Teil I – Kurzbericht „FoamResControl“

Das im FuE-Vorhaben „Entwicklung einer Inline-Prozess- und Qualitätsüberwachung in der Polymerschaumextrusion zur Umwelt- und Ressourcenschonung“ entwickelte Prüfsystem ermöglicht die Überwachung qualitätsrelevanter Parameter bei der Polymerschaumextrusion mithilfe von Luftultraschall.
Im Ergebnis des Projektes können der direkte Ressourceneinsatz bei geschäumten Erzeugnissen reduziert, Ausschüsse nahezu vermieden und Emissionen erheblich verringert werden, indem die Produktherstellung durch Einsatz der entwickelten Lösung zur intelligenten Inline-Überwachung signifikant wirtschaftlich und ökologisch effizienter wird. Damit ist das innovative Inline-Messsystem beispielgebend für eine umwelt- und klimagerechte digitale Transformation der Wirtschaft und stärkt insbesondere die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit der Fa. SONOTEC als KMU sowie all deren Kunden, wodurch das Vorhaben umfänglich die förderpolitischen Ziele im Förderprogramm DigiRess, Förderschwerpunkt 2, erfüllt.

Folgende Ziele wurden mit der Umsetzung des Projektes erreicht:
Entwicklung eines inlinefähigen, industriell einsetzbaren Prüfsystems zur Luftultraschallprüfung mit folgender Charakteristik:

- erhebliche Steigerung der Sende- und Empfangsempfindlichkeit
- Verbesserung der Störfestigkeit/Störaussendung zum Einsatz im rauen industriellen Umfeld
- Erhöhung der Bandbreite der Luftultraschallwandler auf 40-45 % bei niedrigen Prüffrequenzen
- Entwicklung und Umsetzung einer Algorithmik zur Ableitung charakteristischer Parameter für die Überwachung des Schaumextrusionsvorgangs
- Referenzmessungen an charakteristischen Proben zeigten nachweislich einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Schaumstruktur und den akustischen Daten
- Integrationsfähigkeit des Prototypen in eine Fertigungsanlage gegeben durch hard- und softwareseitige Vorkehrungen (Interfaces, automatisierte Prüfabläufe, Testreports)

Im nächsten Schritt muss der entwickelte Demonstrator in die Serie überführt werden. Parallel dazu sollen damit unterschiedliche Schäume charakterisiert und repräsentative Messreihen aufgenommen werden, auf dessen Basis ein statistisch sicherer Zusammenhang zwischen den Ultraschallkennwerten und den Materialeigenschaften abzuleiten bzw. zu bestätigen ist. Neben der Überwachung des Herstellungsprozesses kann das System auch zur Prozessoptimierung eingesetzt werden und somit durch Optimierung von Prozessparametern zur Ressourcenreduzierung beitragen.
SONOTEC wird das Projekt nach Projektende auf eigene Kosten fortführen mit dem Ziel:

- die Bandbreite der niederfrequenten Luftultraschallwandler auf 50 % zu erhöhen
- den Zusammenhang zwischen den akustischen Messungen und den Materialeigenschaften statistisch zu belegen

Ein weiterer zentraler Aspekt des Projekts war die Bewertung der ökologischen Potenziale der entwickelten Methode. Durch die Einführung der Ultraschallprüfung in der industriellen Fertigung könnten erhebliche Mengen an Ausschuss vermieden werden. Für die beiden wichtigsten Schaumtypen – expandiertes Polystyrol (PS-E) und Polyurethan (PUR) – wurde auf Basis von Produktionszahlen aus Deutschland im Jahr 2021 berechnet, dass durch Ausschussvermeidung jährlich mehr als 340.000 Tonnen CO_2-Äquivalente eingespart werden könnten. Selbst bei einer schrittweisen Einführung der Technologie mit 20 % Marktdurchdringung würden die Einsparungen bereits im Bereich von über 69.000 Tonnen CO_2-Äquivalente pro Jahr liegen. Der zusätzliche Energieaufwand durch die Ultraschallprüfung ist im Verhältnis dazu gering und könnte durch

effizientere Gerätetechnik weiter reduziert werden. Die ökobilanzielle Bewertung unterstreicht damit das Potenzial des Verfahrens als Beitrag zu Ressourceneffizienz und Klimaschutz in der Kunststoffproduktion.

