



ULTRATEST
NON-DESTRUCTIVE-TESTING

Abschlussbericht gem. NKBF 98

Zuwendungsempfänger: UltraTest GmbH Dr. Steinkamp & Büssenschütt
Am Schmiedeberg 6
28832 Achim

Förderkennzeichen: **20Q1921**

Vorhabenbezeichnung: **PIRANHA**

**„Produktionsbegleitende Qualitätskontrolle der Aus-
härtung von Dichtmassen mittels Ultraschalltechnik“**

Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2021 bis 31.05.2024

Berichtszeitraum: 01.06.2021 bis 31.05.2024

Ausgabedatum: 30.11.2024

Projektleiter: Hajo Büssenschütt

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | Motivation und Planung des Projekts | 3 |
| 1.1 | Aufgabenstellung | 3 |
| 1.2 | Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde | 4 |
| 1.3 | Planung und Ablauf des Vorhabens | 4 |
| 1.4 | Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde | 7 |
| 1.5 | Zusammenarbeit mit anderen Stellen. | 8 |
| 2 | Technischer Ergebnisbericht | 9 |
| 2.1 | HAP 1 Anforderungen und Randbedingungen | 9 |
| 2.1.1 | AP 1.1 Definition Einsatzgebiete/Systemanforderungen | 9 |
| 2.1.2 | AP 1.2 Materialbeschaffung und Probenherstellung | 12 |
| 2.1.3 | Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele | 13 |
| 2.2 | HAP 2 Probenherstellung / Haftungstest | 13 |
| 2.2.1 | AP 2.1 Test bestehendes System mit ausgewählten Materialien | 13 |
| 2.2.2 | Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele | 22 |
| 2.3 | HAP 3 Weiterentwicklung Messsystem | 22 |
| 2.3.1 | AP 3.1 Auslegung und Anpassung Messzellen | 23 |
| 2.3.2 | AP 3.2 Anpassung und Optimierung Ultraschallkomponenten | 24 |
| 2.3.3 | Gegenüberstellung vorgegebener Ziele | 29 |
| 2.4 | HAP 4 Aufbau und Test Demonstrator | 29 |
| 2.4.1 | AP 4.2 Tests Demonstrator in Laborumgebung | 32 |
| 2.4.2 | Test unter Produktionsbedingungen | 33 |
| 2.4.3 | Gegenüberstellung vorgegebener Ziele | 33 |
| 2.5 | HAP 5 Dichtmassendatenbank | 33 |
| 3 | Durchführendes Unternehmen | 34 |

1 Motivation und Planung des Projekts

1.1 Aufgabenstellung

Zur kontinuierlichen Verbesserung von strömungstechnischen Eigenschaften und zunehmenden Verbreitung von laminar-umströmten Bauteilen im Flugzeugbau spielen Dichtmassen eine integrale Rolle beim Materialübergang und als Verbindungstechnik. Dies erfordert eine ausführliche, stetige und bestenfalls prozessbegleitende Überwachung der Materialeigenschaften. Zusätzlich wird durch die Umsetzung der REACH-Verordnung in der Fertigung die Einführung neuer, chemisch angepasster Produkte notwendig, wodurch umfangreiche Test- und Entwicklungsprogramme für deren Zulassung erforderlich sind.

Als mögliche Methode zur Messung des Aushärteverhaltens wurde mit der Ultraschallmesstechnik ein vielversprechender neuer Ansatz verfolgt. Diese kann hierbei als passende Lösung zur prozessbegleitenden Qualitätssicherung dienen. Zusätzlich bietet dieses Messverfahren einen neuen Zugriff auf bisher nur schwer erfassbare Materialparameter: Das Aushärteverhalten der Dichtmassen kann zukünftig während der gesamten Reaktion in Echtzeit verfolgt werden und ermöglicht so neue Strategien in der Materialentwicklung. Das Messsystem kann zudem auch die Aushärtecharakteristika für spezielle Geometrien, wie z.B. dünne Schichten, ermitteln.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Labormessgerätes zur ultraschallbasierten Kontrolle des Aushärteprozesses speziell von Dichtmassen. Hierfür werden marktübliche Dichtmassen mit dem bestehenden Messsystem gemessen, woraufhin Anpassungen am System durchgeführt werden, wie ein verringerter Abstand zwischen Sender und Empfänger und eine höhere zeitliche Auflösung der Messelektronik. Das entwickelte System soll zum Ende des Projektes als Demonstrator zur Verfügung stehen, welcher im realen Fertigungsumfeld getestet wurde. Verwertungsperspektivisch soll der Demonstrator die Grundlage für ein im Anschluss an das Projekt zu entwickelndes kommerziell erhältliches System für den Einsatz in der Luftfahrtindustrie und deren Zulieferbranchen bilden. Die Randbedingungen für das Messsystem wurden gemeinsam mit der Firma Chemetall GmbH für eine praxisorientierte Anwendung erstellt:

- Erstellung eines angepassten Ultraschallaufbaus (Demonstrator) für industrie-nahe Umgebung
- Robuster, stabiler und vibrationsfester Aufbau (Messung muss robust gegen in der Fertigung auftretende Vibrationen sein.)
- Gute thermische Stabilität (10°C-40°C, 30%r.H. – 80%r.H.)
- Messung von zeitlich veränderlichem Messsignal durch Aushärtung möglich

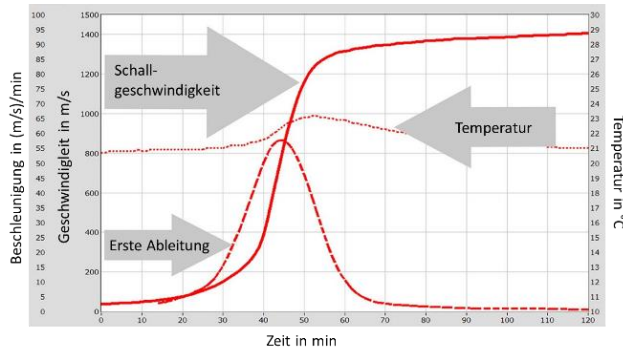


Abbildung 1: Messaufbau Aushärtemessung mit Ultraschall mit Standardmesszellen (links), Messung eines Abbindevorgangs eines anorganische Baustoffe (rechts).

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

In der Luftfahrtindustrie spielen Dichtmassen durch ihren zunehmenden Einsatz als Verbindungstechnik und ihre besondere Funktion beim Materialübergang eine integrale Rolle in der Produktion. Zur Qualitätssicherung und Steigerung der Taktzeiten bei der Fertigung der Flugzeugkomponenten bedarf es einer Methode, welche die relevanten Eigenschaften bei der Aushärtung der Dichtmassen direkt während der Fertigung erfasst. Bislang wird das Aushärteverhalten der Dichtmassen durch Messung der sogenannten Shore A Härte an Referenzproben erfasst. Hierbei wird für jede Dichtmasse immer wieder in gewissen zeitlichen Abständen die Shore A Härte bestimmt, bis ein Sollwert erreicht ist. Die so ermittelte Zeit ist die Aushärtezeit (curing time), welche die Referenzprobe zum Aushärten benötigt, um eine vorgegebene Härte zu erreichen. Erst nachdem diese Zeit nach der Applikation der Dichtmasse in der Fertigung erreicht ist, darf das Bauteil weiter verarbeitet werden. Diese Methode ist durch ihren Bedarf an zu prüfenden Proben, Personal für die Messungen oder teuren automatisierten Prüfvorrichtungen kostenintensiv und zudem nur bedingt den tatsächlichen Einsatz- und Fertigungsbedingungen angepasst. In der Fertigung werden deshalb zum Teil zeitliche Sicherheitszuschläge für das Aushärten der Dichtmassen verwendet, da nicht in allen Prozessschritten mit Dichtmitteleinsatz eine Qualitätssicherung durchgeführt werden kann oder sporadisch portable Shore A Härtemessgeräte verwendet, deren Genauigkeit und Reproduzierbarkeit aber stark eingeschränkt sind.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen des geplanten Projektes für die Entwicklung eines Messsystems für die produktionsbegleitende Qualitätskontrolle der Aushärtung von Dichtmassen mittels Ultraschalltechnik geht es für UltraTest primär um den technologischen Transfer in ein neues Material- und Anwendungsgebiet. Hierzu sind die Auslegung einer neuen Messgeometrie sowie Anpassungen an neue Materialien mit neuen Eigenschaften bezüglich der Ultraschall-Wechselwirkung erforderlich.

In HAP 0 ist UltraTest für das Projektmanagement im gesamten Vorhaben zuständig. Im HAP 1 werden zusammen mit dem IFAM und Chemetall Anforderungen an das zu entwickelnde Messsystem und die zu untersuchenden Materialien (in erster Linie Dichtmassen, perspektivisch auch dünnsschichtige 2K-Epoxidharze und Lacke) so festgelegt, dass im Projekt praxisrelevante Produkte untersucht werden.

Im HAP 2 finden zusammen mit dem IFAM Messungen an den in HAP 1 festgelegten Materialien mit dem bestehenden Ultraschallmesssystem statt. Die Ergebnisse werden

ausgewertet und mit den am IFAM durchgeführten Referenzmessungen verglichen und notwendige Anpassungen des Systems für HAP 3 geplant.

In HAP 3 führt UltraTest die Weiterentwicklung des Ultraschallmessgerätes durch. Hierzu zählt u.a. eine Anpassung der Messzellen (Geometrien, Dimensionen, Resonanzverhalten, Kontaktflächen mit der Luft). Weiterhin führt UltraTest Anpassungen an den Ultraschallkomponenten (Messfrequenzen, Geometrien, ...) zur Signalloptimierung durch. Die Aushärtung der Dichtmassen in der Messzelle soll möglichst identisch zur Aushärtung der im Flugzeugbau aufgetragenen Dichtmasse stattfinden.

Aus dem weiterentwickelten Versuchsaufbau baut UltraTest in HAP 4 ein Messgerät als Demonstrator auf. Zusammen mit dem IFAM führt UltraTest den Test dieses Demonstrators zunächst in einer Laborumgebung und anschließend im realen Fertigungsumfeld durch. Ziel ist es, die Einsatzfähigkeit des Messsystems in den geforderten Einsatzgebieten (Produktionsumgebung) zu testen und zu beurteilen.

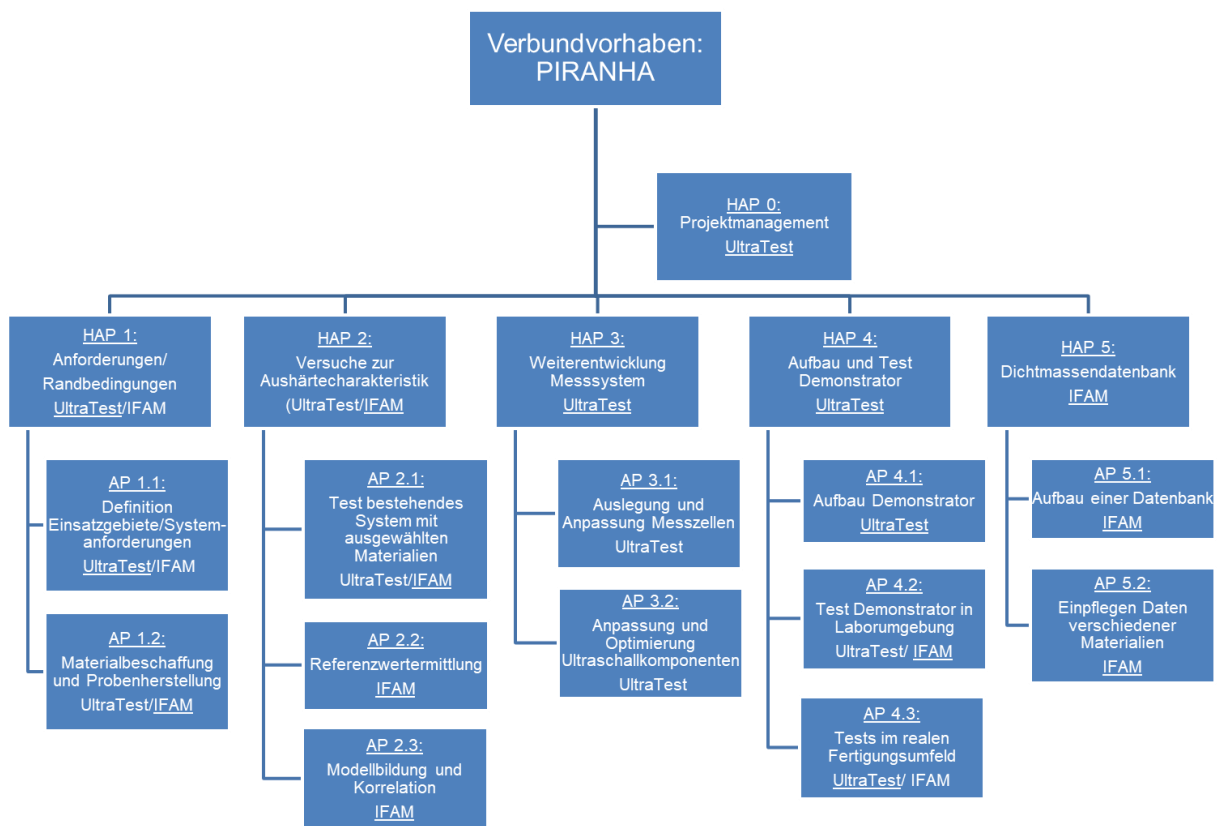


Abbildung 2: Projektstrukturplan des Verbundvorhabens PIRANHA

Der in Abbildung 2 abgebildete Netzplan des Vorhabens zeigt die einzelnen Arbeitspakete im Überblick. Aus diesem Netzplan ergibt sich der Zeitliche Ablaufplan wie er in Abbildung 3 dargestellt ist.

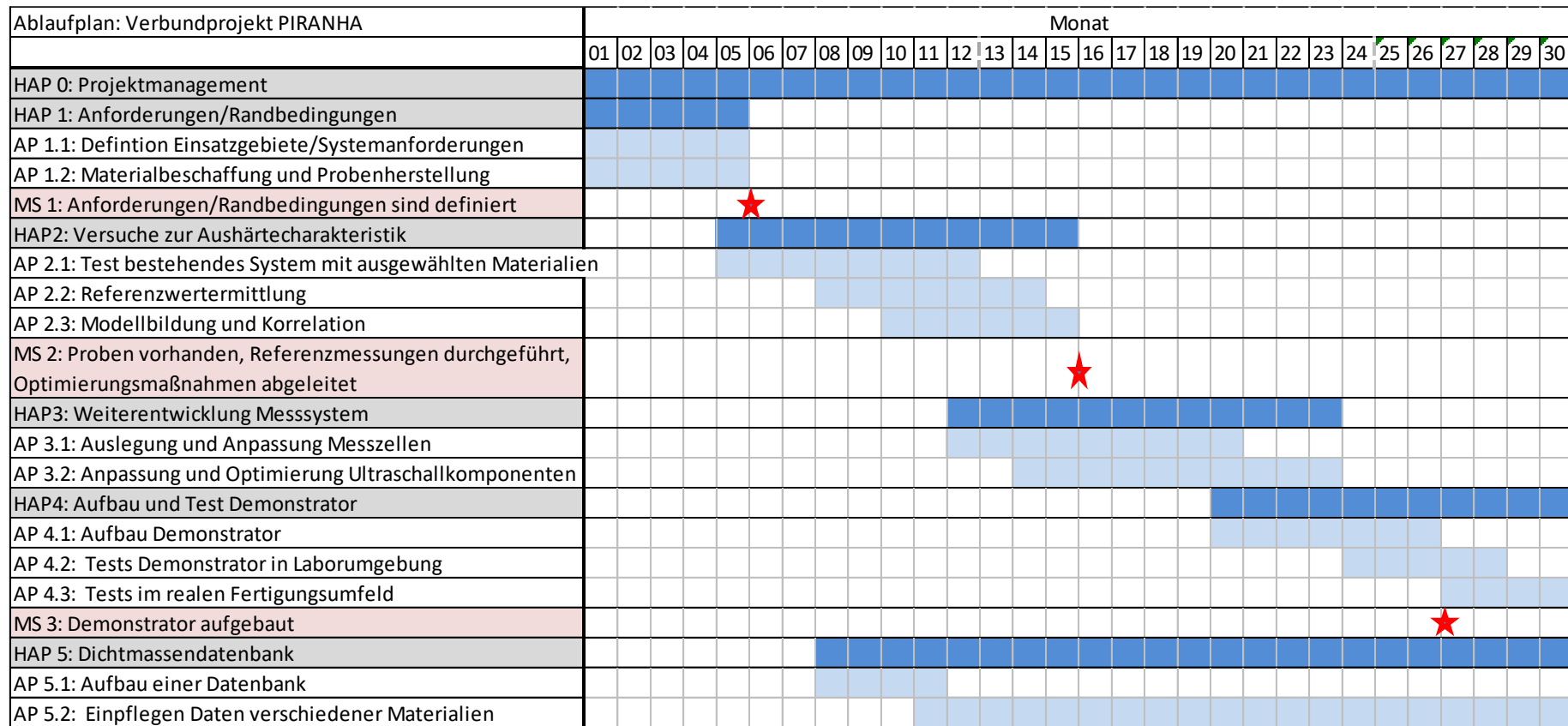


Abbildung 3: Aktualisierter Balkenplan des zeitlichen Verlaufs der geplanten Arbeitspakete und der Meilenstein.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Bislang wird das Aushärteverhalten von Dichtmassen in der Fertigung durch die Messung der sogenannten Shore A Härte an Referenzproben erfasst. Der innovative Ansatz des Vorhabens PIRANHA liegt darin, eine in der Bauindustrie bereits eingesetzte Methode zur Qualitätssicherung von Abbindeprozessen [Oga06, Rap00, Sta10], wie zum Beispiel bei Beton, dahingehend anzupassen, dass diese für die Aushärtemessung von Dichtmassen direkt in der Produktion angewendet werden kann. Das von der Firma UltraTest vertriebene Gerät bietet nach einer Anpassung für den Einsatz von Dichtmassen das Potential, Kosten in der Produktion einzusparen, indem die Taktzeiten für Prozessschritte verringert werden können. Gleichzeitig kann dabei die Produktqualität unter Fertigungsbedingungen gesichert und nachhaltig dokumentiert werden. Defizite in der Fertigungsqualität (beispielsweise Fehler im Mischungsverhältnis bei zweikomponentigen Systemen [And11]) können außerdem erfasst werden. Es gibt bereits Veröffentlichungen zu Anwendungsszenarien in der Kunststoffbranche, welche eine grundsätzliche Eignung der Ultraschallmesstechnik zur Charakterisierung von Aushärteprozessen beschreiben [Agg12, Ali03, Sch05].

