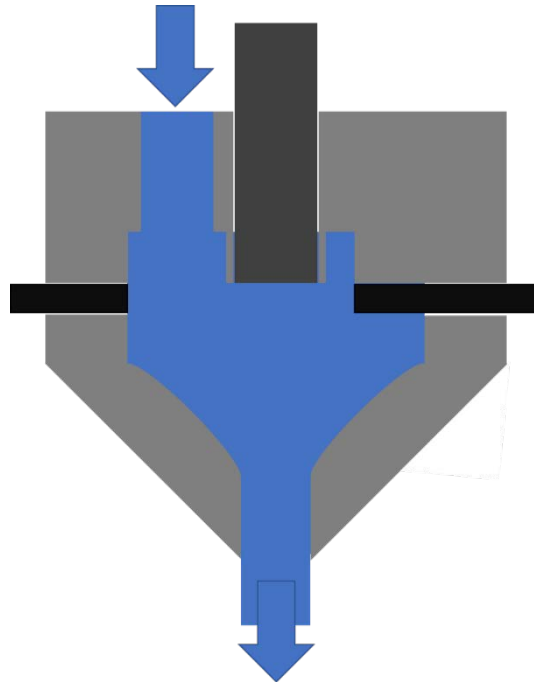


Abbildung 8.9 Düsenanordnung mit Wasserströmung bei korrektem Druck

Einen weiteren Einfluss auf den austretenden Wasserstrahl hat der Winkel der Düsengeometrie, da die Kraftverteilung unterschiedlich wirkt. Die Realisierung einer Nachführung zur optimalen Messausrichtung, die in 8.1.2 näher beschrieben wird, macht eine Anordnung zweier Prüfköpfe um das Kabel erforderlich. Zwei mögliche Winkel der Düsengeometrie sind 45° und 90° , die Anordnungen mit den resultierenden austretenden Wasserstrahlen sind in Abbildung 8.10 und Abbildung 8.11 schematisch dargestellt. Mit zunehmendem Winkel sinkt der nutzbare zylindrische Anteil des Wasserstrahls, mit dem das Ultraschallsignal an die Kabeloberfläche angekoppelt werden kann. Neben dem Winkel ist hierbei auch der Abstand der Düsen Spitze von der Kabeloberfläche entscheidend. Als guter Kompromiss haben sich ein Winkel von 45° und ein Abstand von 10 mm gezeigt. Eine Anordnung mit zwei Prüfköpfen mit einem Winkel von $\pm 90^\circ$ benötigt sehr viel Platz. Zudem ist es nicht möglich eine kontaktlose Kabelnachführung zu realisieren, siehe unten.

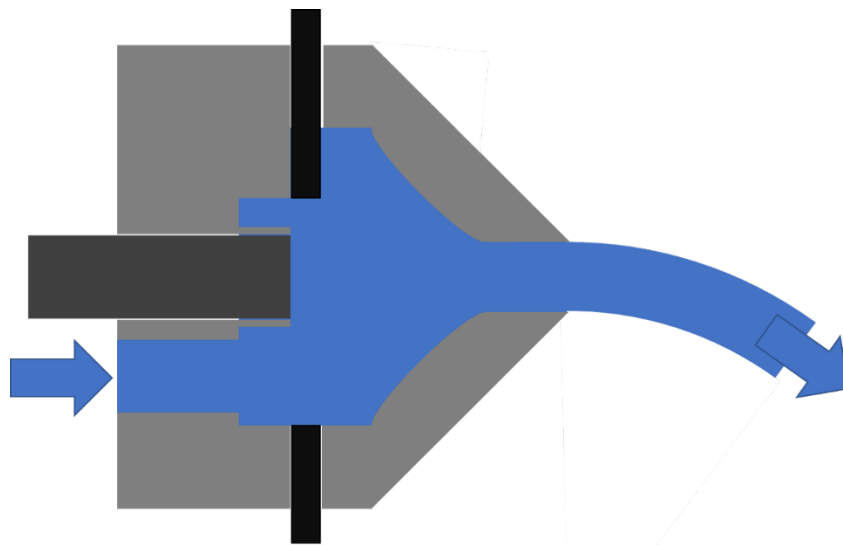


Abbildung 8.10 Düsenanordnung mit Wasserstrahl bei 90°

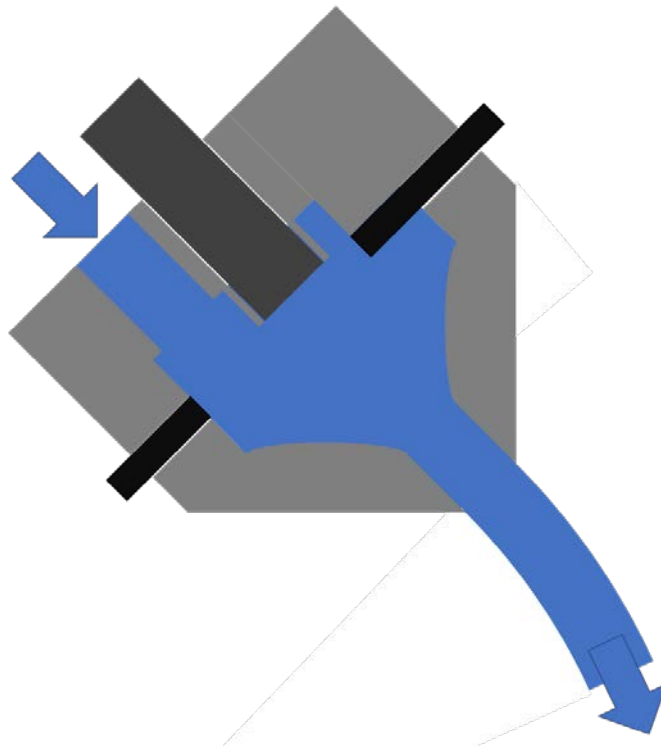


Abbildung 8.11 Düsenanordnung mit Wasserstrahl bei 45°

Gesamtdüsenanordnung

Die resultierende gesamte Messanordnung bestehend aus zwei Ultraschallprüfköpfen mit Düsengeometrie und Kabeladerprüfling ist in Abbildung 8.12 dargestellt. Das Kabel (1) liegt auf den Haltestangen (2) auf. Die Versuchsanordnung ist von einer Auffangwanne (3) umschlossen, um das abfließende Koppelmedium zu sammeln. Die Düsen (4) weisen einen Winkel von 45° zur Symmetrieachse auf, die Ultraschallköpfe sind auf Linien ausgerichtet, deren Schnittpunkt im Mittelpunkt des Kabels liegt.