Teil II – Eingehende Darstellung „FoamResControl“

Ergebnisse, Projektarbeiten, Positionen

Arbeitspaket 1

Ziel:

Erfolgreiche Erforschung und Entwicklung der Elektronik zur Anregung und Signalaufnahme breitbandiger Ultraschallwandler → neuartiges Elektronikdesign

Ergebnisse:

Für den Einsatz der luftgekoppelten Ultraschallprüfung im industriellen Umfeld bei der Schaumextrusion wurde eine neue Empfangselektronik mit integriertem Analog-Digitalwandler entwickelt. Nachweislich konnte (im Vergleich zu existierenden ACUT Systemen) damit ein deutlich besseres Signal- Rausch- Verhältnis (SNR) bei der Prüfung von industriell gefertigten Schäumen erreicht werden. Neben der Verbesserung des SNR war Kernziel dieses Arbeitspaketes die Sende- und Empfangs-Elektronik überaus robust gegenüber elektromagnetischen Feldern im industriellen Umfeld zu entwickeln. Hierzu wurde durch uns ein Zielerreichungsgrad von 120 % in Bezug auf die in der Richtlinie 2014/30/EU festgelegten Vorgaben definiert. Um diesen erhöhten Anspruch zu erreichen, wurden neue Ansätze beim Design der Leiterplatte erprobt und erfolgreich umgesetzt. Neben einem speziell für die auftretenden Signale entwickelten Lagenaufbau der Leiterplatte kamen auch Techniken wie die differenzielle- und Impedanz-kontrollierte Leiterbahnführung zum Einsatz. Diese Ver-besserungen führten letztlich auch maßgeblich zum Erreichen der besonders anspruchsvollen Ziele in Bezug auf die Störfestigkeit und die Störaussendung. Zur Prüfung der Schäume war ebenfalls eine deutliche Verbesserung der Empfindlichkeit des gesamten Messsystems notwendig. Hierfür konnte durch eine Verbesserung der Verstärkertechnologie beim Vorverstärker die Gesamtverstärkung um 20 dB angehoben werden. Darüber hinaus wurde die Ansteuerung der Vorverstärker durch die Umsetzung einer digitalen Schnittstelle robuster ausgeführt. Zusätzlich konnte die Sendeleistung durch eine spezielle Anpassung an die eingesetzten Prüfköpfe (Impedanz, Anstiegs- und Abfallzeiten) um einige dB vergrößert werden, sodass eine Erhöhung der Gesamtempfindlichkeit um ca. 23 dB im Versuch nachgewiesen wurde. Zur Digitalisierung der aufgenommenen Messwerte wurde ein Analog-/Digitalwandler mit einer Auflösung von 14 Bit und eine Abtastrate von 125MSps implementiert. Die digitalisierten Daten werden einem übergeordneten System über ein Gigabit Ethernet-Interface zur Verfügung gestellt.
Experimentell wurden die optimalen Konfigurationen für folgende Abhängigkeiten ermittelt:

- Maximierung der Sendespannung bei kleinstmöglichen Anstiegszeiten
- Maximierung der Bandbreite und der Verstärkung (Gain-Bandwidth-Product GBW) bei minimalem Rauschen zur Erreichung eines bestmöglichen Signal to Noise Ratio – SNR (Verhältnis zwischen Signal- und Rauschpegel)
- Maximierung der Datenübertragungsrate zur Ableitung der damit verbundenen Zusammenhänge zwischen der Widerholrate (Pulse Repetition Frequency PRF) und dem maximal aufnehmbaren Zeitfenster der einzelnen A-Bilder (Sample Depth)

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Arbeitspaketes waren Entwicklungsarbeiten zur Anpassung von Gehäusegeometrie und Benutzerschnittstelle an die Anforderungen potentieller Kunden aus dem industriellen Umfeld. Hierfür wurden die folgenden Arbeiten erfolgreich umgesetzt:

- die Bauform wurde auf ein industriell standardisiertes 19"-Gehäuse mit 2 Höheneinheiten (HE) festgelegt und umgesetzt
- Untersuchungen in Bezug auf Störfestigkeit und Störaussendung wurden unter SONOTEC eigenen Laborbedingungen durchgeführt; der Nachweis im zertifizierten Prüflabor wurde erbracht
- im Demonstrator wurde eine flexible Industrieschnittstelle integriert, die an alle Arten industrieller Schnittstellen adaptierbar ist

Die Arbeiten in AP 1 sind erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 2

Ziel:

Erfolgreiche Erforschung und Entwicklung breitbandiger Luftultraschallsensoren

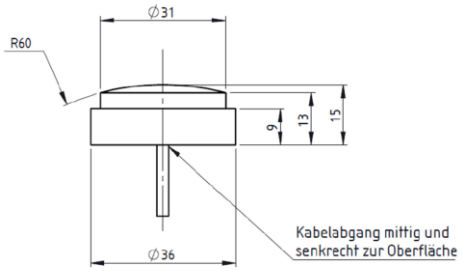
Ergebnisse:

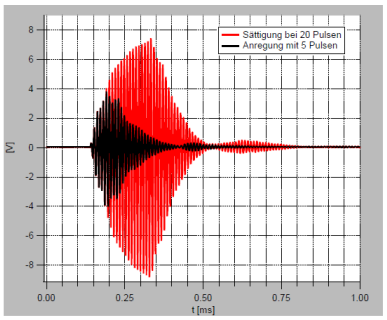
In diesem Arbeitspaket wurden verschiedene Wandlerdesigns entworfen, umgesetzt und auf ihre Eignung hin bewertet. Was bei klassischen Ultraschallwandlern schon lange Stand der Technik ist, ist im Bereich der niederfrequenten Luftultraschallprüfköpfe noch unerforschtes Gebiet. Vor allem bei der Umsetzung der benötigten und auch in dem Projekt angestrebten Breitbandigkeit stehen die Entwickler aufgrund der benötigten niedrigen Frequenzen vor sehr großen Herausforderungen. Leider lassen sich die Verfahren zur Erhöhung der Bandbreite, wie sie bei den klassischen Tauchtechnik- oder Kontakttechnikwandlern bzw. bei den hochfrequenten Luftultraschallwandlern eingesetzt werden nicht auf die niederfrequenten Luftultraschallwandler adaptieren. Hier gilt es eine Vielzahl von störenden Effekten zu beherrschen und damit gezielt Einfluss auf das Schwingverhalten der Schallwandler zu nehmen. Neben dem eigentlichen Schwingverhalten des Piezoelements wirken sich vor allem ungewollte radiale Ausbreitungsmoden in den Anpassschichten (Schicht zur Anpassung der akustischen Impedanz zwischen dem Piezoelement und der Luft als Koppelmittel) negativ auf die Signalbandbreite aus. Bei beiden Teilarbeitspaketen konnten erhebliche Verbesserungen erreicht werden. Die Bandbreite der niederfrequenten Luftultraschallwandler konnte deutlich erhöht werden. Zusätzlich ist es gelungen, die Störmoden in den Anpassschichten nahezu zu unterdrücken. Leider konnte das angestrebte Ziel, eine Bandbreite von mehr als 50 % zu erreichen, nicht vollständig erreicht werden. Mit den aktuellen Designs ist es möglich, Bandbreiten zwischen 40 und 45 % umzusetzen (bei 230 kHz); jedoch haben die Untersuchungen gezeigt, dass die im Projekt verfolgten Ansätze eine Realisierung hoher Bandbreiten für niederfrequente Luftultraschallwandler ermöglichen. Problematisch für die Lösungsfindung ist, dass die Wirksamkeit von Designänderungen immer nur durch den Aufbau von Funktionsmustern nachgewiesen werden kann. Da der Aufbau eines Ultraschallwandlers technologiebedingt mehrere Wochen in Anspruch nimmt, gestaltet sich der Entwicklungsprozess in Verbindung mit einem hohen Maß an Freiheitsgraden im Design sehr langwierig. Es gibt zwar mittlerweile Möglichkeiten zur Simulation solcher Ultraschallwandlerdesigns, jedoch dienen diese lediglich zur Findung möglicher Ansätze. Die weitere Entwicklung und Optimierung der Designs muss durch Versuche in einem zeitaufwendigen iterativen Verfahren erfolgen. Dieser Prozess wird im Nachgang an das Projekt auf eigene Kosten fortgesetzt und SONOTEC ist sicher, dass die gesteckten Ziele (Bandbreite von 50 %) innerhalb der nächsten Monate erreicht werden können. Mit den in diesem Arbeitspaket erfolgten Untersuchungen konnten wichtige Grundlagen geschaffen werden, die für die künftigen Entwicklungen im Bereich der Luftultraschallwandler von großer Bedeutung sind.