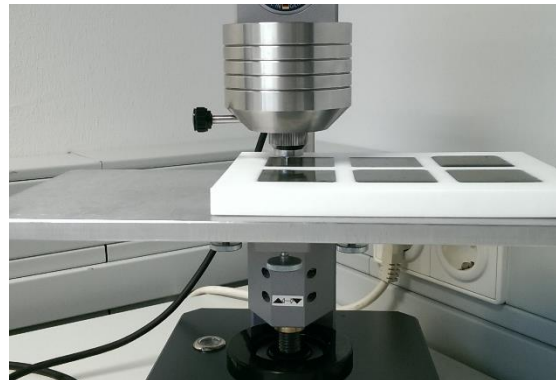


Abbildung 4: Beispiel Dichtmasseneinsatz am Flugzeugflügel (links) [Airbus], Shore A Härtemessgerät mit Dichtmassenproben [Fraunhofer IFAM]

Ultraschallbasierte Aushärtemessung

Die ultraschallbasierte Aushärtemessung basiert auf der Laufzeitänderung des Schallimpulses in einem Stoff bei fester Dimension in Abhängigkeit der Temperatur. Der Ultraschallimpuls wird in dem zu untersuchenden Material mittels Sonotrode eingeschallt und wieder empfangen. Ändert sich zum Beispiel die Temperatur oder Härte des Materials, ändert dies die Laufzeit des Signals. Die Ultraschallmesstechnik wird als Prüfmethode bereits in der Luftfahrt zur zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen in der Fertigung eingesetzt, jedoch um Fehler nach einzelnen Prozessschritten in Metallen oder faserverstärkten Kunststoffen zu erfassen. Im Gegensatz zu der bisher durchgeführten Shore A Härtemessung über die Eindringtiefe eines entsprechend geformten Prüfkörpers in den Dichtstoff, wird das zu prüfende Material hierbei nicht geschädigt und kann dadurch kontinuierlich und in Echtzeit an nur einer Probe untersucht werden. Um mit der aktuell angewandten Technologie der Shore A Messung eine einzelne Dichtmasse zu untersuchen oder zu qualifizieren ist es notwendig, für jeden Messpunkt eine Probe herzustellen und mit definiertem zeitlichen Abstand auszuwerten. Der Aufwand ist damit bisher sehr groß. Weiter ist die Shore A Härtemessung auf Basis der Referenzprüfkörper mit fester Probengeometrie definiert und bildet nicht die realen Bauteildimensionen ab.

Mittels Laufzeitmessung des Ultraschallimpulses ist es möglich die untersuchten Dimensionen besser der Realität anzupassen. Weiter ist es möglich, mittels Schall ein größeres Volumen gleichzeitig zu untersuchen und damit noch verlässlichere Daten über den Gesamtzustand der Aushärtung zu erhalten. Damit ist insgesamt ein großes Anwendungs- und Automatisierungspotential für die bereits in anderen Bereichen eingesetzte Technologie gegeben. Dies gilt für die Fertigung der einzelnen Bauteile in der Luftfahrt, wie auch für die Qualitätssicherung bei der Herstellung der Dichtmassen für die Luftfahrt.

Literaturstellen

- [Agg12] Aggelis D. G., et al.: Monitoring of resin curing and hardening by ultrasound, *Construction and Building Materials*, 26/1, 2012, S. 755-760.
- [Ali03] Alig I. et al.: Supplement Prüf- und Messtechnik *Farbe & Lack*, 8, 2003, S. 73.
- [Amk12] Amkreutz M., et al.: Simulierte Vernetzung; *FARBE UND LACK*, 118/5, 2012, S. 28-33.
- [And11] Anderson G. L.: Design with Sealants, in: *Handbook of Adhesion Technology*, da Silva LFM, Öchsner A, Adams AD (Herausgeber), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [Bul05] Bulavinov A.: Der getaktete Gruppenstrahler, Dissertation an der Universität des Saarlandes, 2005.
- [Ehr11] Ehrhart B., et al.: Preliminary Tests for the Development of New NDT Techniques for the Quality of Adhesive Bond Assessment; *DGZfP-Jahrestagung - Poster 29*, 2011.
- [Oga06] Ogasawara H. et al.: Acoustical experiment of yogurt fermentation process, *Ultrasonics*, 2006, doi 44:e727-30.
- [Rap00] Rapoport J. R., et al.: Using ultrasound to monitor stiffening process of concrete with admixtures, *ACI Mater Journal*, 97/6, 2000, S.675-83.
- [Sta10] Stark W.: Investigation of curing behaviour of melamine/phanolic (MP), thermosets, *Polym. Test* 29, 2010, S. 723-728.
- [Sch05] Schmachtenberg E., et al.: Application of ultrasonics for the process control of Resin Transfer Moulding (RTM), *Polym. Test.*, 24/33, 2005, S.8.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Die Firma UltraTest arbeitete in dem Projekt eng mit den Partnern, dem Fraunhofer IFAM und Chemetall GmbH (assoziiert) zusammen. UltraTest übernahm hierbei hauptsächlich die Arbeiten zur Weiterentwicklung des Ultraschallsystems und des Aufbaus des Demonstrators. Regelmäßige Treffen der Partner gewährleisteten den Informationsaustausch während des Projektes. Auch in den Arbeitspaketen, in denen UltraTest keine direkte Beteiligung hatte, stand es dem IFAM beratend und unterstützend zur Verfügung.

Darüber hinaus stand Chemetall als zuverlässiger Partner während der gesamten Projektlaufzeit beratend zur Verfügung. Insbesondere galt dies bei der Definition der Randbedingungen und Einsatzgebiete in HAP 1, ebenso wie der Bereitstellung von Dichtmassen für alle Messungen, sowie der Einschätzung der Messergebnisse im Hinblick auf die industrielle Verwertbarkeit der Ultraschallmessungen.

2 Technischer Ergebnisbericht

Nachfolgend werden die im Projektzeitraum durchgeführten Tätigkeiten und die erarbeiteten Ergebnisse entsprechen Netzplan (Abbildung 2) in den verschiedenen HAP's und AP's detailliert dargestellt.

2.1 HAP 1 Anforderungen und Randbedingungen

Das HAP 1 gliedert sich in die zwei Arbeitspakete (AP) 1.1 und 1.2. und wird von UltraTest geleitet.

AP 1.1 dient der Festlegung von Anforderungen an das Messsystem. Diese wurden anhand der realen Einsatzbedingungen von Dichtmassen im Flugzeugbau zusammen mit dem IFAM und dem Partner Chemetall erarbeitet. Außerdem wurden zu berücksichtigenden Randbedingungen (spätere Einsatzorte und Dimensionen sowie Geometrien z.B. der Dichtung) definiert. Das Ziel lag in einer ganzheitlichen Betrachtung aller relevanten Aspekte für den späteren produktionsbegleitenden Einsatz des Messgerätes. Des Weiteren wurden die zu untersuchenden Materialien so festgelegt, dass praxisrelevante Produkte untersucht werden und das Messsystem auf real benötigte Anwendungen ausgelegt wird. Diese Definitionen haben einen entscheidenden Einfluss auf alle nachfolgenden Arbeitspakete, da sie sich direkt auf die Konstruktion des Messsystems auswirken.

In AP 1.2 wurden die festgelegten Materialien beschafft und aus ihnen die Probekörper gefertigt, an denen anschließend erste Versuchsreihen durchgeführt werden. Neben Material vom Partner Chemetall soll außerdem ein weiteres Produkt eines anderen Herstellers untersucht werden. Hierfür wurde eine häufig verwendete Dichtmasse der Firma PPG ausgewählt.

Das HAP 1 schloss mit dem Meilenstein (MS) 1 ab, als die Anforderungen an das Messsystem sowie die Randbedingungen definiert waren.

Im Folgenden sind die Arbeitsergebnisse dargestellt.

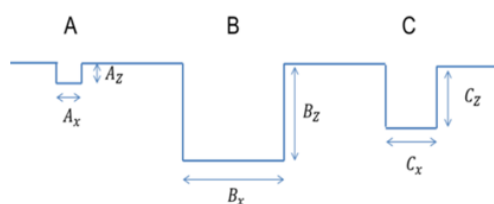
2.1.1 AP 1.1 Definition Einsatzgebiete/Systemanforderungen

Einsatzgebiete und Systemanforderungen:

Zusammen mit dem Projektpartner IFAM und dem Partner Chemetall wurden die Anforderungen erarbeitet.

Um den Anforderungen aus der Industrie möglichst gerecht zu werden, wurden insbesondere auch die Anforderungen des Partners Chemetall als potentieller Endanwender berücksichtigt. Ziel war es die genauen Vorstellungen für das zu entwickelnde Messgerät abzufragen und auf besondere Problemstellungen einzugehen. Das Ergebnis fließt direkt in die Entwicklung des Messgeräts ein.

Ein wichtiger Punkt sind die Geometrien der Dichtfugen. Die Aushärtung (z.B. zeitlicher Verlauf und prozentualer Schrumpf [1], [2]) von Dichtungsmassen hängt hiervon ab, sodass mit dem zu entwickelnden Messgerät die Geometrie der realen Dichtungsfuge möglichst abgebildet werden sollte. Gleichzeitig soll mit einer Messkammer möglichst universell eine Aussage für alle am Flugzeugrumpf aufgetragenen Dichtnähte getroffen werden. Als Grundlage für die Geräte- und Methodenentwicklung werden die in Abbildung 5 aufgeführten Spaltmaße herangezogen. Ziel ist die Abbildung der in der real-Fuge stattfindenden Aushärtung mit dem Messsystem.



| | Fuge A | Fuge B | Fuge C |
|------------|--------|--------|--------|
| Breite (x) | 2,0 mm | 8,0 mm | 3,0 mm |
| Tiefe (z) | 1,3 mm | 6,3 mm | 4,5 mm |

Abbildung 5: Darstellung dreier unterschiedlicher Spaltmaße, welche für die Anwendung von Dichtungsmassen im Flugzeugbau relevant sind.

Als spätere Einsatzorte sind die Fertigung, Reparatur sowie Instandhaltung anzusehen. Für alle Anwendungen, bei denen Dichtmassen und perspektivisch auch 2K-Kunststoffe und Lacke zum Einsatz kommen, kann das zu entwickelnde Verfahren für die Qualitätssicherung und die zeitliche Optimierung von Prozessen herangezogen werden.

Bezüglich des Arbeitsschutzes sind keine besonderen Maßnahmen für den Einsatz des Messgeräts zu treffen. Es gibt kein Gefährdungspotential für den Menschen.

In einem Anforderungskatalog für das Messsystem wurden anhand der späteren realen Einsatzbedingungen des Messgeräts die für die Entwicklung relevanten Parameter zusammengefasst. Im Detail wurden die in Tabelle 1 dargestellten Anforderungen in das Projekt übernommen. Insbesondere bei den Parametern Luftfeuchtigkeit und Temperatur ist von großen Schwankungen auszugehen. Die Fertigung findet in unterschiedlichen europäischen und nicht-europäischen Ländern statt und die Fertigungshallen sind nicht klimatisiert.

Tabelle 1: Anforderungen an das zu entwickelnde Messgerät.

| Parameter | Relevanter Bereich | Abgeleitete Anforderung |
|--------------------------------|---|--|
| Temperatur | 10°C – 40 °C | Alle Gerätekomponenten (Hardware, Elektronik) müssen den Temperaturen standhalten, ein stabiler Betrieb muss gewährleistet sein. |
| Rel. Luftfeuchtigkeit | 30% rH- 85% rH | Alle Gerätekomponenten müssen der (schwankenden) Luftfeuchtigkeit standhalten, ein stabiler Betrieb muss gewährleistet sein. |
| Vibrationen | Vibrationen durch Schritte, zuschlagende Türen, Weiterverarbeitungsschritte des Bauteils, stärkere Vibrationen durch laufende Motoren/Kompressoren | Einfluss des Messsignals durch Vibrationen muss ausgeschlossen werden durch z.B. festen Tisch für das Messgerät, ruhigen Standort in Nähe der realen Fuge, oder Messkopfdesign zur Minimierung des Einflusses. Wenn nötig Entwicklung einer rechnerischen Bereinigung der Vibrationsbeeinträchtigungen |
| Zugluft | Möglich durch z.B. offene Tore | Messung darf durch Zugluft nicht beeinflussbar sein oder der Einfluss muss verhindert werden durch z.B. Einhausung der Messkammern |
| Messgeschwindigkeit/-intervall | Aushärtung erfolgt in der Regel über Stunden bis Wochen, interessante Bereiche z.B. Verarbeitungszeit bewegen sich i.d.R. zwischen 5 min und mehreren Stunden, Shore A 30 ist typischerweise nach Stunden bis Wochen erreicht | Messung alle 5 Minuten wäre ausreichend, jede Minute ist anzustreben (im Verlauf sind weniger häufige Messungen notwendig) |

| | | |
|-------------------------------|---|---|
| Messgenauigkeit und Auflösung | Die Aushärtung muss über ein sich veränderndes Ultraschallsignal zuverlässig abgebildet werden können | Es müssen reproduzierbare, differenzierbare Messsignale erzeugt werden, welche einen zeitlichen Verlauf der Aushärtung der Dichtmassen kennzeichnen. Je nach Änderung der Schallgeschwindigkeit im zeitlichen Verlauf muss ggf. die Auflösung optimiert werden. |
| Material-schrumpf | Maximal 2% bei Lösungsmittelfreien Dichtstoffen von Chemetall | Höhe der Form sollte Schrumpf berücksichtigen, damit der Ultraschall zu jeder Zeit durch das Vollmaterial geht |

Materialauswahl:

Als Material wurden in Absprache mit der Firma Chemetall zwei Polysulfid-basierte Dichtungsmassen ausgewählt. Diese kommen in unterschiedlichen Ausführungen an unterschiedlichen Stellen im Flugzeugbau zum Einsatz. Sie zeichnen sich durch ihre chemische Beständigkeit, Elastizität bei hohen und niedrigen Temperaturen und einer einfachen Verarbeitungsfähigkeit aus. Außerdem haften sie auf unterschiedlichen Substraten, bieten Korrosionsschutz im Einsatzbereich und verfügen über einen „Selbsteheilungseffekt“, welcher die Verbindung der neu aufgetragenen mit der alten Dichtmasse im Reparaturfall bezeichnet.

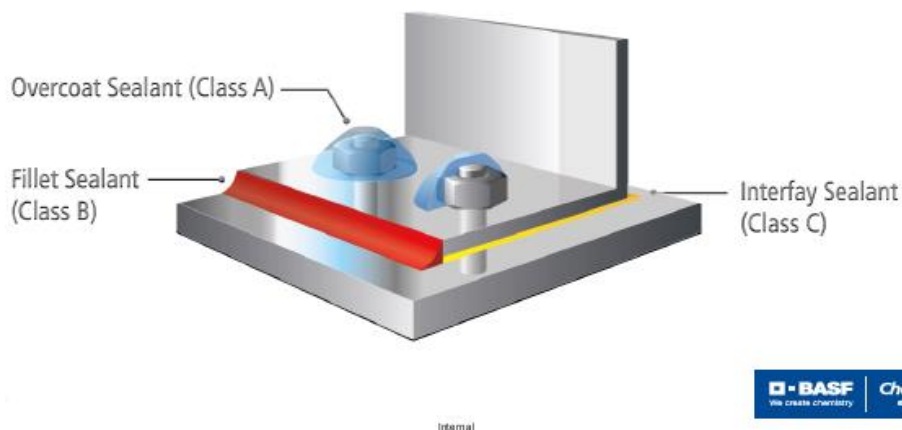


Abbildung 6: Klassifikation der Dichtmassen gemäß dem Anwendungsbereich in die Klassen A, B und C. Quelle: Chemetall Kundenpräsentation.