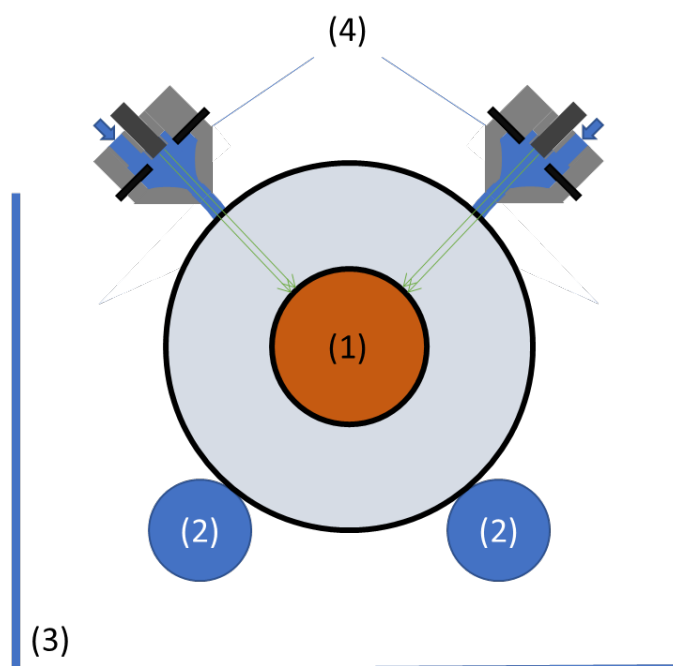


Abbildung 8.12 Prüfstandanordnung mit zwei Ultraschallprüfköpfen

8.1.2 Entwicklung mechanische und kontaktlose Nachführung

In einer realen Produktionslinie für Energiekabel sind die gefertigten Kabeladern zwar nahezu gerade, allerdings kann nicht von einem idealen Zylinder ausgegangen werden. Außerdem können seitliche Bewegungen an der Messstelle der Prüfanordnung entstehen. Ist die Schalleinkopplung nicht Lotrecht auf der Kabelader, reduziert sich der reflektierte Anteil der Grenzschichten, der vom Ultraschallprüfkopf empfangen wird, eine Auswertung der Pulse und Bestimmung von Schallgeschwindigkeit und -dämpfung wäre nicht möglich. Daher werden im Folgenden zwei Konzepte vorgestellt, mit denen eine Nachführung der Prüfkopfianordnung ermöglicht wird. Die Nachführung dient dazu, eine konstante Ausrichtung zwischen Ultraschallprüfkopf und Kabeladerprüfling sicherzustellen, wodurch die Auswertungen der Schalldämpfung und -geschwindigkeit verbessert werden.

Entwicklung kontaktlose Nachführung

Das erste Konzept sieht für diesen Zweck eine kontaktlose Nachführung vor, eine schematische Darstellung ist in Abbildung 8.13 dargestellt. Die Prüfkopfianordnung befindet sich an der richtigen Position, wenn Adermittelpunkt (1) und Schnittpunkt des Schallpfades (3) in einem Punkt liegen. In diesem Beispiel weicht die Anordnung um einen Vektor (2) von der Adermitte ab und muss entsprechend korrigiert werden. Die Abweichung wird mit den Schnittpunkten (4) der Ultraschallwellen und der Kabeloberfläche bestimmt. Dazu müssen sowohl der Abstand (6) der Ultraschallköpfe als auch die Distanz (5) zwischen Ultraschallkopf und Schnittpunkt der Ultraschallpfade (3) bekannt sein. Diese müssen der Kabelgeometrie entsprechend eingestellt bzw. bestimmt werden.

Während einer Messung wird entlang des Kabels eine Berechnung der Abweichung durchgeführt und bei Überschreiten eines Schwellwertes diese Abweichung mittels aktiver Stellglieder in Form von Servomotoren korrigiert.