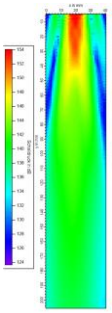
Im Folgenden ist der aktuelle Stand des neu entwickelten Luftultraschallwandlerdesigns (100 kHz) dargestellt

(Links: Wandlergeometrie; Mitte: HF-Signal; Rechts: Schallfeld):

Mittenfrequenz: 106 kHz







Die Arbeiten in AP 2 sind erfolgreich abgeschlossen.

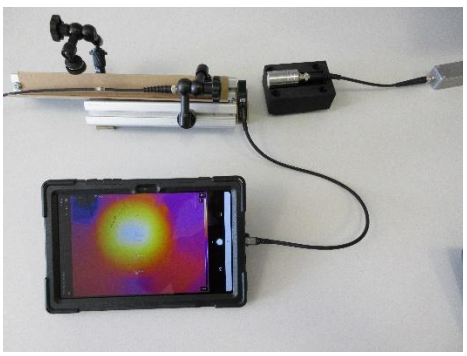
Arbeitspaket 3

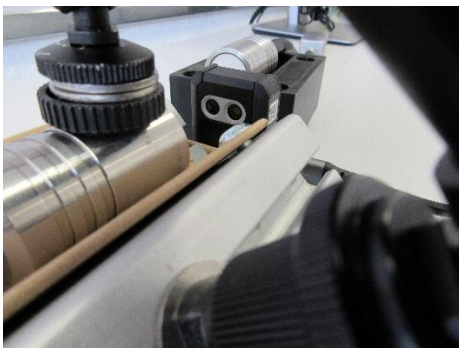
Ziel:

Ermittlung einer optimalen Messverfahrensanordnung, Erfolgreiche Kompensation der Einflussgrößen (Prüfrahmenbedingungen)

Ergebnisse:

Parallel zu den Entwicklungen in den Arbeitspaketen 1 und 2 wurden Untersuchungen zu Messstrategien, möglichen Testaufbauten und Einflussgrößen vorgenommen. Neben der Simulation möglicher Umgebungsbedingungen im Klimaschrank wurden ausführliche Betrachtungen der Temperaturstabilität der eingesetzten Luftultraschallwandler durchgeführt. Zur Erreichung der angestrebten Empfindlichkeit und Bandbreite müssen extrem hohe Sendeleistungen umgesetzt werden. Die speziell dazu entwickelte Sendestufe kann Spitzenleistungen von bis zu 4 kW umsetzen. Physikalisch kann jedoch nur ein kleiner Teil dieser Leistungen in Ultraschall umgewandelt werden. Die überschüssige Energie wird in Wärme umgewandelt und an die Umgebung abgegeben. Da zur Prüfung der Schäume maximale Schallleistungen benötigt werden, müssen die Luftultraschallwandler bis in den kritischen Grenzbereich belastet werden. Zur Einschätzung möglicher Belastungsgrenzen wurde ein spezieller Prüfstand entwickelt, mit dem experimentell die Temperatur der Luftultraschallwandler in Abhängigkeit von der Anregungsform und Energie bestimmt werden kann.





Anhand des dargestellten Messaufbaus wurde der Temperaturverlauf für unterschiedliche Anregungsformen aufgezeichnet und daraus entsprechende Belastungsgrenzen abgeleitet. Mit einem optischen Mikrofon wurden parallel dazu die Schallfelder unter den ermittelten Bedingungen charakterisiert. Da die ermittelte

Eigenerwärmung der Schallwandler zusätzlich zur Umgebungs-temperatur wirkt, muss während einer Messung im Herstellungsprozess sichergestellt werden, dass der Einsatztemperaturbereich des Luftultraschallwandlers eingehalten wird. Für die Anwendung des Prüfsystems in einer Extrusionsanlage wurden im Rahmen von Arbeitspaket 5 und Arbeitspaket 8 Verfahren entwickelt und in die Gerätetechnik sowie die Software integriert, welche eine Überwachung des Betriebszustandes vornehmen und in Abhängigkeit davon gezielt die Begrenzung der maximalen Sendeenergie umsetzen. Hierzu wurde im Gerät ein Interface zur Temperaturmessung integriert. Damit kann direkt am Luftultraschallwandler die Gehäusetemperatur mittels Thermoelements oder Widerstandsthermometer bestimmt werden.

Die Arbeiten in AP 3 sind erfolgreich abgeschlossen.