Die Klassifikation der Dichtmassen erfolgt gemäß dem Anwendungsbereich in die Klassen A, B und C (siehe Abbildung 6). Mengenmäßig am meisten werden Dichtungsmassen der Klasse B zum Füllen von Fugen, zur Kantenabdichtung und zum aerodynamischen Glätten im Flugzeugbau verwendet (70-80% der verwendeten Dichtmassen laut Chemetall). Für das Projekt wurde daher die Dichtungsmasse Naftoseal MC-780 B-1/2 ausgewählt. Des Weiteren stellen die Dichtungsmassen der Klasse C eine besondere Herausforderung in Bezug auf die Überwachung der Aushärtung dar. Sie werden in den Zwischenlagen der Bleche sehr dünn aufgerollt und sind am schwierigsten zu kontrollieren. Daher soll als zweite Dichtungsmasse das Produkt Naftoseal MC-780 C-4 untersucht werden.

Als drittes Produkt eines anderen Herstellers wurde die Dichtmasse PR-1782 B1/2 von PPG ausgewählt. Dabei handelt es sich um eine ebenfalls Polysulfid-basierte, häufig im Flugzeugbau (u.a. zur Tankabdichtung) eingesetzte Dichtmasse. Verarbeitungs- und Aushärtezeiten für alle drei Dichtmassen sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 zu finden.

| Verarbeitungs- und Aushärtezeiten bei 23°C / 50% r.F. | | | |
|---|------------------------|------------------------------|---------------------|
| Type | Min. Verarbeitungszeit | Klebefreie Zeit | Zeit bis Shore A 30 |
| Naftoseal® MC-780 B-1/2 | 30 Minuten | ≤ 4 Stunde | ≤ 8 Stunden |
| Type | Min. Verarbeitungszeit | Erweiterte Verarbeitungszeit | Zeit bis Shore A 30 |
| Naftoseal® MC-780 C-4 | 4 Stunden | 6 Stunden | ≤ 30 Stunden |

Abbildung 7: Spezifikationen zur Verarbeitung der ausgewählten Dichtmassen der Firma Chemetall. Quelle: TDS der Dichtmassen, Chemetall.

| Application life and cure time @ 25°C (77°F), 50% RH | | | |
|--|--------------------------|------------------------|--|
| | Application life (hours) | Tack free time (hours) | Cure time to 35 Shore A* Durometer (hours) |
| B-1/2 | 1/2 | <5 | 7 |

* Per AS5127/1B Test Method

Abbildung 8: Spezifikationen zur Verarbeitung der ausgewählten Dichtmasse PR-1782 B1/2 der Firma PPG. Quelle: TDS der Dichtmasse, PPG.

2.1.2 AP 1.2 Materialbeschaffung und Probenherstellung

Für die Probenherstellung wurden die Dichtungsmassen Naftoseal MC-780 B-1/2 und Naftoseal MC-780 C-4 vom assoziierten Partner Chemetall zur Verfügung gestellt. Hiermit wurden erste Probekörper für Referenzmessungen und auch für Messungen mit dem bestehenden Ultraschallsystem hergestellt. Die dritte Dichtmasse vom Hersteller PPG wurde beschafft, erste Untersuchungen stehen noch aus.

Probekörper für Referenzuntersuchungen:

Für Referenzmessungen werden Shore A Härtemessungen durchgeführt. Diese Messungen entsprechen dem aktuellen Stand der Technik in der Luftfahrt um den Zeitpunkt der möglichen Weiterverarbeitung von Bauteilen zu ermitteln. Für diese Messungen werden im Projekt Probekörper aus Teflon mit einer Tiefe von 8 mm und einer Größe von 4 cm x 4 cm hergestellt und verwendet (Abbildung 9).

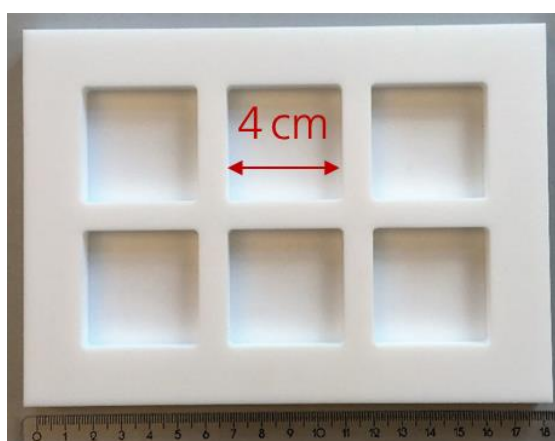


Abbildung 9: Probekörper aus Teflon zur Herstellung von Shore A Härte –Proben (links) und verwendetes Shore A Härtemessgerät digi test II der Firma Bareiss (rechts).

Herstellung der Probekörper für Messungen mit dem bestehenden Messsystem:

Für erste Untersuchungen mit dem bestehenden Ultraschallmesssystem wurden die beiden Dichtmassen in die Standardmesskammern (Volumen von 45 ml, Abstand Sender zu Empfänger 20 mm) appliziert.

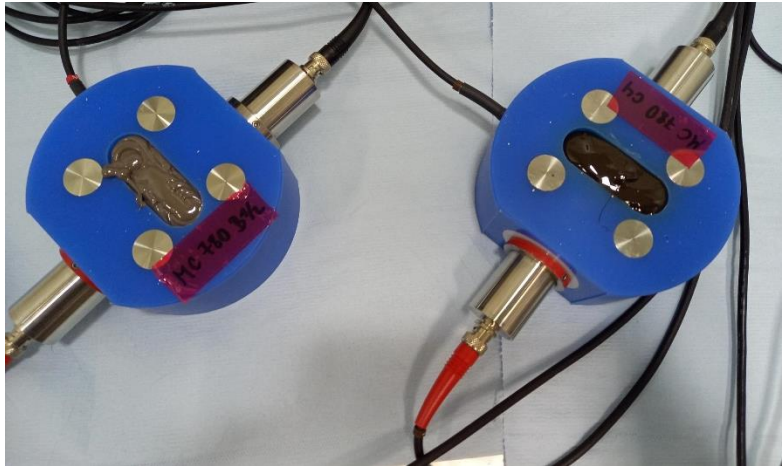


Abbildung 10: Applizierte Dichtmassen (MC 780 B1/2 links, MC 780 C4 rechts) in den Standardmesskammern des bestehenden Ultraschallmesssystems .

2.1.3 Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die in HAP1 festgelegte Bestimmung der Anforderung und Rahmenbedingungen wurden erfolgreich durchgeführt. Dabei wurden die Anforderungen an das Messsystem, die Definition der späterer Einsatzgebiete, die Bestimmung der zu untersuchenden Oberflächen ebenso wie die zu untersuchenden Bauteilgeometrien erfolgreich bearbeitet. Ebenso wurden Proben hergestellt.

2.2 HAP 2 Probenherstellung / Haftungstest

Für das HAP 2 ist das IFAM verantwortlich, es ist in drei Arbeitspakete (AP 2.1, AP 2.2 und AP 2.3) gegliedert. Im Fokus des HAP 2 stehen Versuche zur Aushärtecharakteristik der in HAP 1 festgelegten Materialien. Im vorliegenden Berichtszeitraum wurde mit den Arbeiten in AP 2.1 begonnen.

In HAP 2.1 werden Hilfe der Ultraschallmesstechnik zusammen mit dem IFAM Messungen an den in HAP 1 festgelegten Dichtmassen durchgeführt. Anhand der ausgewerteten Ergebnisse lassen sich in Kombination mit den Ergebnissen aus AP 2.2 später z. B. Maßnahmen für die Weiterentwicklung ableiten.

2.2.1 AP 2.1 Test bestehendes System mit ausgewählten Materialien

Mit dem bestehenden Ultraschallmesssystem wurden erste Messungen gemeinsam mit dem Fraunhofer IFAM mit den Dichtmassen Naftoseal MC-780 B-1/2 und Naftoseal MC-780 C-4 durchgeführt. Hierzu wurde in einem Zeitraum von 14 Tagen die Laufgeschwindigkeit des Ultraschalls (ein Impuls von je ca. 4 ns Pulsbreite) jede Minute gemessen. Gleichzeitig wurde die Temperatur in der Messkammer aufgezeichnet. In Abbildung 11 ist das verwendete Mess-Setup zu sehen.

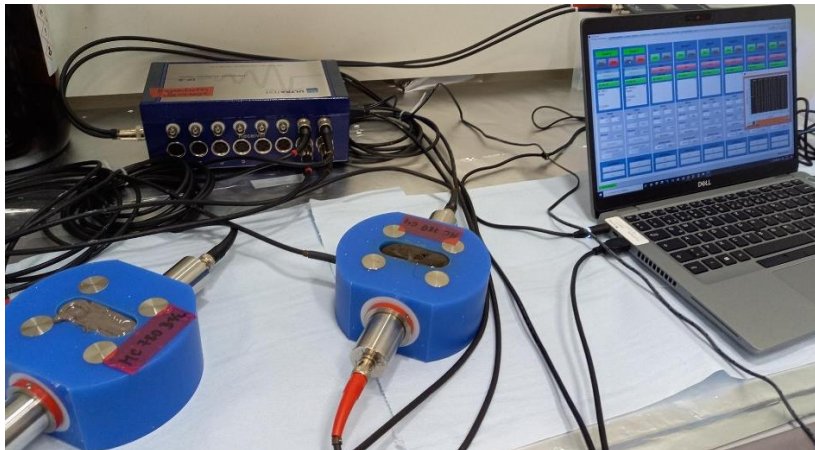


Abbildung 11: Setup des bestehenden Ultraschallmesssystems für erste Messreihen an den ausgewählten Dichtmassen.

Aus diesen Messungen über 14 Tage konnten die in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellten Daten ermittelt werden. Für beide Dichtmassen ist ein Anstieg der Schallgeschwindigkeit innerhalb der ersten ca. 24 h zu beobachten. Die anschließenden Änderungen der Schallgeschwindigkeit sind durch die Temperaturschwankungen und die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur zu erklären. Um Schwankungen des Messsignals aufgrund des Temperatureinflusses für zukünftige Messungen deutlich von der Änderung des Messsignals durch die Aushärtereaktion zu trennen, ist eine rechnerische Bereinigung der Schallgeschwindigkeit um diesen Temperatureinfluss möglich. Als Grundlage für diese rechnerische Bereinigung sind Messungen der ausgehärteten Dichtmassen bei unterschiedlichen Temperaturen im Klimaschrank notwendig. Diese Ergebnisse einschließlich mathematischer Korrektur des Ultraschallsignals werden nachfolgend gezeigt.

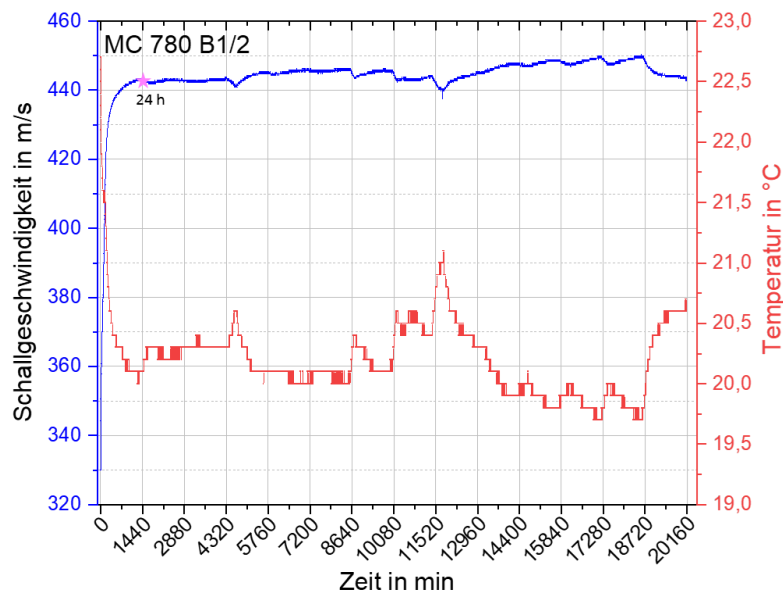


Abbildung 12: Ergebnis der Messung der Schallgeschwindigkeit sowie der Temperatur über einen Zeitraum von 14 Tagen mit dem bestehenden Ultraschallsystem für die Dichtmasse MC 780 B1/2.

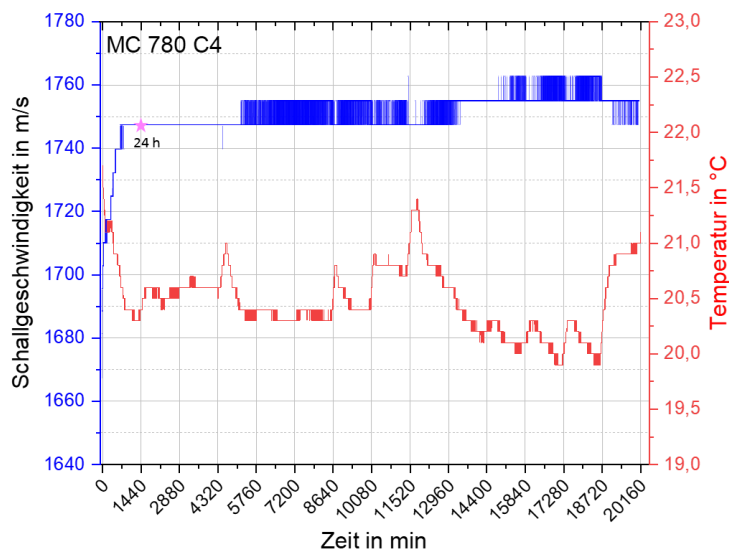


Abbildung 13: Ergebnis der Messung der Schallgeschwindigkeit sowie der Temperatur über einen Zeitraum von 14 Tagen mit dem bestehenden Ultraschallsystem für die Dichtmasse MC 780 C4.

Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen für die beiden Dichtmassen den zeitlichen Verlauf der Schallgeschwindigkeit und der Temperatur für die ersten 24h. Dieser Zeitraum ist für die Verarbeitung einer Dichtmasse besonders interessant. Zusätzlich sind die aus dem Technischen Datenblatt entnommenen Kennwerte im zeitlichen Verlauf markiert.

Für die Dichtmasse MC 780 B1/2 ist in den ersten ca. 8 h ein deutlicher Anstieg der Schallgeschwindigkeit sowie eine Abnahme der Temperatur zu beobachten. Beim Anmischen dieser 2-komponentigen Dichtmasse kommt es zu einer Wärmeentwicklung, daher ist im zeitlichen Verlauf anschließend eine Abkühlung zu beobachten. Im weiteren Verlauf (in Abbildung 12 zu sehen) sind die Temperaturschwankungen auf die Schwankungen der Temperatur im Labor (z.B. Tag/Nacht) zurückzuführen. Die drei aus dem Technischen Datenblatt entnommenen Kennwerte für diese Dichtmasse (vgl. Abbildung 7) lassen sich eindeutig über die Schallgeschwindigkeit differenzieren.

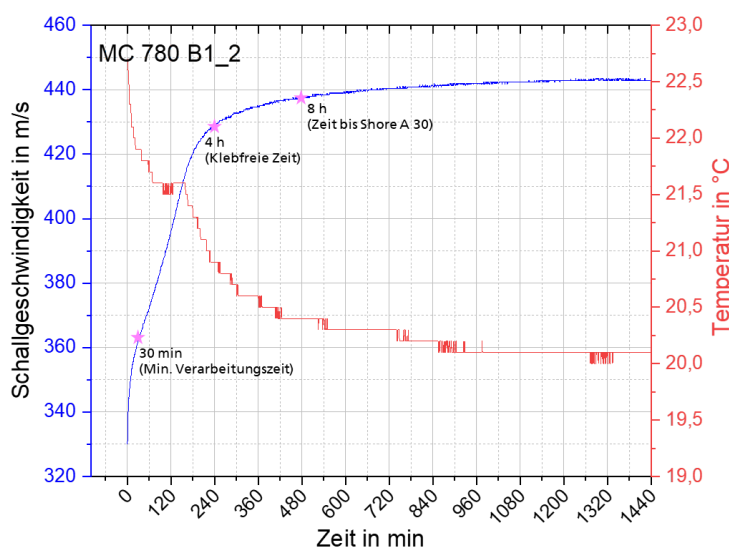


Abbildung 14: Ergebnis der Messung der Schallgeschwindigkeit sowie der Temperatur über einen Zeitraum von 24 Stunden mit dem bestehenden Ultraschallsystem für die Dichtmasse MC 780 B1/2.

Für die Dichtmasse MC 780 C4 ist für die ersten ca. 12 h ein Anstieg der Schallgeschwindigkeit zu beobachten. Die beiden aus dem Technischen Datenblatt entnommenen Kennwerte bei 4 h und 6 h sind mit dem aktuellen Auflösungsvermögen des Messgeräts nicht eindeutig voneinander zu unterscheiden. Insgesamt ist für den zeitlichen Verlauf aber auch für diese Dichtmasse eine deutliche Veränderung der Schallgeschwindigkeit zu beobachten. Aus diesen Messergebnissen lässt sich klar der Bedarf für eine Weiterentwicklung der Messmethode zum Erreichen einer höheren Auflösung bei der Messung der Schallgeschwindigkeit ableiten. Durch eine höheraufgelöste Messung ließen sich erwartungsgemäß auch für die Dichtmasse MC 780 C4 differenzierte Aussagen über den Aushärtungsfortschritt machen.