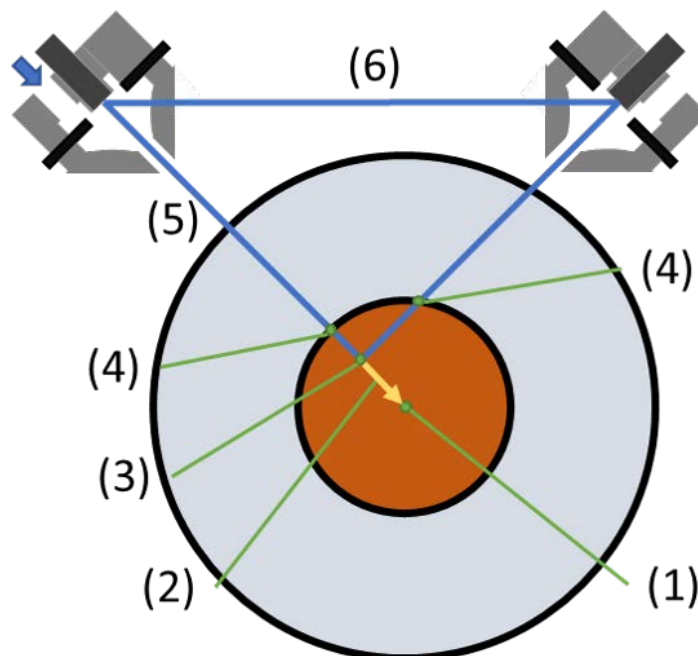


Abbildung 8.13 Kontaktlose Nachführung der Prüfkopfianordnung

Entwicklung mechanische Nachführung

Das zweite Konzept einer mechanischen Nachführung der Prüfanordnung nutzt die Schwerkraft. Die Ultraschallprüfköpfe sind an einer Halterung befestigt, die mehrere frei bewegliche Achsen hat. Die Anordnung ist in Abbildung 8.14 schematisch dargestellt. Die Halterung ist horizontal und vertikal (1) frei beweglich gelagert, um Höhen- und Distanzunterschiede zwischen Kabelader und Bewegungsachse ausgleichen zu können. Um einen horizontalen Bogen des Kabels ausgleichen zu können, ist außerdem eine Drehachse (2) vorhanden. Ein vertikaler Bogen kann durch eine weitere Drehachse (3) ausgeglichen werden. Der korrekte Abstand zwischen Düsen Spitze und Kabeloberfläche wird durch vier Rollen (4) sichergestellt, die paarweise vor und hinter der Düse angeordnet sind. Die Verwendung von kugelgelagerten, glatten Rollen stellt sicher, die Oberfläche der Kabelader nicht zu beschädigen oder zu verkratzen. Die Stabilität der Kabelader nach der CV-Linie ist ausreichend, um das Gewicht der Anordnung zu tragen. Spezielle Führungsrollen werden bereits in der Kabelproduktion verwendet. Der Abstand der Prüfköpfe zueinander muss, analog zur kontaktlosen Nachführung, dem Kabeldurchmesser entsprechend angepasst werden, um lotrecht in die Kabelader messen zu können. Mit dieser Anordnung und den vier Freiheitsgraden der Aufhängung wird sichergestellt, dass die Ultraschallprüfköpfe mit gleichbleibendem Abstand und Winkel in den Kabeladerprüfling einkoppeln.

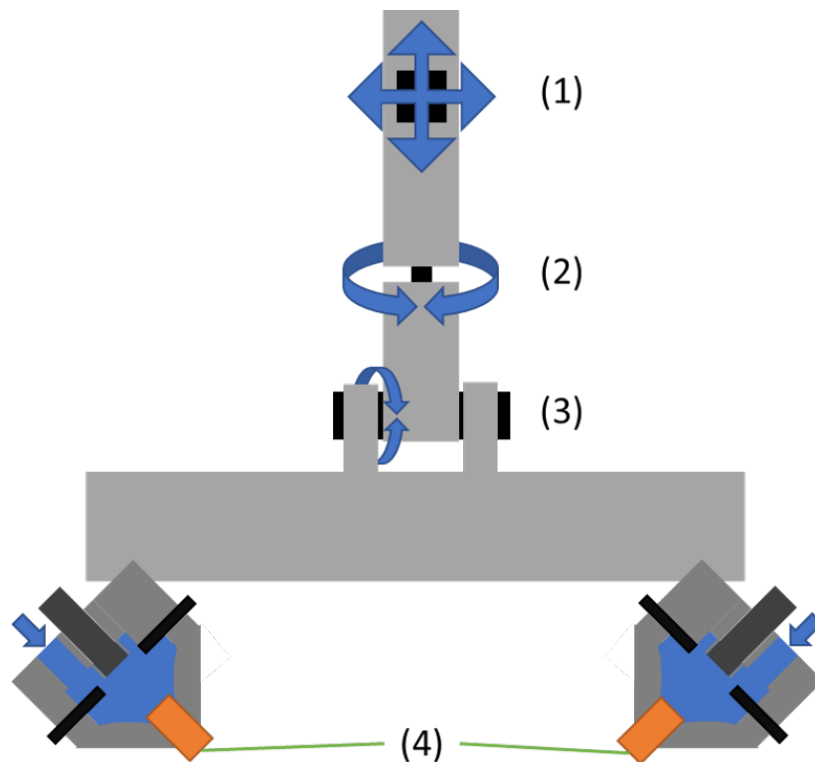


Abbildung 8.14 Mechanische Nachführung

Sowohl die kontaktlose als auch die mechanische Nachführung wurden im Labor nachgebildet und erfolgreich getestet. Für die folgenden Untersuchungen wird die mechanische Nachführung gewählt, da diese weniger zusätzliche Rechenleistung des Prüfrechners erfordert.

8.2 Demonstration des Verfahrens

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Auswertung von 6 Kabeladerprüflingen vorgestellt und abschließend verglichen. Die verwendete Darstellung der Wahrscheinlichkeitsverteilung bei der Modellkabelader (vgl. 7.1.3) wird hier nicht verwendet, da bei einer Kabeladerlänge von 2m keine sinnvolle Kalibrierung möglich ist. Jedoch ist die Darstellung grundsätzlich auch hier möglich.

8.2.1 Übersicht

Tabelle 8.1 zeigt eine Übersicht von sechs im Labordemonstrator verwendeten Kabeladerprüflingen. Bei den Prüflingen 1-3 handelt es sich um reguläre Kabelstücke aus einer erfolgreichen Produktion. Die Prüflinge 4-6 sind für die Untersuchungen im Labordemonstrator experimentell hergestellt worden. Letztere weisen allerdings durch die manuelle Kontrolle der Heizleistung und -zeiten im experimentellen Aufbau unterschiedliche Vernetzungsgrade auf und dienen damit als Vergleichsprüflinge, mit denen die entwickelte Auswertungsmethodik angewandt, der Demonstrator sowie das Verfahren verifiziert, und die Ergebnisse mit den Laboruntersuchungen verglichen werden können.

Tabelle 8.1 **Übersicht Kabeladerprüflinge**

Prüfling	Länge [cm]	Spannung [kV]	Leitermaterial	Leitertyp
1 – Kabelader	200	245	Kupfer	RM
2 – Kabelader	200	245	Aluminium	RE
3 – Kabelader	100	245	Aluminium	RM
4 – exp. Unvernetzt	50	245	Kupfer	RM
5 – exp. Teilvernetzt	50	245	Kupfer	RM
6 – exp. Vernetzt	50	245	Kupfer	RM

8.2.2 Prüfaufbau

Der Prüfaufbau ist schematisch in Abbildung 8.15 dargestellt. Die Messvorrichtung wird auf dem Kabeladerprüfling (1) geführt. Zu Beginn der Messung befindet sich die Vorrichtung an einem Ende des Prüflings (2) und wird in einer kontinuierlichen Bewegung (3) mit einer Geschwindigkeit von 2,4 m/min bis zum Endpunkt der Messung (4) bewegt. Der Messbereich wird begrenzt durch die Länge der Kabelader und die Lauffläche der Rollen. Parallel und unabhängig werden die Ultraschalldaten erfasst und im Online-Monitoring ausgewertet.