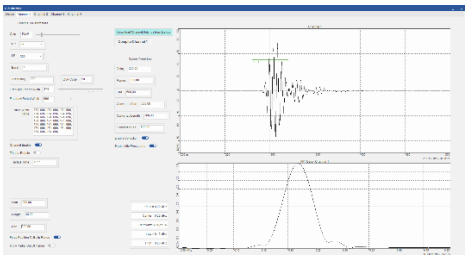
Arbeitspaket 5

Ziel:

Korrelation zwischen Ultraschall- und Qualitätskennwerten ermittelt

Ergebnisse:

In Verbindung mit den Entwicklungen in Arbeitspaket 1 wurden zu jedem Entwicklungsstand Bewertungen hinsichtlich SNR vorgenommen. Die vom SKZ zur Verfügung gestellten Proben deckten einen weiten Anwendungsbereich für die Schaumcharakterisierung ab. Anhand dieser Proben wurden Zusammenhänge zwischen den akustischen Parametern und den Materialeigenschaften abgeleitet. Neben der Bewertung der Amplitude wurden auch Verfahren zur spektralen Analyse angewandt. Die Analyse der Daten zeigten einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Schaumstruktur und den akustischen Daten für fertig ausgehärtete Schäume. Es hat sich dabei gezeigt, dass sowohl die Messung der Laufzeit (korreliert zur Dichte) als auch die Messung der Amplitude (korreliert zur Struktur) durch die Materialeigenschaften beeinflusst wird. Für die Umsetzung der Untersuchungen wurde ein spezielles Softwaremodul entwickelt, was die Konfiguration der Hardware sowie die Aufnahme, Speicherung und Verarbeitung der Ultraschalldaten ermöglicht.



Zur Ableitung eines statistisch belastbaren Zusammenhangs ist die Aufnahme umfangreicher Messreihen notwendig. Hierfür muss (im Gegensatz zu den einzelnen untersuchten Proben in diesem Projekt) eine große Anzahl an Testproben mit gleichen/ähnlichen Eigenschaften beschafft, untersucht und miteinander verglichen werden, um einen proben- und anwendungsbedingten Nachweis der sicheren Funktionalität des Verfahrens zu gewährleisten. Dazu ist für die nächsten Monate die Vorstellung des Messsystems bei Herstellern industriell gefertigter Schäume geplant, um nach Möglichkeiten zur Bereitstellung weiterer, umfangreicher Schaumproben zu suchen. Alle dafür notwendigen Vorarbeiten wurden im Rahmen dieses Projekts bearbeitet, sodass mit dem entwickelten System die Möglichkeit besteht, umfangreiche Testmessungen durchzuführen sowie die dabei entstehenden Daten auszuwerten.

Die Arbeiten in AP 5 sind erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 6

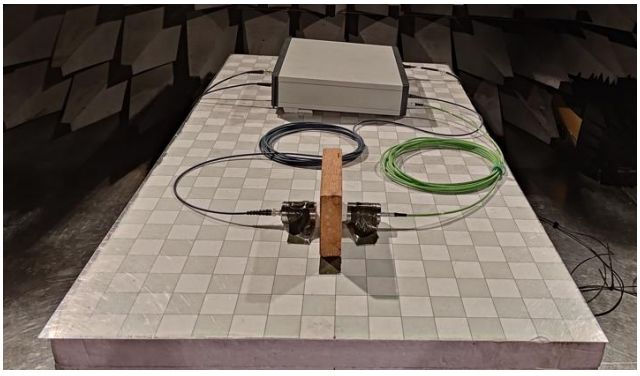
Ziel:

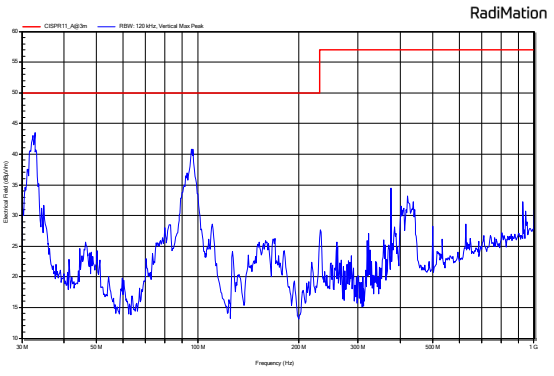
Algorithmen und Verfahren in Software integriert, Demonstrator aufgebaut

Ergebnisse:

Der Demonstrator wurde vollständig aufgebaut, in Betrieb genommen und getestet. Dabei kamen unterschiedliche Ultraschallwandler zum Einsatz. Das Gerät wurde unabhängig mit einem Oszilloskop und der entwickelten Software betrieben. Zur Verifizierung des Demonstrators wurden Vergleiche beider Systeme vorgenommen. In der folgenden Abbildung ist der Testaufbau dargestellt.