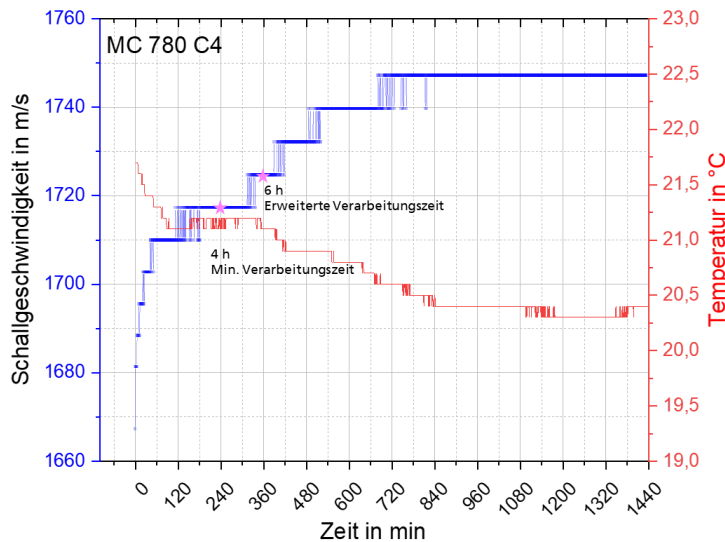


Abbildung 15: Ergebnis der Messung der Schallgeschwindigkeit sowie der Temperatur über einen Zeitraum von 24 Stunden mit dem bestehenden Ultraschallsystem für die Dichtmasse MC 780 C4.

Diese ersten Messungen mit dem bestehenden Ultraschallsystem zeigen das große Potential der Messmethode zur produktionsbegleitenden Detektion unterschiedlicher Aushärtefortschritte in der kritischen ersten Phase nach der Dichtmassenapplikation. Gleichzeitig wird deutlich, dass technische Entwicklungen notwendig sind, da Aushärtungsreaktionen von Polymeren im Vergleich zu (bisher hauptsächlich mit dem System untersuchten) anorganischen Abbindeprozessen geringere Einflüsse auf die Schallgeschwindigkeit haben. Um diese geringeren, aber deutlich vorhandenen Änderungen der Schallgeschwindigkeit abbilden zu können ist eine Erhöhung der Auflösung nötig (siehe HAP 3).

Im Folgenden werden weitere Ergebnisse mit genaueren Untersuchungen für die Dichtmassen MC 780 B½ und MC 780 C4 nacheinander aufgeführt. Darüber hinaus auch noch für eine dritte Dichtmasse von PPG:

MC780 B½

Eine beispielhafte Messung bei schwankender Umgebungstemperatur mit MC 780 B½ ist in Abbildung 16 zu sehen. Die aufgeführte Messgröße ist hier die Schallgeschwindigkeit, die aus der Laufzeit des Ultraschallpulses berechnet wird – bei bekanntem Messabstand. Hier ist zu sehen, dass die Schallgeschwindigkeit innerhalb der ersten 4-6 Stunden ansteigt und danach in ein Plateau übergeht, welches jedoch Schwankungen unterlegen ist. Der Anstieg der Schallgeschwindigkeit zu Beginn ist durch die Aushärtung des Materials bedingt. Die Schwankungen im Messsignal sind durch eine Änderung in der Dichtmassentemperatur bedingt. Dies fällt beim Abgleich der Schallgeschwindigkeit mit der Messung der Temperatur auf (siehe Abbildung 16).

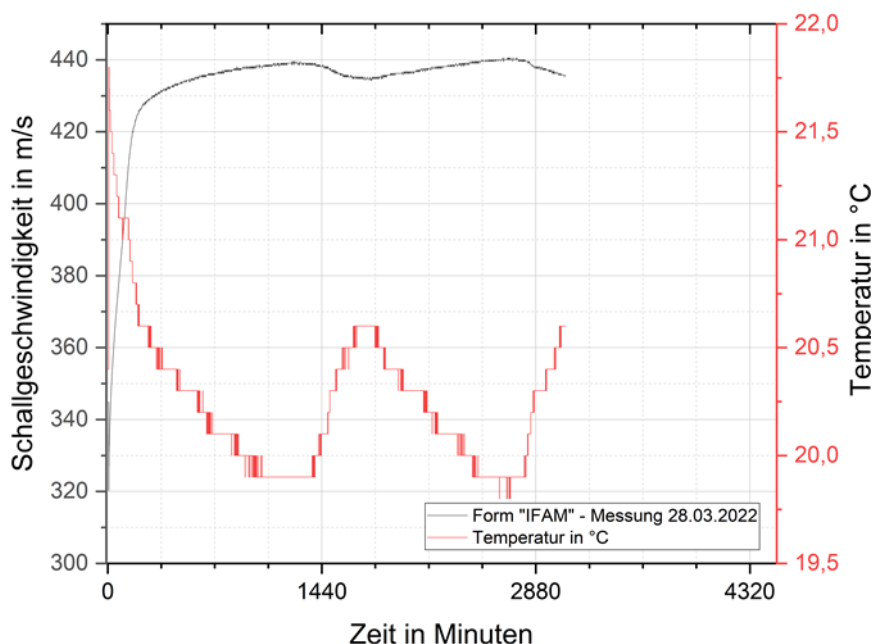


Abbildung 16: Dargestellt ist eine Messung von MC780 B½ mit bestehendem Ultraschallsystem über 2 Tage. Durch die Aushärtung ist eine Veränderung der Schallgeschwindigkeit zu erkennen. Die Schallgeschwindigkeit ist zudem Schwankungen bei Temperaturänderungen unterlegen.

Zur genaueren Untersuchung des Temperatureinflusses der Ultraschallmessung wurden ausgehärtete Dichtmassenproben von MC 780 B½ in der Ultraschallform im Klimaschrank bei variierender Temperatur gemessen. In Abbildung 17 sieht man die Messergebnisse. Hier sieht man in dem markierten untersuchten Bereich ein Abfall der Schallgeschwindigkeit bei steigender Dichtmassentemperatur. Das Rauschen, welches auf der Schallgeschwindigkeit ist, wird vom Kompressor des Klimaschranks verursacht, da die Ultraschallmessung anfällig gegenüber mechanischer Vibrationen ist.

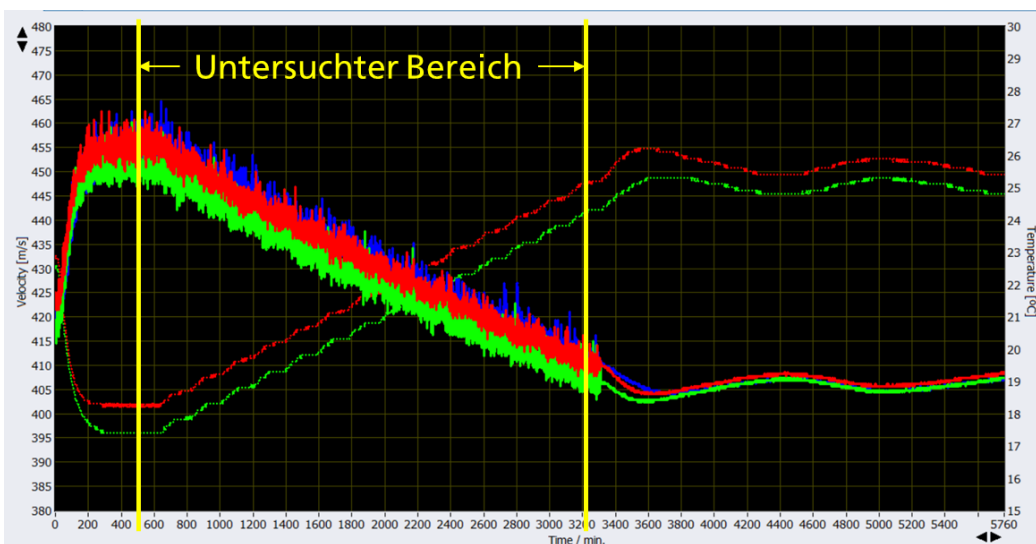


Abbildung 17: Messdaten der Schallgeschwindigkeit und Dichtmassentemperatur während einer Auslagerung im Klimaschrank. Bei steigender Temperatur ist ein Abfall in der Schallgeschwindigkeit zu erkennen.

Für den markierten Bereich wurden nun die Schallgeschwindigkeit und zugehörige Temperatur an jedem Messpunkt gegeneinander aufgetragen (s. Abbildung 18), um die Abhängigkeit zwischen beiden Größen zu untersuchen und somit den Temperatureinfluss der Ultraschallmessung zu kompensieren. Dort ist eine lineare Abhängigkeit zu erkennen, weswegen ein linearer Fit der Daten durchgeführt wurde. Durch die gute Korrelation der Daten ($R^2=0,98$) besteht eine gute Abbildung der gefitteten Kurve zu den realen Messdaten. Mithilfe der ermittelten Steigung

und des y-Achsenabschnitts lässt sich nun die Temperaturkompensation der realen Messdaten durchführen.

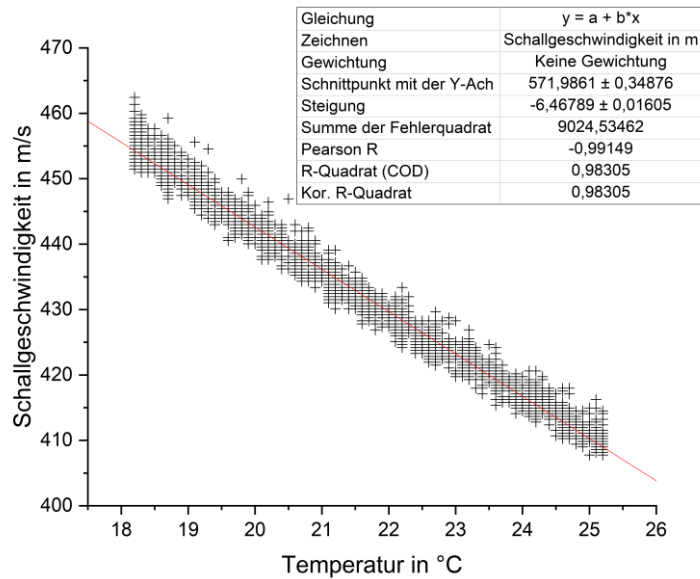


Abbildung 18: Bestimmung der Kalibrierungsgeraden für die Temperaturkompensation für MC780 B $\frac{1}{2}$. Aufgetragen wurde die Schallgeschwindigkeit gegenüber der passenden Dichtmasstemperatur.

In Abbildung 19 ist einmal der Vergleich zwischen der gemessenen Schallgeschwindigkeit und der anschließenden Temperaturkompensation zu sehen. Bei der Temperaturkompensation wurde eine konstante Temperatur von 21° festgelegt. Anschließend wurden die Temperaturunterschiede zu jedem Zeitpunkt bestimmt und die daraus resultierende Änderung der Schallgeschwindigkeit mit der Kalibriergeraden aus Abbildung 18 berechnet. Man erkennt deutlich, dass die Schwankungen, die durch den täglichen Warm-Kalt-Zyklus bedingt sind kompensiert werden können.

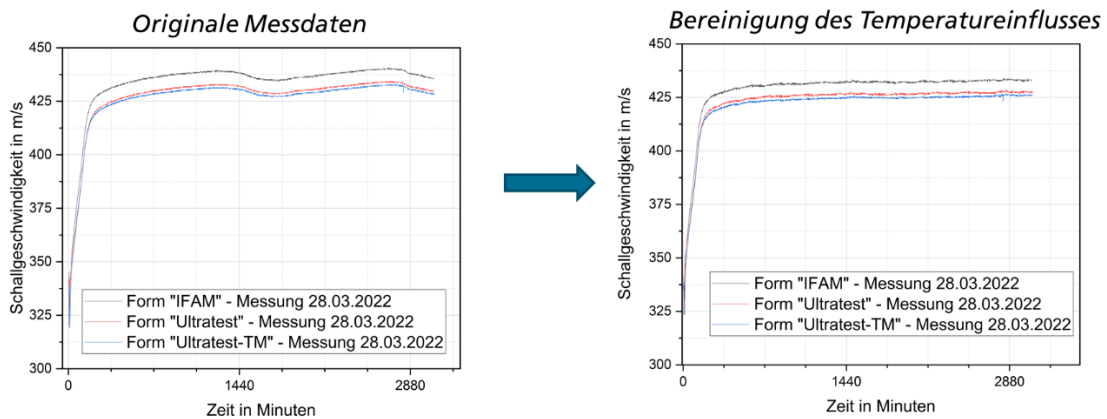


Abbildung 19: Kompensation des Temperatureinflusses der Ultraschallmessung. Links: Originale Messung, rechts: Schallgeschwindigkeitsdaten mit Kalibrierfaktor aus Abbildung 18.

In Abbildung 20 sind mehrere Messungen von unterschiedlichen Zeitpunkten mit der Dichtmasse MC 780 B $\frac{1}{2}$ dargestellt. Man erkennt, dass der Verlauf der Aushärtung bei allen Kurven reproduzierbar ist. Der erreichte Endwert unterliegt einer Schwankung von 2-3%. Die Messungen er Dichtmasse MC 780 B $\frac{1}{2}$ sind demnach reproduzierbar mit dem bestehenden IP8-System möglich.

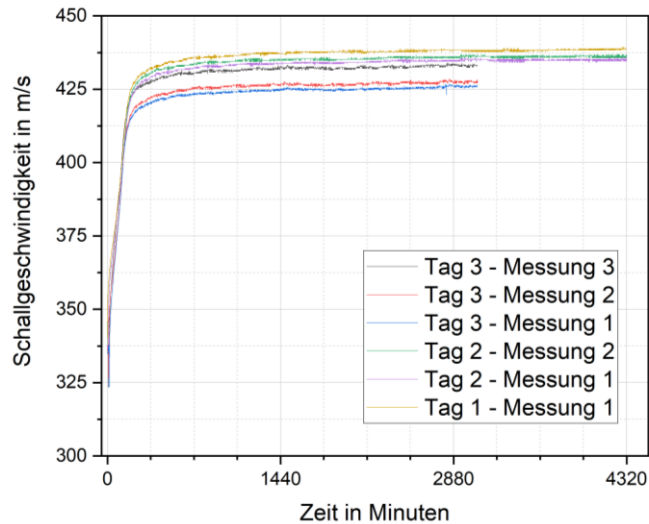


Abbildung 20: Darstellung mehrerer Messungen von MC780 B $\frac{1}{2}$. Die Kurven der Schallgeschwindigkeit zeigen eine gute Reproduzierbarkeit zwischen verschiedenen Messungen unterschiedlicher Versuchsreihen.

MC780 C4

Mit der Dichtmasse MC 780 C4 wurden ebenfalls Messungen in der bestehenden Ultraschallform durchgeführt. Eine Übersicht über den ersten Tag der Messung von vielen Messungen ist in Abbildung 21 zu sehen. Hier sind generell zwei unterschiedliche Kurvenverläufe zu sehen. Im ersten Verlauf steigt das Signal unmittelbar nach Applikation der Dichtmasse in die Form auf eine hohe Schallgeschwindigkeit von ungefähr 1700nm an und bleibt anschließend konstant. Hier ist kein Kurvenverlauf zu erkennen, der auf eine Aushärtung des Dichtmassenmaterials hindeutet. Im zweiten Fall steigt die Schallgeschwindigkeit stetig über mehrere Stunden an, bis Sie nach ungefähr 12 Stunden (720 Minuten) in eine Sättigung geht. Dieses Kurvenverhalten deutet auf eine Aushärtung der Dichtmasse hin. Weiterhin fällt auf, dass ein Offset zwischen den unterschiedlichen teils gleichzeitig aufgenommenen Messungen besteht, jedoch ist der Kurvenverlauf identisch.

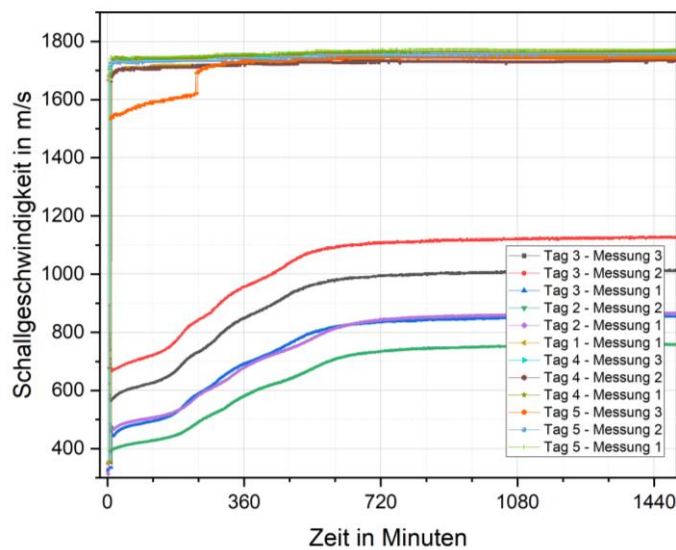


Abbildung 21: Messungen der Dichtmasse MC 780 C4 innerhalb 1 Tages. Zwei unterschiedliche Kurvenverläufe sind zu sehen.