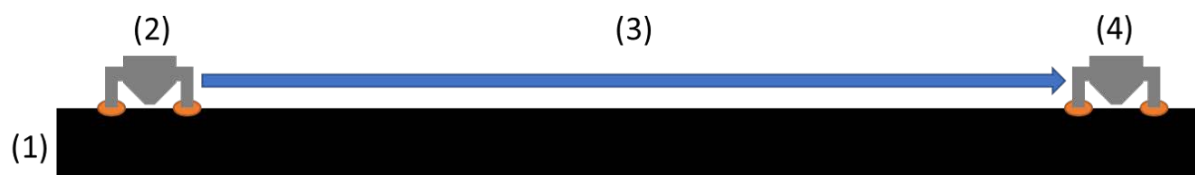


Abbildung 8.15 **Schematische Darstellung des Messaufbaus**

8.2.3 Detaillierte Darstellung der Kabeladerprüflinge

Im Folgenden werden die Ergebnisse aller gemessenen und aufbereiteten Messdaten der Auswertungen der sechs Kabeladerprüflinge detailliert vorgestellt. Kabeladerprüfling 1 wird hier nicht erneut dargestellt, da die Auswertung bereits in Abbildung 6.7 und die Ergebnisse von Schallgeschwindigkeit, Mittenfrequenz und Dämpfung bei der Erläuterung der Auswertemethodik vorgestellt worden sind.

Die berechneten Werte des zweiten Kabeladerprüflings sind in Abbildung 8.16 grafisch dargestellt. Die Ausreißer im Bereich der Messungspunkte 4000 – 5000 resultieren von am Kabeladerprüfling angebrachten Haltebändern, die mit den Laufrollen und damit der Messvorrichtung überfahren werden mussten. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

- Schallgeschwindigkeit $c = 1909 \dots 2003$ m/s (außerhalb der Haltebänder)
- Mittenfrequenz $f_m = 0,7 \dots 1,2$ MHz
- Dämpfung $\alpha_{\text{mean}} = 0,3 \dots 0,7$

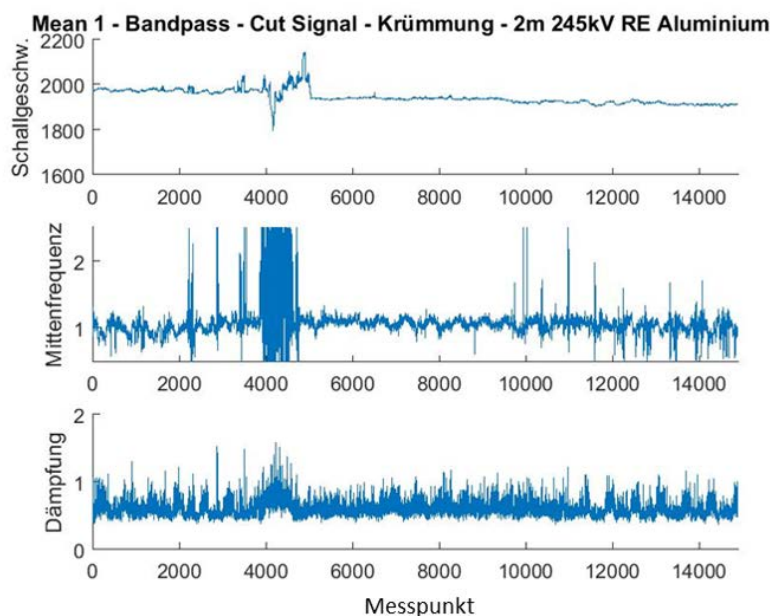


Abbildung 8.16 Auswertung Kabeladerprüfling 2 mit Bandpassfilter, Schneiden und Korrektur der Krümmung

Die Auswertung des dritten Kabeladerprüflings ergibt den in Abbildung 8.17 gezeigten Signalverlauf. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

- Schallgeschwindigkeit $c = 1956 \dots 2039$ m/s
- Mittenfrequenz $f_m = 0,7 \dots 1,5$ MHz
- Dämpfung $\alpha_{\text{mean}} = 0,05 \dots 0,6$

Der Signalverlauf der Schallgeschwindigkeit ist relativ konstant, obwohl es sich bei dem Prüfling um ein stark gebogenes Kabelstück handelt. Lediglich im Bereich um die Messungen 3500-4500 weist die Schallgeschwindigkeit geringfügig erhöhte Werte auf. Diese lassen sich auf mögliche Fehlinterpretationen der Auswertemethodik zurückführen. Die Grafik zeigt aber somit, dass die Auswertemethodik nicht nur auf ideal gerade Kabeladerprüflinge beschränkt ist.

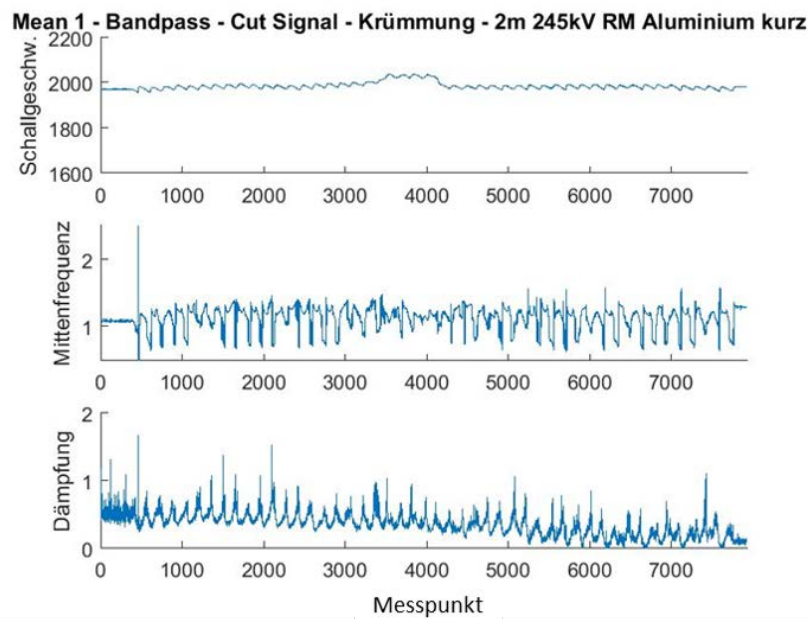


Abbildung 8.17 Auswertung Kabeladerprüfling 3 mit Bandpassfilter, Schneiden und Korrektur der Krümmung