Zur genaueren Untersuchung der unterschiedlichen Kurvenverläufe sieht man einmal in Abbildung 22 die aufgenommenen Ultraschallsignale am Empfänger. Die Zeit bis zum ersten Ausschlag am Empfänger ist die Laufzeit, aus der sich die Schallgeschwindigkeit berechnet. Diese wird von dem System automatisch bestimmt, indem die Zeit bei dem ersten Signalanstieg über den Schwellwert von 2V ermittelt wird. In Abbildung 22 wurden zu zwei Zeitpunkten die Ultraschallsignale von zwei Messungen mit unterschiedlichen Verläufen dargestellt. Betrachtet man die Laufzeit, so erkennt man bei den Messungen mit hoher Schallgeschwindigkeit (oben) keine Veränderung in der Laufzeit, während bei der Messung mit veränderter Schallgeschwindigkeit (unten) das Signal am Empfänger wandert und sich dementsprechend Laufzeit und Schallgeschwindigkeit ändern. Alle Messungen sind sehr rauscharm und es gibt keine Fehlersignale vor dem eigentlichen Messsignal, weshalb ein Einfluss des Ultraschallgerätes auf die unterschiedlichen Kurvenverläufe ausgeschlossen werden kann. Umgebungsparameter, wie Einfluss beim Applizieren (Mensch, Luftdruck der Kartuschenspritze), Einfluss von Luftblasen oder der Umgebungsbedingungen wurden ebenfalls untersucht. Bisher ist die Ursache in den unterschiedlichen Verläufen leider ungeklärt. Weitere Untersuchungen über den Einfluss des Materials auf die Ultraschallmessdaten folgen in Absprache mit dem assoziierten Partner Chemetall (siehe HAP 3).

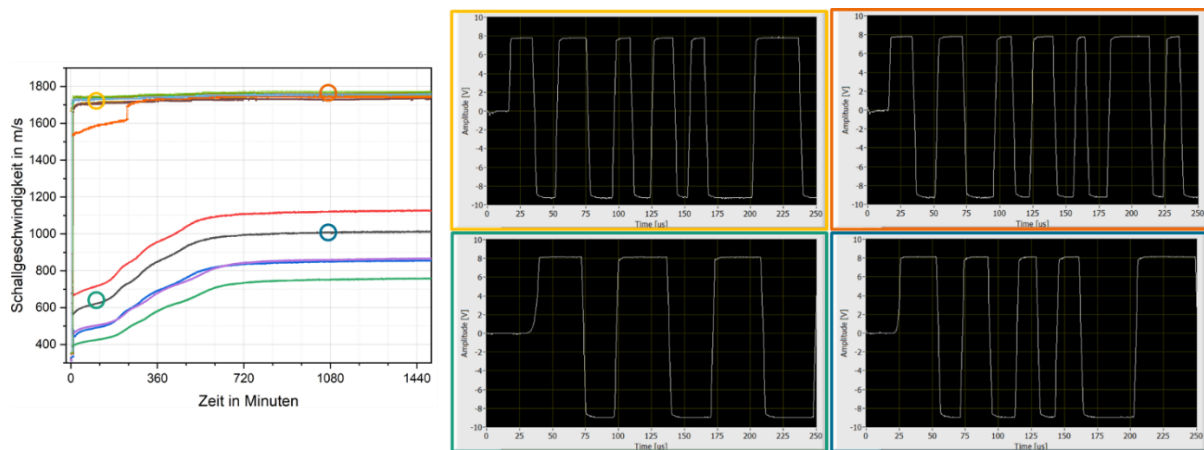


Abbildung 22: Darstellung der Ultraschallmessungen von MC 780 C4 (links). Für 2 unterschiedliche Aushärteverläufe sind die Ultraschallpulse zu zwei verschiedenen Zeitpunkten dargestellt (rechts).

Für den Kurvenverlauf mit hoher Schallgeschwindigkeit sind die Messungen sehr reproduzierbar. Jedoch wird hier kein Aushärteverhalten der Dichtmasse gemessen. Bei den Messungen der anderen Kurvenverläufe sieht man eindeutige Schwankungen in der Schallgeschwindigkeit. Da der Verlauf jedoch identisch aussieht, wurde sich in Folge die Ableitung dieser Messungen angeguckt. In Abbildung 23 ist die Ableitung neben der Schallgeschwindigkeit für fünf Messungen an zwei unterschiedlichen Tagen zu sehen. Hier erkennt man, dass die gemessene Schallgeschwindigkeit der blauen violetten und gelben Kurve deutlich auseinanderliegt, obwohl die Messungen zeitgleich am selben Tag stattgefunden haben. Wirft man jedoch einen Blick auf die Ableitung so fällt auf, dass sich in der Aushärtekurve drei Maxima wiederfinden, welche zeitlich reproduzierbar für alle drei Kurven übereinander liegen. Dasselbe ist auch bei der roten und grünen Kurve zu erkennen. Vergleicht man jedoch die Ableitungsdaten der Messungen von verschiedenen Tagen miteinander, stellt man fest, dass die Maxima der roten und grünen Messung gegenüber der anderen drei Messungen verschoben sind. Dennoch sind die Ableitungen der Messungen für die gleichen Messbedingungen an denselben Tagen sehr reproduzierbar messbar. Zudem ist ein eindeutiger Temperaturunterschied zwischen den Messungen der verschiedenen Tage zu erkennen, welcher eine plausible Ursache der Verschiebung des Maximums darstellt. Unterschiedliche Umgebungstemperaturen führen bekanntlich zu unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten, welche in der Ableitung der Schallgeschwindigkeit abgebildet werden.

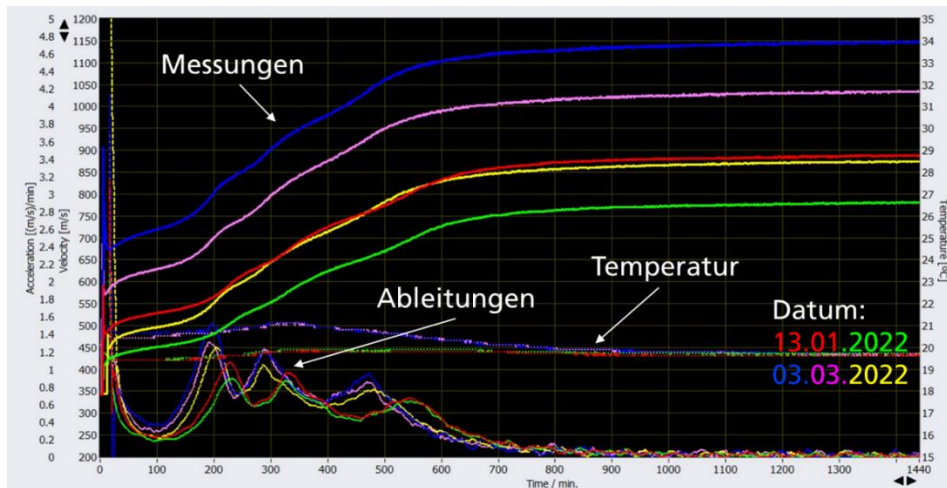


Abbildung 23: Schallgeschwindigkeit von 5 Messzeitpunkten ist zusammen mit der Ableitung und der Probentemperatur dargestellt. Die Messungen fanden zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen statt.

Um auszuschließen, dass der Unterschied in dem bereits bekannten Temperatureinfluss der Ultraschallmessung begründet ist, wurde auch für die Dichtmasse MC 780 C4 analog zu MC 780 B $\frac{1}{2}$ eine Temperaturkorrektur durchgeführt. In Abbildung 24 sind die Ableitungen von 2 Messungen an unterschiedlichen Tagen nach der Temperaturkorrektur aufgeführt. Wie zu erkennen ist, sind die Maxima der Ableitungen zwischen beiden Messungen nach wie vor verschoben. Der Unterschied ist demnach durch einen anderen Einfluss bedingt, z. B. durch die Temperaturabhängigkeit des Aushärtungsverlauf der Dichtmasse. Dieser Einfluss ist demnach mit der Ultraschalltechnik gut messbar.

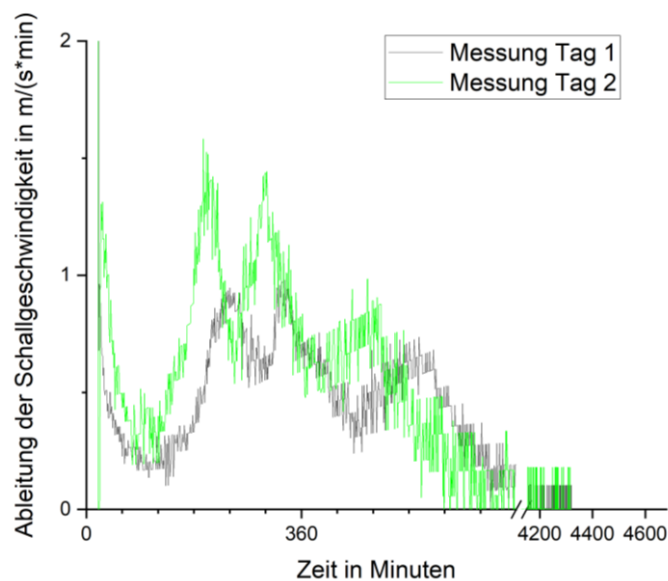


Abbildung 24: Darstellung der Ableitung der Schallgeschwindigkeit von zwei unterschiedlichen Messzeitpunkten mit unterschiedlicher Umgebungstemperatur. Die Maxima der Kurven sind zueinander verschoben.

PPG PR 1782 B $\frac{1}{2}$

Zusätzlich zu den Dichtmassensystemen vom assoziierten Partner Chemetall wurde die Dichtmasse PR PR1782 B $\frac{1}{2}$ von dem Hersteller PPG untersucht. Messungen hiervon sind in Abbildung 25 zu finden. Diese Dichtmasse zeigt ähnlich wie die Dichtmasse MC780 B $\frac{1}{2}$ ein sehr reproduzierbares Verhalten in der Messung der Schallgeschwindigkeit während der Aushärtung.

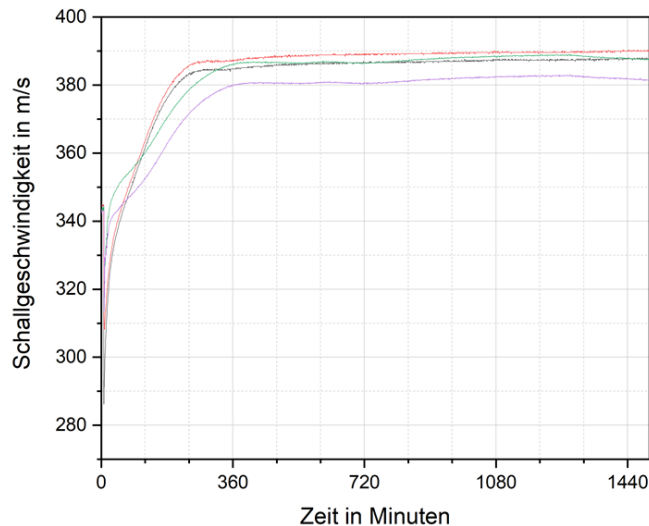


Abbildung 25: Mehrere Messungen der Dichtmasse PPG PR1782 B $\frac{1}{2}$ mit dem bestehenden Ultraschall-System.

Systemanpassungen

Die Messungen von MC780 B $\frac{1}{2}$, ebenso wie PR1782 B $\frac{1}{2}$ zeigen eine gute Reproduzierbarkeit des Systems. Nachfolgend wird in AP 3.1 die Ultraschallform so angepasst, dass ein kleinerer Messabstand gewählt wird, um die Messung an die Zielgeometrie von höchstens 8 mm anzupassen.

Die Messungen von MC780 C4 zeigen eine gute Reproduzierbarkeit in der Ableitung. Um eine genaue Kurve der Ableitung zu bekommen ist wiederum eine gute Auflösung der Schallgeschwindigkeit – und damit der gemessenen Laufzeit – nötig. Daher soll diese noch verbessert werden, um die Reproduzierbarkeit der Aushärtung auch bei kleineren Messabständen zu gewährleisten, wenn die Laufzeitunterschiede noch geringer werden.

2.2.2 Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

In HAP2 wurden erfolgreich Messungen an allen Dichtmassen mit dem bestehenden System von UltraTest durchgeführt. Hierbei wurde der Einfluss der Umgebungstemperatur bestimmt, ebenso wie notwendige Modifizierungen des Ultraschallsystems, wie etwa die Verbesserung der zeitlichen Auflösung, abgeleitet.

2.3 HAP 3 Weiterentwicklung Messsystem

Das HAP 3 ist in zwei Arbeitspakete (AP 3.1 und AP 3.2) gegliedert und wird ausschließlich von UltraTest bearbeitet. In HAP 3 führt UltraTest die Weiterentwicklung des Ultraschallmessgerätes für die Anwendung zur Aushärteüberwachung von Dichtmassen durch.

Im AP 3.1 steht die Anpassung der Messzelle im Vordergrund. Dabei soll die Messzelle an die vorgegebenen Geometrien der Realfuge angepasst werden bei realistischen Kontaktflächen mit der Luft. Ziel ist eine optimale Korrelation der Messung mit der realen Applikation herzustellen, um eine produktionsbegleitende Qualitätskontrolle der Aushärtung sicherstellen zu können. Nur so kann eine gute Korrelation mit dem Aushärteverlauf in der tatsächlichen Dichtfuge gewährleistet werden.

In AP 3.2 führt UltraTest Anpassungen an den Ultraschallkomponenten (Messfrequenzen, Geometrien, Piezoelement und zeitliche Auflösung, sowie Messdatenauswertung) durch, mit dem Ziel, die auszuwertenden Signale zu optimieren. Mit diesen Anpassungen sollen optimierte Messergebnisse in Bezug auf den Aushärteverlauf der Dichtmassen erzielt werden.

2.3.1 AP 3.1 Auslegung und Anpassung Messzellen

In HAP 1 wurden die Geometrien von Realfugen eines möglichen Einsatzgebietes der neuen Technik in Absprache mit dem assoziierten Partner Chemetall getroffen. Diese sind in Abbildung 5 dargestellt. Auf Basis dieser Geometrien wurden nun Messzellen hergestellt, mithilfe derer sich die Ultraschallmessung mit einem Messabstand durchführen lässt, der vergleichbar mit der Fugenbreite der gewählten Geometrien ist. Der Einstellbereich sollte demnach zwischen 2 und 20mm liegen. Zudem sollte das Material der Messzelle eine niedrige Schallgeschwindigkeit besitzen, um einen akustischen Kurzschluß durch die Messvorrichtung zu vermeiden. Als Material wurde Dubliersilikon verwendet, um leichte Handhabung und Reinigung zu gewährleisten. Diese angepassten Messzellen sind in Abbildung 26 zu sehen. Hier erkennt man, dass die Messzelle 3 Öffnungen besitzt. Eine, um die Dichtmasse von oben in die Form zu applizieren und jeweils zwei an den Seiten für die Schallköpfe. Die Schallköpfe werden auf einer Schiene aufgelegt, mithilfe welcher der Abstand zwischen den Schallköpfen eingestellt und fixiert werden kann.

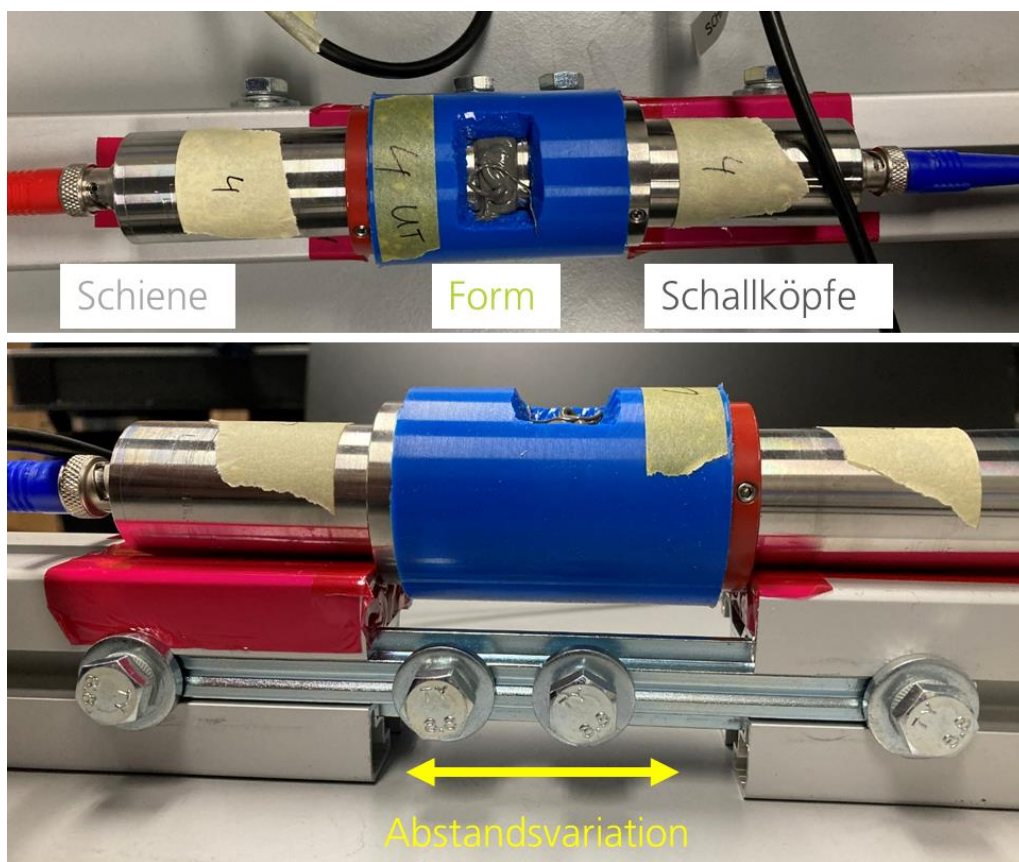


Abbildung 26: Darstellung der angepassten Messzellen. Die Form hat eine Öffnung zum Befüllen und je eine für Ultraschallsender und Empfänger. Der Messabstand zwischen den Schallköpfen kann variiert werden. Diese werden dabei auf einer Schiene fixiert.

Mit dieser angepassten Messzelle wurden nun Messungen mit den gewählten Dichtmassen MC780 B $\frac{1}{2}$ und MC780 C4 durchgeführt. Die Ergebnisse hiervon sind in Abbildung 27 und Abbildung 28 zu sehen. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit den Ergebnissen in den bestehenden Formen (vgl. AP 2.1). Die absoluten Werte der Schallgeschwindigkeit sind in den angepassten Messzellen etwas höher, die Kurvenverläufe werden allerdings genauso abgebildet, wie in den bestehenden Messzellen. Hierdurch lässt sich der Aushärtezustand in diesen angepassten Messzellen ebenso gut abbilden, wie in den bestehenden Messzellen, wobei bei den angepassten Messzellen die Geometrie mit den Realfugen übereinstimmt.

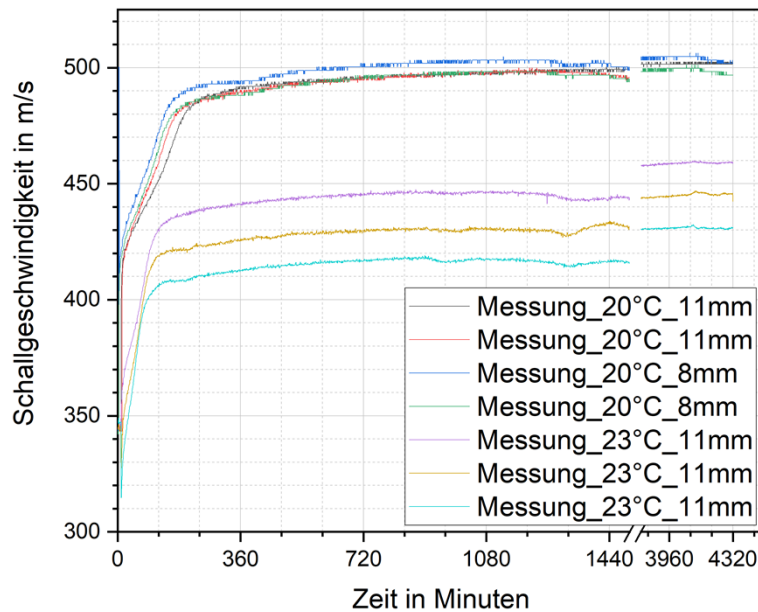


Abbildung 27: Messungen der Dichtmasse MC780 B $\frac{1}{2}$ mit der angepassten Messzelle. Man erkennt einen reproduzierbaren Verlauf. Die Schallgeschwindigkeit stimmt mit unterschiedlichen Messungen dergleichen Temperatur überein.

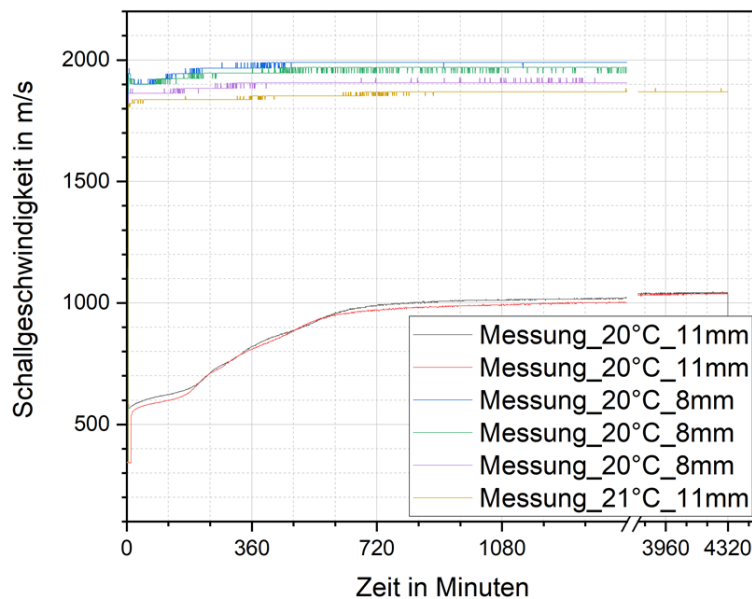


Abbildung 28: Messungen der Dichtmasse MC780 C4 mit der angepassten Messzelle. Man erkennt Messungen mit unterschiedlichen Aushärteverläufen, wie bei der bestehenden Form. Die Schallgeschwindigkeit zeigt innerhalb desselben Kurvenverlaufs eine gute Reproduzierbarkeit.

2.3.2 AP 3.2 Anpassung und Optimierung Ultraschallkomponenten

Aus den Ergebnissen der Messungen der Dichtmassen in dem bisherigen Ultraschallsystem in AP 2.1 wurden notwendige Systemanpassungen abgeleitet. Hierbei sollten insbesondere – neben einer Anpassung der Messformen auf kleinere Abstände zwischen Sender und Empfänger – die Ultraschallkomponenten so optimiert werden, dass das die zeitliche Auflösung des Systems erhöht werden kann. Hierzu wurde ein Time of Flight (ToF)-Modul integriert, mit dem Zeitunterschiede sehr genau erfasst werden können. Der TDC7201 von Texas Instruments wurde für den Einsatz in Ultraschall-, Laser- und Radar-Entfernungsmessgeräten konzipiert, die Laufzeitmessverfahren nutzen. Der TDC7201 verfügt über zwei integrierte Zeit-zu-Digital-Wandler (TDW) mit einer internen Auflösung von bis zu 35 ps. Eine technische Skizze des Moduls ist in Abbildung 29 zu sehen.

TOF Modul: Aufbau und Anschluß

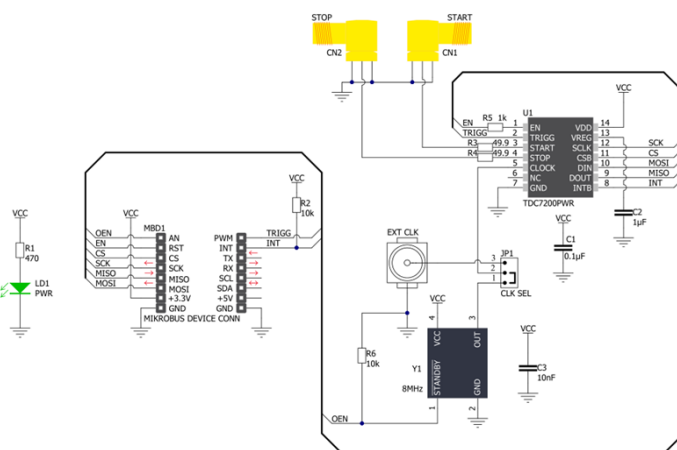


Abbildung 29: Technische Skizze des verwendeten ToF-Moduls. Alle Anschlüsse des Moduls sind hier hinterlegt.

Mit Hilfe der Leiterplatten- Entwicklungssoftware EAGLE wurde eine Aufsatzplatine entwickelt, um das ToF-Modul in einer modifizierten Empfängerplatine des IP-8 einsetzen zu können. Ein Foto der Platine, einschließlich der Integration und Positionierung im IP8-Ultraschallsystem sind in Abbildung 30 zu sehen. Das Bord-Layout der Platine sowie der Stromablaufplan sind in Abbildung 31 dargestellt.

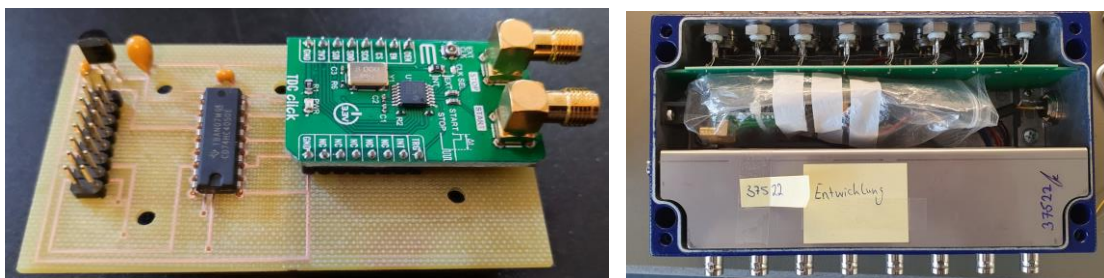


Abbildung 30: Links: Die Bordplatine des ToF-Moduls. Rechts: Ein aufgeschraubtes IP8-System. Oben und unten sind die Eingangskanäle von Ultraschallsender und Empfänger zu sehen. In der Mitte in der Plastiktüt ist das neu installierte ToF-Modul platziert.

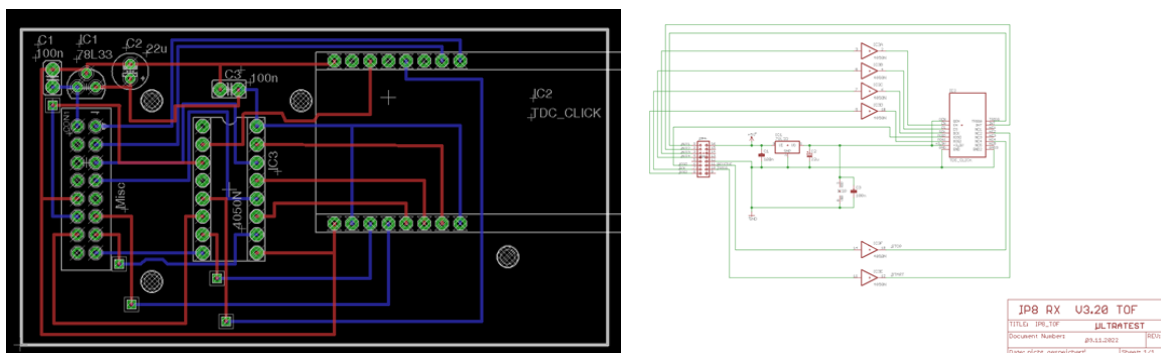


Abbildung 31: Zu sehen ist die Bord-Datei der Adapterplatine des ToF-Moduls (links), sowie der Stromablaufplan (rechts).

Durch die Integration des ToF-Moduls konnte die Auflösung des am Empfänger aufgenommenen Signals erhöht werden. Laut Projektplan war eine Erhöhung der zeitlichen Auflösung von 50 ns (20MHz) auf 10 ns (100MHz) geplant. Das ausgewählte Time-of-Flight-Modul ermöglichte jedoch sogar die Erhöhung auf 1 ns (1 MHz). In Abbildung 32 werden Messungen der Laufzeit (Runtime) mit bisheriger Auflösung und dem modifizierten IP-8 gegenübergestellt. Man erkennt

eine deutliche Verbesserung der Auflösung bei den Messungen mit integriertem ToF-Modul. Die sehr hohe Auflösung von 1 ns beseitigt die „Treppenstufen“ bedingt durch die Digitalisierungssprünge der bisherigen Auflösung von 50 ns. Zudem sind mehrere Ultraschallmessungen mit integriertem ToF-Modul in Luft dargestellt, bei denen verschiedene Spannungsversorgungen für Notebook und IP-8 genutzt wurden. Der Rauschpegel durch elektrische und mechanische Störungen wird deutlich sichtbar und beträgt je nach Umgebung ca. ± 20 ns um den Messwert.

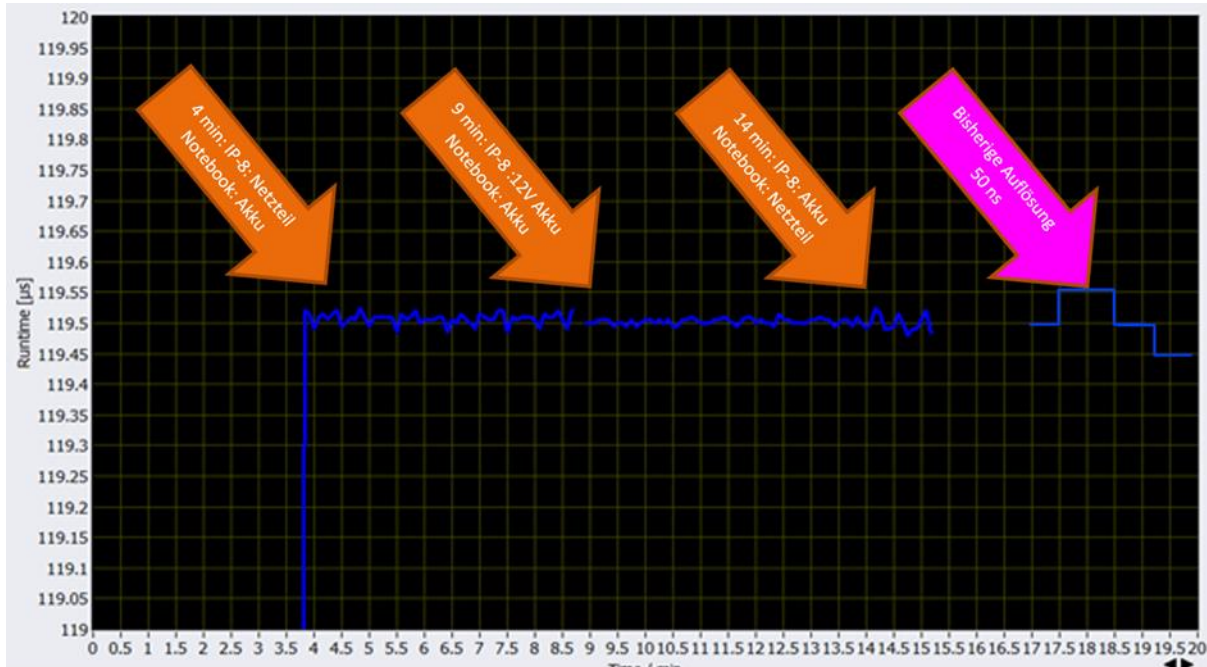


Abbildung 32: Gegenüberstellung der Messsignale mit bisheriger Auflösung (pink) und mit integriertem ToF-Modul (orange). Bei den Messungen mit ToF-Modul sind drei unterschiedliche Kombination zur Stromversorgung von IP-8 und Notebook zu sehen.

Eine weitere Modifizierung, die begonnen wurde, ist die die Auswertung des Zeitpunktes an der fallenden Flanke. Normalerweise wird die Laufzeit bestimmt, indem der Zeitpunkt gemessen wird, an dem das am Empfänger aufgezeichnete Ultraschallsignal zuerst ansteigt. Gemessen wird ist demnach die zeitliche Dauer, die das Ultraschallsignal von dem Sender durch das Medium zu dem Empfänger braucht. Anstatt dieser Laufzeit wurde nun der Zeitpunkt bestimmt, an dem das Empfängersignal den ersten Schwingungsdurchlauf vollzogen hat und wieder abfällt – die erste fallende Flanke. Hierfür ist eine Veränderung der Schaltung nötig, um den Trigger auf die erste fallende Flanke zu setzen. Eine Gegenüberstellung der beiden Auswertemetoden anhand der Messung einer Dummy-Dichtmasse Schat-Tec ist in Abbildung 33 dargestellt. Hier ist ebenfalls beispielhaft ein Empfängersignal zu sehen, bei dem die Messzeitpunkte der steigenden und fallenden Flanke eingezeichnet sind. Durch den Vergleich der beiden Messung erkennt man, dass sich durch die Veränderung der Schaltung und setzen des Triggers auf die erste fallende Flanke sehr exakte Messkurven mit einer Verringerung des Störpegels auf ca. 1-2 ns um den Messwert ergeben.

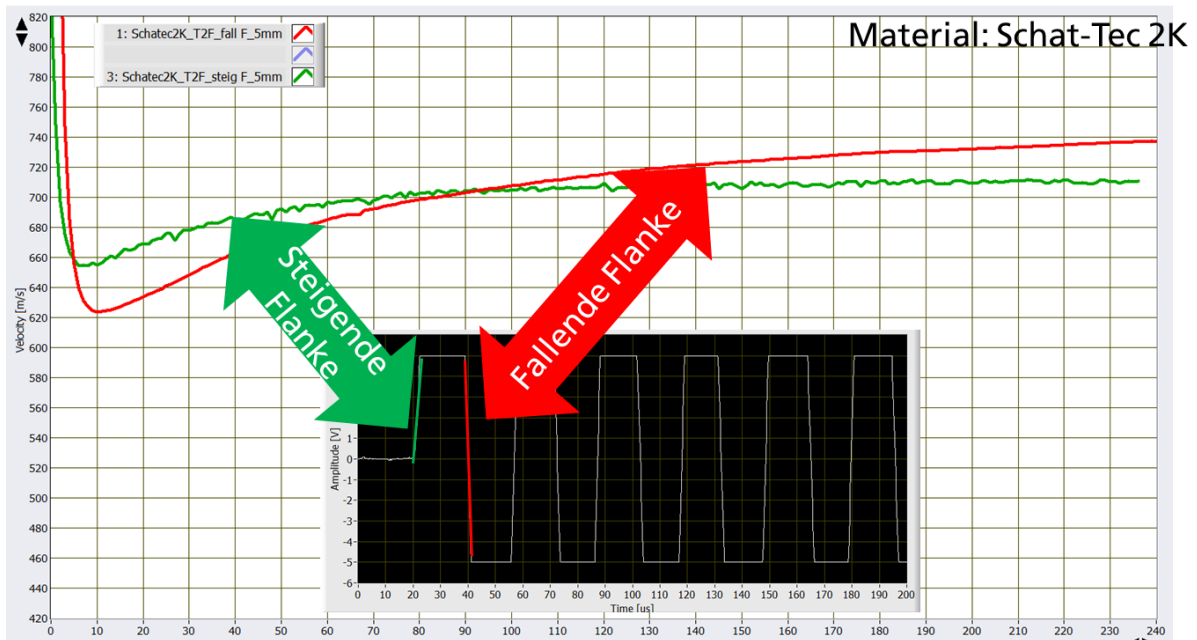


Abbildung 33: Beispielhafte Messungen, bei denen die Schallgeschwindigkeit jeweils aus den gemessenen Zeitpunkten bei steigender und fallender Flanke bestimmt wurde. Unten ist jeweils die vermessene Flanke im Empfängersignal dargestellt.