Die ausgewerteten Daten des vierten Kabeladerprüflings, dem ersten experimentellen Prüfling, sind in Abbildung 8.18 dargestellt. Die Welligkeit der Signalverläufe resultiert aus den sich ändernden Signallaufzeiten, die durch die Einzeldrähte des Leiters hervorgerufen werden. Die fallende Tendenz der Schallgeschwindigkeit über die Messstrecke lässt sich auf die experimentelle Herstellung des Kabeladerprüflings zurückführen, bei der die Schichtdicken nicht konstant sind. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

- Schallgeschwindigkeit $c = 1973 \dots 2019$ m/s
- Mittenfrequenz $f_m = 0,7 \dots 0,9$ MHz
- Dämpfung $\alpha_{\text{mean}} = 0,3 \dots 0,6$

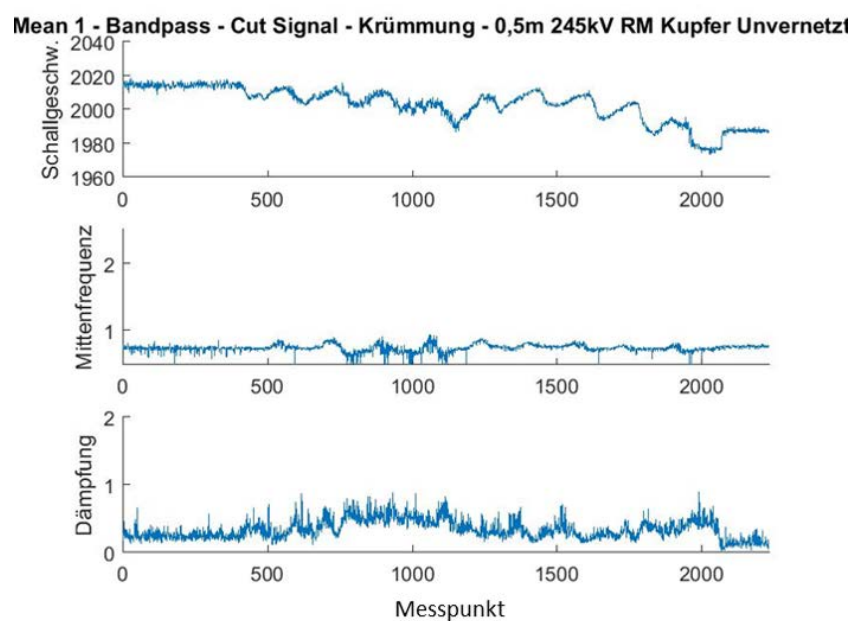


Abbildung 8.18 Auswertung Kabeladerprüfling 4 mit Bandpassfilter, Schneiden und Korrektur der Krümmung

Die Ergebnisse der Auswertung des fünften Kabeladerprüflings sind in Abbildung 8.19 grafisch dargestellt. Die steigende Tendenz der Schallgeschwindigkeit lässt sich, wie beim vierten Kabeladerprüfling, auf die Änderung der Schichtdicke zurückführen. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

- Schallgeschwindigkeit $c = 1984 \dots 2022$ m/s
- Mittenfrequenz $f_m = 0,7 \dots 0,8$ MHz
- Dämpfung bei $\alpha_{\text{mean}} = 0,2 \dots 0,5$

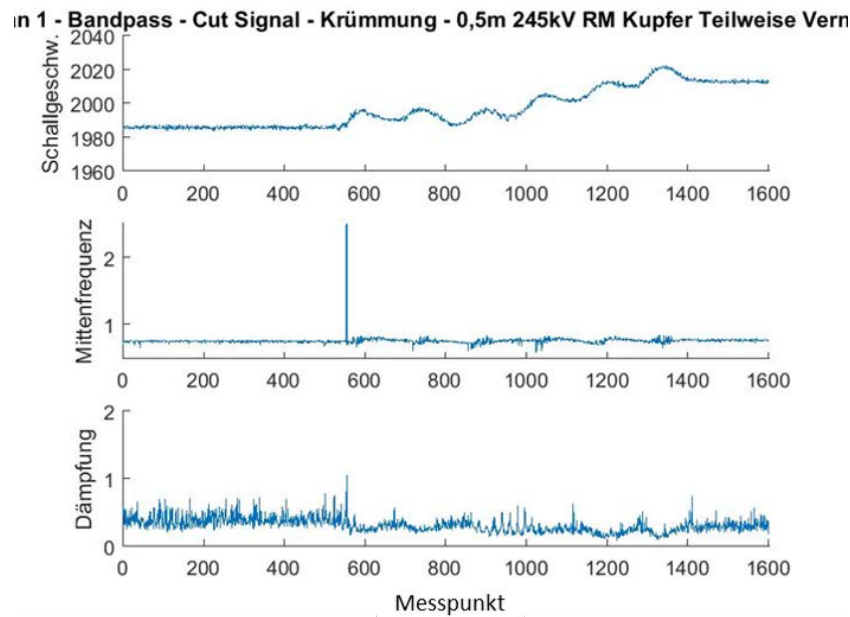


Abbildung 8.19 Auswertung Kabeladerprüfling 5 mit Bandpassfilter, Schneiden und Korrektur der Krümmung