Abschließend werden in Abbildung 34 Messung mit dem alten IP8-Aufbau bei Auswertung der steigenden Flanke und Messungen mit integriertem ToF-Modul bei Auswertung der steigenden und fallenden Flanke miteinander verglichen. Im Vergleich zeigen erste Messungen mit dem ToF-Modul einen geringeren Störpegel. Bei der Messung mit ToF-Modul und der Auswertung der fallenden Flanke, ist ein noch geringerer Störpegel, sowie eine größere Dynamik zu sehen. Hier wird zudem über einen längeren Zeitraum eine Veränderung des Materials gemessen. Diese neue Methode soll nun an den im Projekt gewählten Dichtmassen der Firma gemessen werden. Je nachdem, wie die Ergebnisse dann aussehen, werden anschließend weitere Optimierungsmaßnahmen durchgeführt.

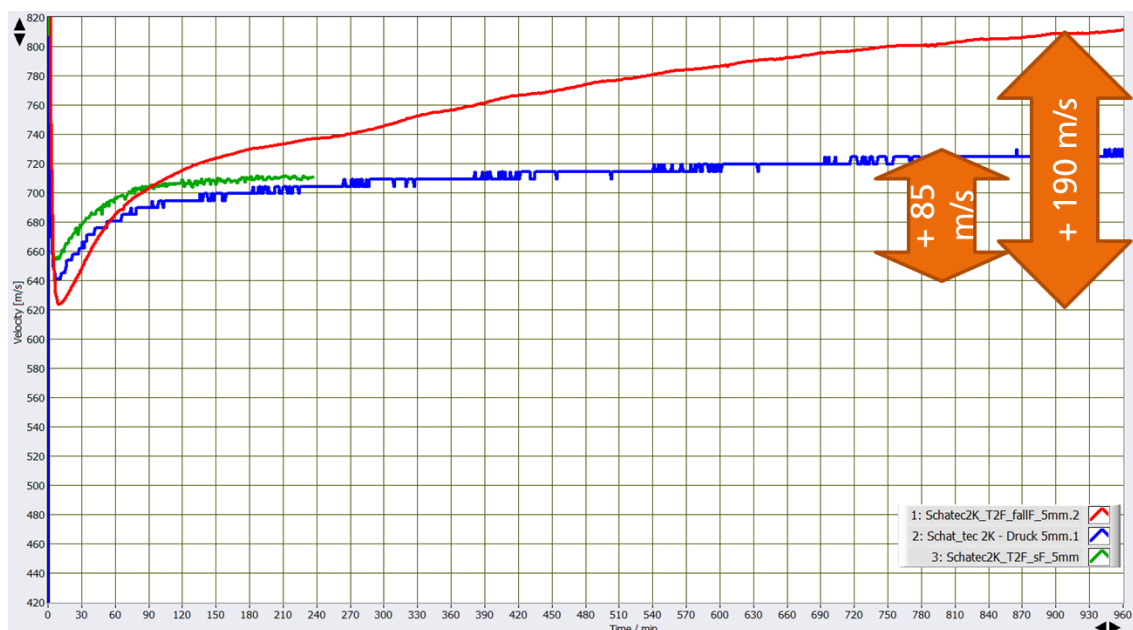


Abbildung 34: Vergleich der Messung mit dem alten IP8-Aufbau bei Auswertung der steigenden Flanke (blau) und Messungen mit integriertem ToF-Modul bei Auswertung der steigenden (grün) und fallenden Flanke (rot).

Unterstützend zur Anpassung der Schallköpfe wurden am IFAM Messungen mit einem Ultraschallsystem mit Schallköpfen unterschiedlicher Anregungsfrequenz durchgeführt. Hierbei wurden zeitliche Ultraschallsignale während der Aushärtung gemessen. Ein Beispiel für die Dichtmasse MC780 C4, die mit 250kHz-Schallköpfen vermessen wurden ist in Abbildung 35 zu sehen. Hier sieht man die Ultraschallsignale zu 3 unterschiedlichen Zeitpunkten. Im rechten Bild erkennt man, dass sich der Start des empfangenen Ultraschallsignals mit zunehmender Messdauer nach vorne verschiebt (Laufzeit verkürzt sich). Durch die Laufzeitänderung wird damit direkt eine Veränderung der Schallgeschwindigkeit gemessen. Mit dem verwendeten Aufbau und der Anregungsfrequenz lässt sich demnach eine Änderung der Schallgeschwindigkeit nachweisen, was mit dem bisherigen Aufbau (30kHz-Anregungsfrequenz) schwierig war.

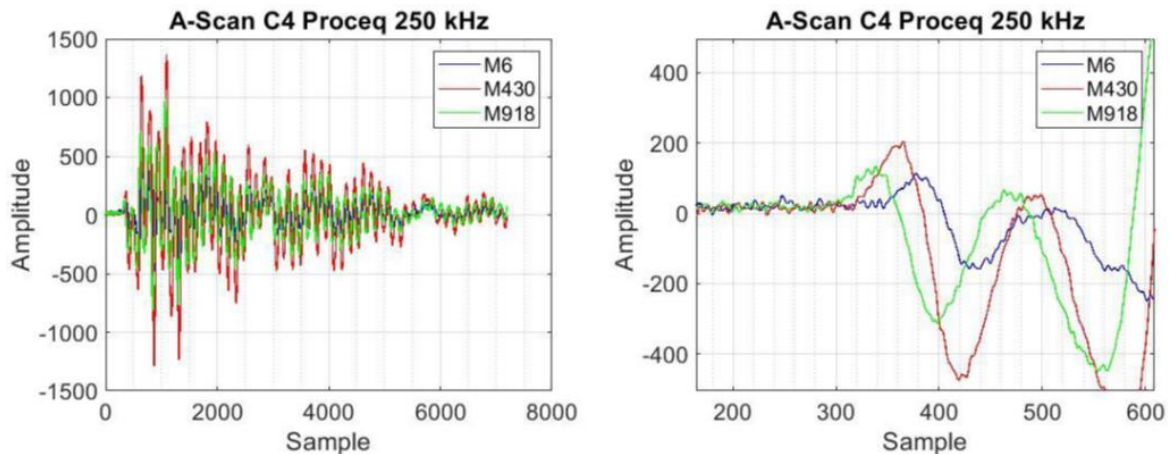


Abbildung 35: Ultraschallsignale der Messung einer C4-Dichtmasse mit 250kHz-Schallköpfen. Dargestellt sind 3 Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Im rechten Bild erkennt man, dass sich der Start des empfangenen Ultraschallsignals mit zunehmender Messdauer nach vorne verschiebt (Laufzeit verkürzt sich).

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden unterschiedliche Schallköpfe zur Anregung des IP8-Ultraschallsystems getestet, die jeweils eine unterschiedliche Anregungsfrequenz besitzen. Dabei wurden kleine Schallköpfe (14mm Durchmesser), mit 40 kHz Anregungsfrequenz sowie Schallköpfe der Firma Proceq, die bei 150kHz anregen getestet. Beide wurden genau so an das IP8-System angeschlossen, wie die bisherigen Schallköpfe (Anregungsfrequenz ca. 30 kHz). Beide Schallkopf-Paare sind in Abbildung 36 dargestellt.

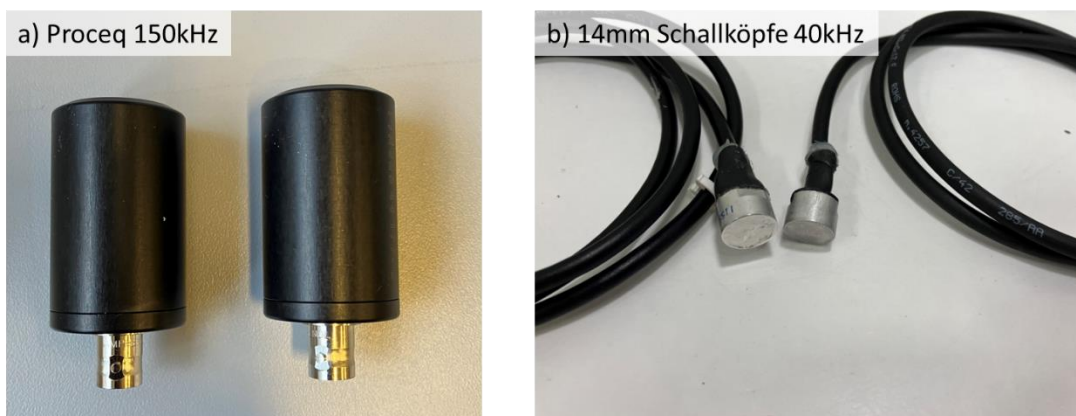


Abbildung 36: Darstellung der verwendeten Schallköpfe. Links: Proceq (150kHz), rechts: 14mm Schallköpfe (40kHz).

Zum Vergleich der Schallköpfe wurden Aushärtemessungen an der Dichtmasse MC 780 C4 mit allen drei Schallkopfpaaaren durchgeführt. In Abbildung 37 sind 2 Messungen dargestellt, bei denen für jede Messung der Aushärteverlauf für die unterschiedlichen Schallköpfe gleichzeitig aufgenommen wurde. Man erkennt, dass beide Messungen mit dem 40kHz & 150kHz-Schall-

kopf eine deutlich größere Dynamik zeigen, als die Messung mit dem herkömmlichen Schallkopf. Hier sieht man über die ersten 6 Stunden einen Anstieg der Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Aushärtung der Dichtmasse. Die zweite Messung mit dem 40kHz-Schallkopf zeigt jedoch ein großes Rauschen auf der Messung. Prinzipiell eignet sich demnach die größere Anregungsfrequenz bei der Dichtmasse MC780 C4 besser.

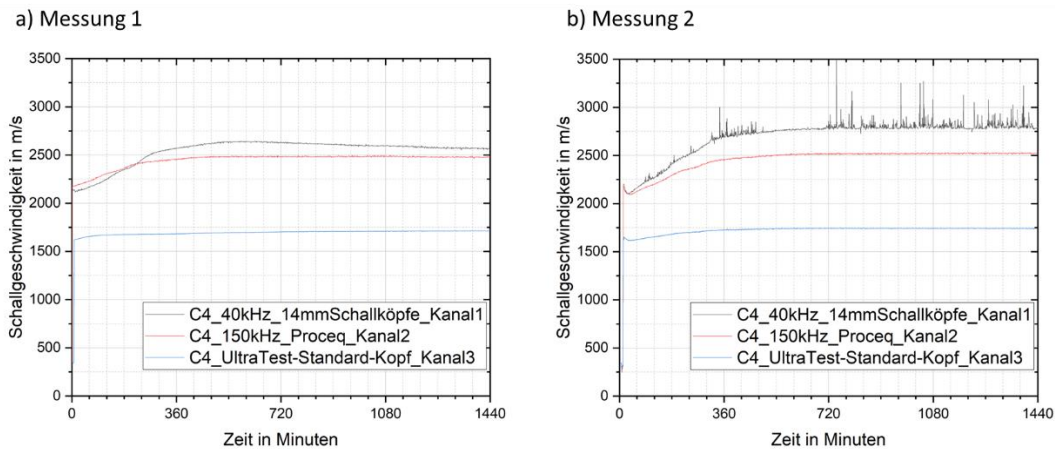


Abbildung 37: Vergleich unterschiedlicher Schallköpfe bei der Aushärtemessung der Dichtmasse C4. Es sind zwei separate Messungen angezeigt. Für jede Messung wurde der Aushärteverlauf für die unterschiedlichen Schallköpfe gleichzeitig aufgenommen.

2.3.3 Gegenüberstellung vorgegebener Ziele

In HAP 3 wurden erfolgreich optimierte Messzellen gebaut, die für die für die Anwendung der Aushärteüberwachung von Dichtmassen bezüglich Geometrie und Kontaktflächen angepasst wurden. Diese sind vom Messabstand flexibel auf die Zielgeometrie anwendbar und bestehen wie die bereits bestehenden Formen aus schalldämpfenden Silikon. Darüber hinaus wurden die Ultraschallkomponenten optimiert und angepasst. Dies betrifft den Einbau eines Time-of-Flight-Moduls zur Verbesserung der zeitlichen Auflösung, der Modifizierung der Messung auf der fallenden Flanke und die Untersuchungen bezüglich einer anderen Anregungsfrequenz. Die Modifizierungen konnten erfolgreich durchgeführt werden.

2.4 HAP 4 Aufbau und Test Demonstrator

Der Aufbau des Demonstrators war aufgrund der kostenneutralen Verlängerung zum Ende des Berichtszeitraumes noch nicht abgeschlossen. Ein erster Prototyp zur simultanen Messung auf drei Kanälen wurde bereits provisorisch von der Firma UltraTest aufgebaut. Ultraschallsensoren und Messformen können auf zwei Schlitten mit Prismenschienen palziert werden. Durch die Prismenschienen ist der Durchmesser der Sensoren oder Messformen variabel. Die zentrale Messachse befindet sich immer auf gleicher Höhe. Der Messabstand ist durch verstellbare Anschlüsse von 0-50mm frei einstellbar.

AP 4.1 Aufbau Demonstrator

Zum Aufbau des Demonstrators wurden neue Schallköpfe entwickelt, die nach den Ergebnissen aus AP 3.2 (Abbildung 37) eine höhere Anregungsfrequenz zulassen, um bei der Dichtmasse MC 780 C4 eine höhere Dynamik messen zu können.

Die Sensoren M-27-15 haben wesentlich kleinere Abmessungen und Gewichte als die ursprünglichen Sensoren. Die Länge reduziert sich von 90 mm auf 27 mm, der Durchmesser von 30 mm auf 15 mm und das Gewicht von 240 gr. auf 19,5 gr.. Die Anzahl der wirksamen Piezoelemente kann im Bereich von 2-6 Stück variiert werden.

Die angepassten Schallsensoren Typ M-27-15 standen im April 2024 für erste Versuchsmessungen zur Verfügung. Alle Sensoren wurden mit 4 sehr kleinen Piezo-Lochscheiben aufgebaut. Im Vergleich zu 6 großen Lochscheiben bei den Standardsensoren.

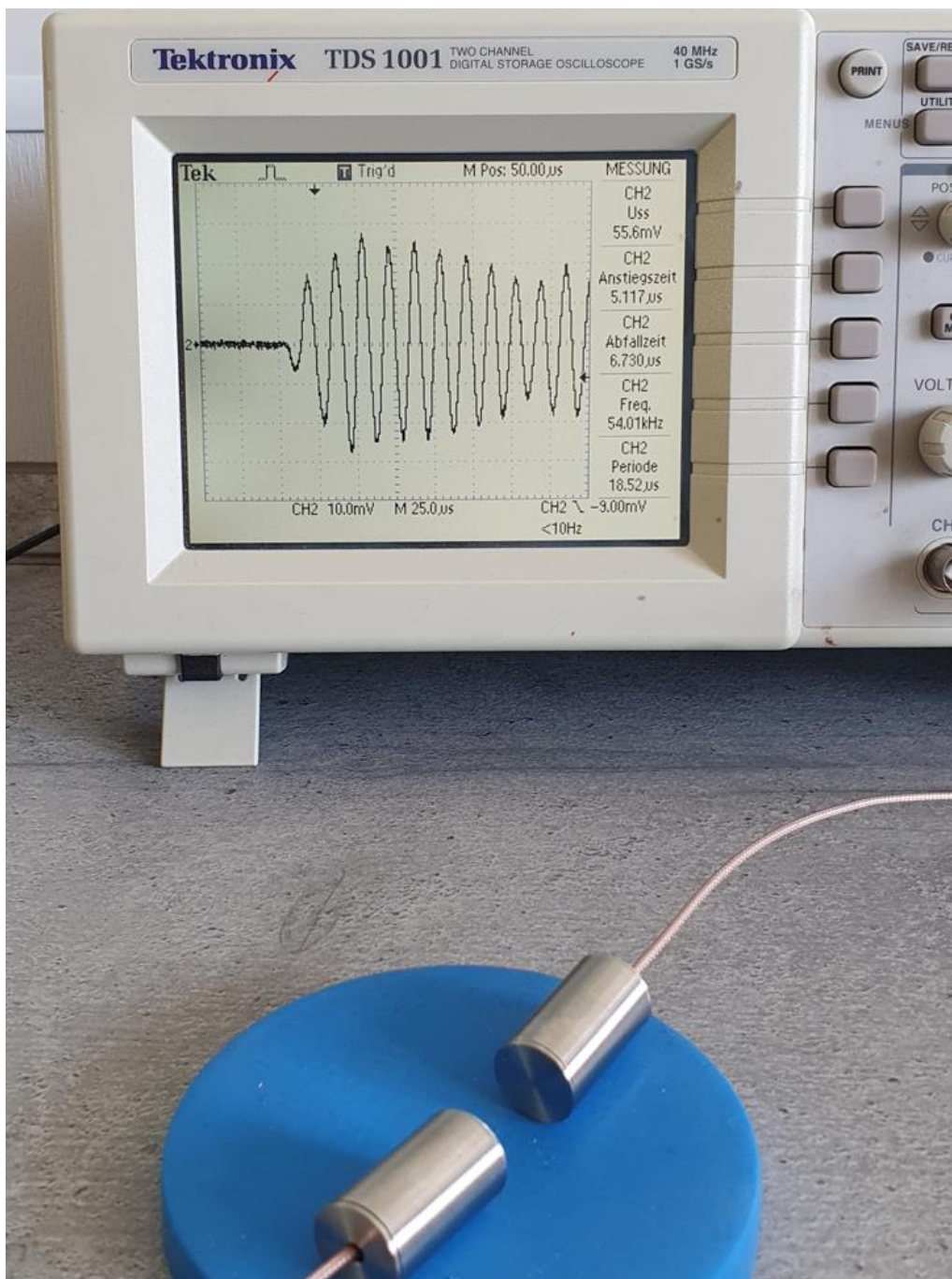


Abbildung 38: Schallköpfe M-27-15. Oszillographie des Empfängersignals in Luft (ohne Ankopplung)

Die Oszillographie zeigt eine sehr harmonische Resonanzschwingung mit einer Frequenz von fast exakt 54 kHz.