Die Auswertung für den sechsten Kabeladerprüfling ergibt den in Abbildung 8.20 gezeigten Signalverlauf. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

- Schallgeschwindigkeit $c = 1905 \dots 1971$ m/s
- Mittenfrequenz $f_m = 1,0 \dots 1,4$ MHz
- Dämpfung $\alpha_{\text{mean}} = 0,1 \dots 0,6$

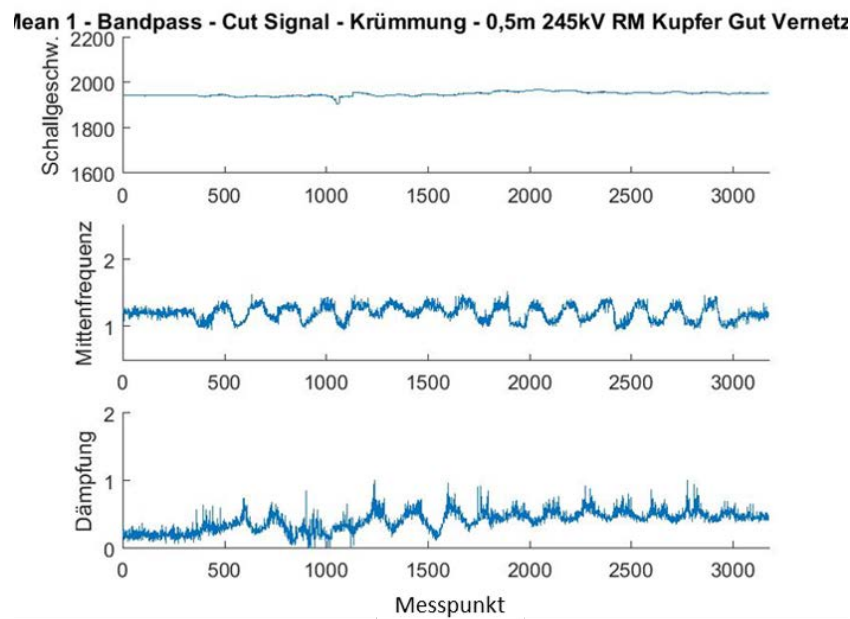


Abbildung 8.20 Auswertung Kabeladerprüfling 6 mit Bandpassfilter, Schneiden und Korrektur der Krümmung

Die Kabeladerprüflinge mit mehrdrähtigen Leitern weisen, aufgrund der Einzeldrähte, Welligkeiten in den Signalverläufen auf. Dies lässt sich auf die geänderten Reflektionen des Ultraschallsignals an der Drahtoberfläche oder einem Zwickel zwischen zwei Drähten zurückführen.

Die berechneten Werte von Schallgeschwindigkeit, Mittenfrequenz und Dämpfung der Auswertung für die sechs Kabeladerprüflinge sind zur Übersicht in Tabelle 8.2 zusammengefasst. Bei den experimentell hergestellten Kabeladerprüflingen ist eine Abgrenzung zwischen unvernetztem, teilweise und gut vernetztem Isoliermaterial mit der Schallgeschwindigkeit gut möglich. Hier zeigt sich allerdings deutlich, dass die Auswertung nur mit der Einschränkung einer gleichbleibenden Schichtdicke möglich ist. Da dies bei den experimentellen Kabeladerprüflingen nicht gegeben ist, können zur Vergleichbarkeit nur Teilbereiche der Messungen verwendet werden. Die berechneten Werte der Mittenfrequenz und Dämpfung lassen keinen eindeutigen Rückschluss auf den Vernetzungsgrad zu.

Tabelle 8.2 Übersicht der Auswertungsergebnisse aller Kabeladerprüflinge

Prüfling	Schallgeschwindigkeit c [m/s]	Mittenfrequenz f_m [MHz]	Dämpfung α
1 – Kabelader	1978 ... 2016	1,2 ... 1,6	0,3 ... 0,7
2 – Kabelader	1909 ... 2003	0,7 ... 1,2	0,4 ... 0,8
3 – Kabelader	1956 ... 2039	0,7 ... 1,5	0,05 ... 0,6
4 – exp. Unvernetzt	(1973 ...) 2019	0,7 ... 0,9	0,3 ... 0,6
5 – exp. Teilvernetzt	1984 (... 2022)	0,7 ... 0,8	0,2 ... 0,5
6 – exp. Vernetzt	1905 ... 1971	1,0 ... 1,4	0,1 ... 0,6

Die Auswertung der experimentellen Kabeladerprüflinge zeigt mit der steigenden bzw. fallenden Tendenz der Schallgeschwindigkeit deutlich, dass die Schichtdicken hinreichend genau bekannt sein und konstant bleiben müssen. Ändern sich diese in der Produktionslinie, hat das einen Einfluss auf die Berechnung der Schallgeschwindigkeit und kann damit zu einem Berechnungsfehler führen. Durch Schnittuntersuchungen wurde festgestellt, dass die Wanddicke der Inneren Leitschicht im Messbereich zwischen 1,5 und 3 mm schwankt. Die berechneten Werte der Schallgeschwindigkeit sind aufgrund der Schichtdickenvariation nur begrenzt verwendbar. Die Werte mit Messfehler durch die geänderte Leitschichtdicke sind in Tabelle 8.2 eingeklammert und können damit nicht verwendet werden.

8.3 Vergleich von Labor- und Demonstratoruntersuchungen

In diesem Abschnitt erfolgt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen des AP 4 und den Demonstratoruntersuchungen (AP 5).

Die bei den Demonstratoruntersuchungen verwendete Messanordnung ist geeignet, um qualitative A-Scans zu erfassen und auszuwerten, die entwickelte Nachführung sichert dabei zuverlässig eine lotrechte Ausrichtung zur Kabeladeroberfläche und optimale Schallsignalqualität. Die verwendete Auswertemethodik erweist sich als geeignete Methodik, um die Schallgeschwindigkeit, die Mittenfrequenz und die Dämpfung des Kabeladerprüflings zu berechnen. Abweichend zu den Laboruntersuchungen wird hier keine Kalibrierung durchgeführt, da die verwendeten Kabeladerprüflinge hierfür mit 2 m zu kurz sind. Bei den erfolgreich produzierten Kabeladerprüflingen aus der CV-Linie sind die bestimmten Schallgeschwindigkeiten und damit der Vernetzungsgrad über die Prüflingslänge nahezu konstant. Die Messanordnung und die Auswertemethodik bestätigt damit, dass sich die Vernetzung im Kabeladerprüfling über die gesamte Länge des Prüflings nicht verändert. Bei den experimentell hergestellten Kabeladerprüflingen zeigt sich, dass durch die manuelle Produktion Abweichungen der Schichtdicken vorliegen und damit ein Bewertungsfehler hervorgerufen wird. Die Änderung der Schichtdicken in der hier vorliegenden Größenordnung ist in einer normalen Kabelproduktion nicht zu erwarten und die Auswertung liefert im Bereich konstanter Schichtdicken zuverlässige Ergebnisse. Bei der für die Laboruntersuchungen experimentell hergestellten Modellkabelader waren abschnittsweise ebenfalls unterschiedliche Schichtdicken vorzufinden, die für die Berechnung herangezogen wurden. Aus beiden Untersuchungen folgt somit eine Anforderung an eine konstante Schichtdicke in der Produktionslinie.

Die Größenordnung der berechneten Schallgeschwindigkeiten liegt sowohl bei den Laboruntersuchungen als auch bei der Demonstratorverifikation im Bereich von 2000 m/s. Die Ergebnisse stimmen damit überein. Mit steigender Vernetzung konnte ein Absinken der Schallgeschwindigkeit in den Laboruntersuchungen beobachtet werden. Die Demonstratoruntersuchungen haben bei den vollvernetzten regulären Kabeladerprüflingen im Vergleich zu den experimentellen unvernetzten und teilvernetzten Prüflingen ebenfalls die geringsten Schallgeschwindigkeiten gezeigt und bestätigen damit die Ergebnisse.

Die Labor- und Demonstratoruntersuchungen haben gezeigt, dass die Schallgeschwindigkeit im Online-Monitoring berechnet und damit der Vernetzungsgrad bestimmt werden kann.

9 Zusammenfassung

Die Untersuchungen an verschiedenen Prüflingen, Modellkabeladern und Kabeladerprüflingen zeigen, dass die entwickelten Verfahren zur kontinuierlichen Überwachung des Vernetzungsgrades geeignet sind. Die Schallgeschwindigkeit eignet sich zur Bewertung der Vernetzung und ermöglicht damit eine Abgrenzung zwischen unvernetzt, unzulässig vernetzt, grenzwertig vernetzt und vollvernetzt. Ein großer Einflussfaktor bei der Berechnung der Schallgeschwindigkeit ist die Schichtdicke. Die Untersuchungen ergeben, dass eine Änderung der Schichtdicke in Berechnungsfehlern resultiert, somit muss während eines Produktionsmonitorings die Schichtdicke konstant gehalten werden oder bekannt sein. In einer Produktionslinie können wirtschaftlich keine unvernetzten oder teilweise vernetzten Kabeladerprüflinge hergestellt werden, weshalb sowohl für die Materialuntersuchungen als auch die Demonstratorverifikation experimentell hergestellte Prüflinge verwendet wurden. Die experimentellen Prüflinge wiesen allerdings das Problem variierender Schichtdicken auf, weshalb nur kleine Bereiche bei konstanter Schichtdicke gemessen und in den Ergebnissen verwendet werden konnte.

Das Messverfahren kann in einer Produktionslinie als Überwachungssystem verwendet werden, wobei relative Änderungen in der Schallgeschwindigkeit detektiert werden. Denkbar ist eine Kalibrierung auf ein Kabeladerbereich, welches anschließend in einem standardisierten Hot-Set-Test untersucht wird. Wenn eine ausreichende Vernetzung nachgewiesen werden kann, wird das Überwachungssystem dementsprechend eingestellt und kann während dem Produktionsprozess Änderungen der Schallgeschwindigkeiten anzeigen, sodass – falls nötig – der Produktionsprozess dementsprechend nachgeregelt werden kann. Die Änderung kann dann dahingehend untersucht werden, ob lediglich eine (unkritische) Schichtdickenänderung vorliegt, oder eine mangelhafte Vernetzung der Grund ist und Parameter der Produktionslinie angepasst werden müssen.

Während dem Projekt hat sich die Bestimmung des Vernetzungsgrades durch die Schallgeschwindigkeit als vielversprechend herausgestellt. Ein weiteres Einsatzgebiet kann damit die Bestimmung des Vernetzungsgrades an definierten Prüflingen sein. Dies würde den aufwendigen Hot-Set-Test ersetzen. Denkbar ist eine automatisierte Vorrichtung, die definierte Voraussetzungen, wie Abmessungen des Prüflings, schafft und anschließend die Schallgeschwindigkeit und damit den Vernetzungsgrad bestimmt. Die Kabelhersteller des Projektbegleitenden Ausschusses begrüßen einen möglichen Ersatz für den Hot-Set-Test, da ein ultraschallbasiertes Verfahren schnellere, genauere und reproduzierbarere Ergebnisse verspricht.

10 Innovativer Beitrag und Nutzen der erzielten Forschungsergebnisse

In den Fachgebieten:

- Hauptsächlich Nutzung in „Elektrotechnik und Hochspannungstechnik“
- Mögliche Nutzung in „Werkstoffe, Materialien“ und „Verfahrenstechnik“

In den Wirtschaftszweigen:

- „Energieversorgung“
- „Kabelherstellung“
- „Anbieter von Prüfsystemen“

Die Forderung hoher Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit von Anlagen und Netzen der elektrischen Energieübertragung stellt seit jeher einen der wichtigsten Faktoren im Bereich der Energietechnik dar. Seit der Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes steht gleichzeitig auch die Wirtschaftlichkeit klar im Fokus. Die gesetzliche Grundlage bezieht sich zwar auf Energieversorgungsunternehmen, gleichwohl folgt hieraus ebenfalls die Notwendigkeit wirtschaftlicher Effizienz zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit für Hersteller energietechnischer Komponenten, wie beispielsweise Kabelhersteller. Zur Aufrechterhaltung höchster Qualität der Komponenten, wie zum Beispiel Energiekabel, werden Systeme zur Überwachung und Prüfung der Herstellungsprozesse benötigt, welche hauptsächlich von KMU entwickelt und vertrieben werden. Die Bereitstellung neuartiger Produkte zur Verbesserung der Qualitätssicherung stellt dabei einen zentralen Punkt zur internationalen Marktpräsenz der KMU dar.