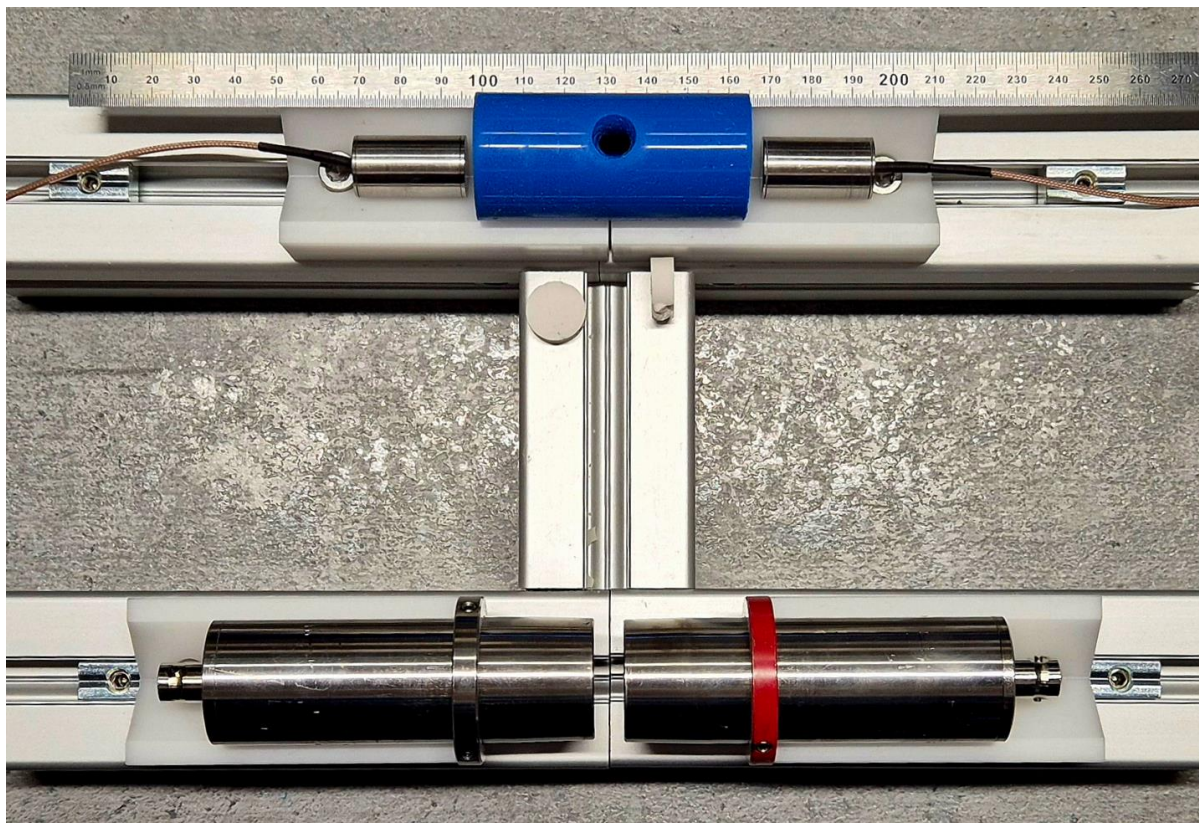


Abbildung 39: oben: Schallköpfe M-27-15 mit Tube mould und zwei ausgehärteten Probekörpern. Zum Größenvergleich unten Standard-Schallköpfe E-90

Abgesehen davon wurde die Software aktualisiert, um gleichzeitig Messungen an der steigenden und an der fallenden Flanke durchzuführen. Die dazugehörige Option ist in Abbildung 42 dargestellt.

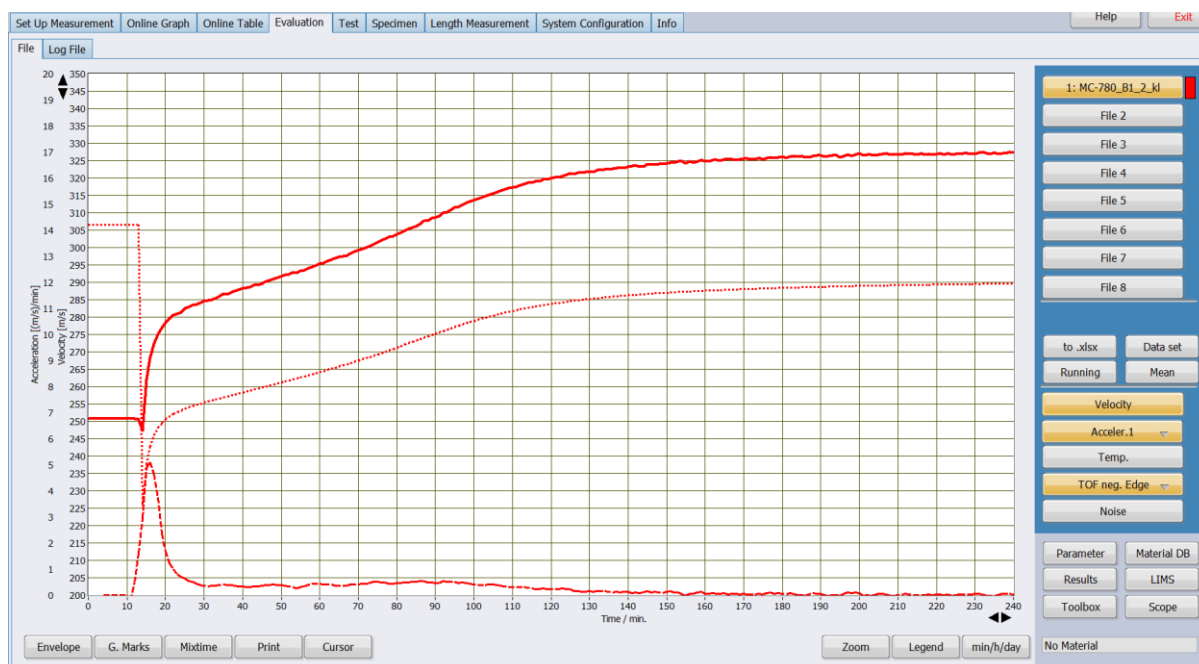


Abbildung 40: Darstellung Software mit Update zur simultanen Messung von Messung an steigender und an fallender Flanke.

2.4.1 AP 4.2 Tests Demonstrator in Laborumgebung

Das IP8-System weist Schwierigkeiten bei der Messung der Dichtmasse C4 auf, wie Abbildung 21 zeigt, die die unterschiedlichen Aushärtekurven dargestellt. Hier zeigen einige Ausnahmen einen Aushärteverlauf jedoch mit erheblichem Offset. Die meisten Messungen zeigen allerdings einen einmaligen Anstieg zu Beginn der Messung und keine messbare Dynamik.

Um zu testen, ob das an der spezifischen Zusammensetzung der C4-Dichtmasse liegt, wurden in Zusammenarbeit mit dem assoziierten Partner Chemetall einige weitere Dichtmassen getestet. Dabei wurden die Dichtmassen so ausgewählt, dass Lösemittel, Viskosität, sowie Füllkörper variiert wurden. Der Aushärteverlauf der 4 Dichtmassen wurde mit dem entwickelten Demonstrator aufgenommen und die Ergebnisse sind in Abbildung dargestellt. Wie zu sehen ist zeigen alle 4 Dichtmassen einen steilen Anstieg der Schallgeschwindigkeit und anschließend wenig bis gar keine weitere Dynamik. Demnach ist dieses Ergebnis vergleichbar mit dem von C4. Demnach ist deutlich, dass die schwierige Zusammensetzung von C4 nicht an der chemischen Zusammensetzung liegt (Viskosität, Lösemittel oder Füllkörper).

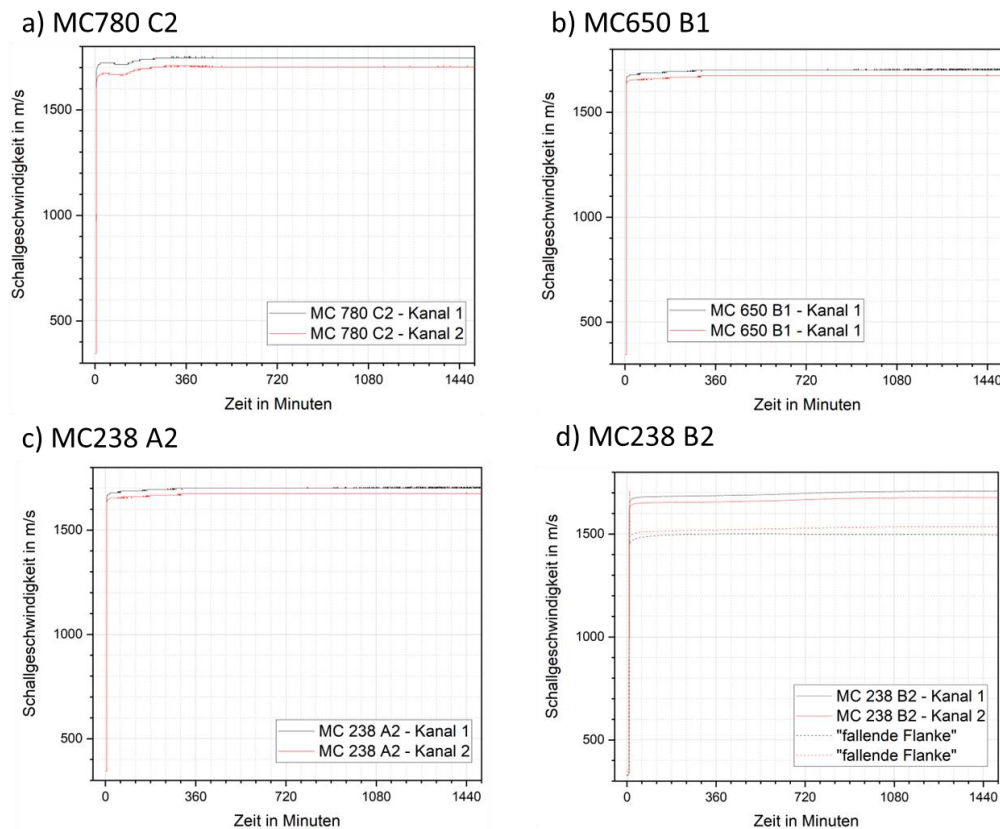


Abbildung 41: Aushärtekurven der Ultraschallmessung mit dem modifizierten Ultraschallgerät. Alle 4 Dichtmassen zeigen einen steilen Anstieg der Schallgeschwindigkeit und anschließend wenig bis gar keine weitere Dynamik.

Abschließend wurden mit dem modifizierten Demonstrator Messungen erstellt. Hierbei wurden neben der verbesserten zeitlichen Auflösung und der Zusatzmessung mittels fallender Flanke auch neue, speziell für den Anwendungsfall entwickelte Schallköpfe eingesetzt, die einen kleineren Durchmesser als die bisherigen Schallköpfe haben und zudem eine Anregungsfrequenz von 54 kHz statt wie bisher 30 kHz besitzen. Abschließende Ergebnisse wurden mit einem Schallkopfabstand von 8 mm passend zur in AP 1.1 gewählten Fugengeometrie durchgeführt und sind in Abbildung 42 zu sehen. Man erkennt hier sowohl eine deutlich verbesserte Auflösung der Messung als auch eine erhöhte Dynamik im Vergleich zu den Messungen mit dem

bisherigen System vom Anfang des Projektes. Wobei gleichzeitig der Schallkopfabstand deutlich verkleinert und einer echten Fugengeometrie angepasst ist. Dieser entwickelte Demonstrator ist demnach einsatzbereit zur Aushärteüberwachung von Dichtmassen an bisherigen. Die Ultraschallmessung besitzt dabei den Vorteil eines sich schneller veränderlichen Messsignals gegenüber Qualifizierungsmethoden des Stands der Technik, wie beispielsweise der Shore A-Härte.

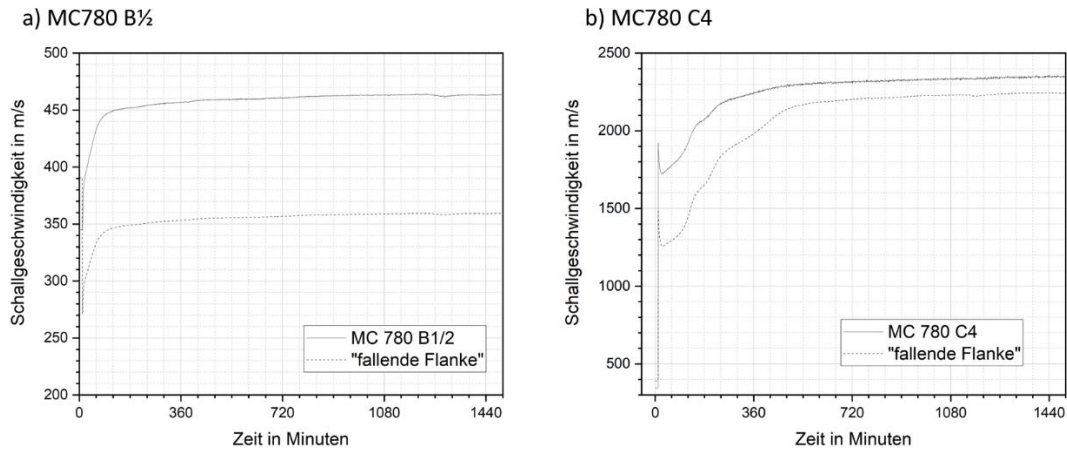


Abbildung 42: Abschlusstest des Demonstrators. Zu sehen sind Ultraschallmessung mit dem modifizierten Ultraschallgerät und neuen Schallköpfen. Beide Messungen zeigen eine deutlich verbesserte Dynamik und Auflösung im Vergleich zu den Messungen mit dem bisherigen System.

2.4.2 Test unter Produktionsbedingungen

Eine Messung des Bauteils in der Produktion bei dem assoziierten Partner Chemetall konnte leider nicht durchgeführt werden. Jedoch wurden die in Abschnitt 2.4.1 gezeigten Messungen unter realen Messbedingungen in dem Technikum am IFAM durchgeführt. Da das Messsystem als autarkes System mit Prozessbegleitproben konzipiert wurde, ist seine Funktionalität unabhängig von dem Ort an dem sie aufgestellt wird gewährleistet. Darüber hinaus bestehen in dem Technikum am IFAM industriennahe Bedingungen hinsichtlich der in Abschnitt 2.1.1 definierten Randbedingungen.

2.4.3 Gegenüberstellung vorgegebener Ziele

Es konnte erfolgreich ein Demonstrator für ein Ultraschall-System zur Aushärteüberwachung von Dichtmassen entwickelt und hergestellt werden. Dieser konnte anschließend in einem industriennahen Fertigungsumfeld getestet werden. Dabei wurde ein abschließender Test durchgeführt, der eine ausreichend hohe Messdynamik und zeitliche Auflösung darstellt. Zudem besitzt die Ultraschallmessung dabei den Vorteil eines sich schneller veränderlichen Messsignals gegenüber Qualifizierungsmethoden des Stands der Technik, wie beispielsweise der Shore A-Härte. Die Einsatzfähigkeit des entwickelten Demonstrators als Messmethode zur Aushärteüberwachung ist demnach gegeben.

2.5 HAP 5 Dichtmassendatenbank

Im HAP 5 hat UltraTest keine Anteile.

3 Durchführendes Unternehmen

UltraTest GmbH
Am Schmiedeberg 6
28832 Achim

Projektleiter: Hajo Büssenschütt