Das Innovationsziel ist die Möglichkeit zur Online-Bewertung des Vernetzungsgrades von Energiekabeln während des Produktionsprozesses. Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen an Prüflingen, Modellkabeladern und Kabeladerprüflingen haben gezeigt, dass eine kontinuierliche Überwachung des Vernetzungsgrades mit den entwickelten Verfahren möglich ist. Eine Bewertung des Vernetzungsgrades ist mittels der Schallgeschwindigkeit möglich und die verschiedenen Klassen unvernetzt, unzulässig vernetzt, grenzwertig vernetzt und vollvernetzt differenzierbar. Als großer Einflussfaktor für die Berechnung der Schallgeschwindigkeit konnten die Schichtdicken ausgemacht werden. Während einem Produktionsmonitoring muss somit die Schichtdicke konstant gehalten werden oder bekannt sein. Die Untersuchungen an der Modellkabelader und den experimentellen Kabeladerprüflingen am Technologiedemonstrator konnten beim Online-Monitoring die Schallgeschwindigkeit gut bestimmen. Damit konnte gezeigt werden, dass auftretende Abweichungen oder mögliche Unstimmigkeiten während dem Produktionsprozess in einem kalibrierten Messverfahren detektiert werden können.

11 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Durchgeführte Transfermaßnahmen in 2015:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum
1	Information des FGH Forschungsbeirates	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	27.10.2015

Durchgeführte Transfermaßnahmen in 2016:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum
1	Tagungsbeitrag VDE-Hochspannungstechnik 2016 - ETG-Fachtagung Bestimmung des Vernetzungsgrades in VPE-Isolierung mittels Ultraschall	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	14.-16.11.2016
2	Information des FGH Forschungsbeirates	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	05.04.2016 22.11.2016

Durchgeführte Transfermaßnahmen in 2017:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum
1	Information des FGH Forschungsbeirates	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	26.04.2017 23.10.2017

Geplante Transfermaßnahmen:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum	Realisierbarkeit
1	Vorlesung „Hochspannungstechnik – Isoliersysteme“ am Institut für Hochspannungstechnik der RWTH	Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte auf die Thematik	ca. 12 Monate nach Projektende	sicher
2	Publikation auf der FGH-Homepage	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	nach Projektende	sicher
3	Übernahme in die akademische Lehre der RWTH Aachen	Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte auf die Thematik	ca. 12 Monate nach Projektende	sicher
4	Tagungsbeitrag VDE-Hochspannungstechnik 2018 - ETG-Fachtagung	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	November 2018	geplant

12 Literaturverzeichnis

- [Auc90] D. Auckland, B. Varlow, D. Maloney, Ultrasonic detection of insulation degradation, 1990, IEE Proceedings, Vol. 137 No.6, Page 356-360
- [Auc96] D. Auckland et al., Application of ultrasound to the inspection of insulation, 1996, IEE Proceedings Measurement Technologies, Vol. 143 No. 3, Page 177-181
- [Bra11] G. Brammer, Prototype for detection of delamination in the sheath system of high voltage power cables using ultrasonic diagnosis, 2011, 8th International Conference on Insulated Power Cables, Article C.4.3
- [Bra13] G. Brammer, Kontaktlose Messung der Leitertemperatur in der Energiekabelproduktion mittels Ultraschall, 2013, Dissertation, RWTH Aachen
- [Cor03] C. Cornelissen, Ultraschalldiagnostik als neues Verfahren zur Zustandsbewertung elastomerer Isolierstoffe in Energiekabelsystemen, 2003, Dissertation, RWTH Aachen
- [Die14] E. Dietrich, A. Schulze, Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation, Hanser, München, 2014
- [Den12] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030 (kurz: dena-Verteilnetzstudie), 2012, Berlin
- [IEC60811] Electric and optical fibre cables - Test methods for non-metallic materials - Part 507: Mechanical tests - Hot set test for cross-linked materials, 2012
- [Kir01] J. Kirchhoff, Die Messung des Vernetzungsgrades an elastomeren Werkstoffen mit einem Ultraschallverfahren, 2001, Dissertation, Universität Hannover
- [Kna11] J. Knaul, G. Brammer, A. Schnettler, C. Cornelissen, Detection of state of cure of EPDM in medium voltage cables using ultrasound diagnosis, 2011, 17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover
- [Kra86] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, Werkstoffprüfung mit Ultraschall, 1986, Springer Verlag Berlin/Heidelberg
- [Mai99] H.J. Mair, Kunststoffe in der Kabeltechnik, 1999, Expert Verlag Renningen-Malmsheim
- [Nie62] L.E. Nielsen, Mechanical Properties of Polymers, 1962, Chapman & Hall Ltd., London
- [Schm98] L.W. Schmerr, Jr., Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation, 1998, Plenum Press, New York, London
- [Smi03] C. Smith et al., The development of an ultrasound quality monitoring process for the manufacture of enhanced reliability HV and EHV XLPE cables, 2003, 6th International Conference on Insulated Power Cables, Article A.2.6
- [Wal06] P. Walter, Detektion und Evaluation von Inhomogenitäten im Volumen und an inneren Grenzflächen in polymeren Isoliersystemen mittels Ultraschall, 2006, Dissertation, RWTH Aachen
- [Wir11] T. Wirz, Verfahren zur Optimierung der Ultraschalldiagnostik an polymeren Isoliersystemen, 2011, Dissertation, RWTH Aachen