Neben dem funktionalen Nachweis waren auch Prüfungen im EMV Labor zum Nachweis der Konformität des Gerätes zur aktuell gültigen Richtlinie 2014/30/EU geplant. Dafür wurden mehrere Prüftage in einem akkreditierten EMV-Labor vorgesehen. Die ersten Messungen haben gezeigt, dass mit dem Gerät die Vorgaben bereits erfüllt werden, wodurch der ursprünglich geplante Prüfumfang nicht benötigt wurde. Dementsprechend konnten die geplanten Dienstleistungskosten reduziert werden. Das Gerät erfüllt in diesem Status bereits die gesetzlichen Vorgaben. Die folgende Abbildung zeigt den Messaufbau in der Absorberkammer des EMV-Labors (links) sowie die erreichte vertikale Störaussendungscharakteristik (rechts). Die Abbildung zeigt, dass die geforderten Grenzwerte um mehr als 6 dBµV/m unterschritte werden.





Die Arbeiten in AP 6 sind erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 7

Ziel:

Erfolgreiche Validierung des Messsystems im realen Einsatz nach 2 Jahren

Ergebnisse:

Die Validierung des Messsystems erfolgte parallel zu den Entwicklungen kontinuierlich über den gesamten Projektzeitraum. Hierbei wurden die Elektronik und die Luftultraschallwandler sowohl als separate Einheit als auch als Gesamtsystem betrachtet. Es konnte nachgewiesen werden, dass das System für die Prüfung von Polymerschäumen eingesetzt werden kann. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnten jedoch auch die Verfahrensgrenzen ermittelt und die daraus resultierenden Konsequenzen für die Anwendung abgeleitet werden (Verfahrensgrenzen für die untersuchten Polymerschäume, zum Beispiel in Bezug auf Probendicken oder Schallenergien). Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften der Schäume ist es nicht möglich, alle Messungen mit einer Konfiguration umzusetzen. Es konnte jedoch für ein sehr breites Anwendungsspektrum mögliche Prüfkonfigurationen etabliert und nachweislich validiert werden. Im Ergebnis sind verschiedene anwendungsspezifische Prüfkonfigurationen im Frequenzbereich zwischen 50 kHz und 230 kHz entstanden:

Probe	US-Wandler	Frequenz (kHz)	Sendespannung (V)	Empfangsverstärkung (dB)	Burstanzahl
RG 30.3	CFC230 D25	230	400	32	5
RG 25.3	CFC230 D25	230	400	29	5
RG 100.3	L47	100	400	37	5
RG 145.3	L47	100	400	37	5
RG 200.3	L47	100	400	42	5
RG 45.3	L47	100	400	51	5
RG 110.3	CF50	50	400	40	5
RG 170.3	CF50	50	400	44	5

Die Arbeiten in AP 7 sind erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 8

Ziel:

Erfolgreiche Durchführung von Entwicklungsanpassungen

Ergebnisse:

Im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses wurden während der gesamten Projektlaufzeit die gewonnenen Erkenntnisse zu den einzelnen Systemkomponenten ausgewertet und entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung des Gesamtsystems abgeleitet. Schwerpunktthemen wie Temperaturstabilität, Vibrationsfestigkeit und Messempfindlichkeit wurden als die kritischsten Parameter des Gesamtsystems eingestuft. Anhand dieser Kriterien wurde der Entwicklungsprozess kontinuierlich überwacht und die Zielerreichung fortwährend bewertet. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass sich der Projektfokus über den gesamten Projektzeitraum an den gestellten Zielkriterien orientiert. Alle Systemkomponenten wurden mehreren Redesigns unterzogen.

Die Arbeiten in AP 8 sind erfolgreich abgeschlossen.

Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Marktanalysen und Literaturrecherchen haben keine neuen Erkenntnisse und Weiterentwicklungen bei anderen Stellen ergeben.

Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mit den Entwicklungen im Rahmen des Projekts hat SONOTEC die Technologie für die luftgekoppelte Ultraschallprüfung sowie die dazugehörigen Ultraschallwandler weiter verbessert und damit seine Position am Markt deutlich gestärkt. Der vor allem durch die sehr gute Kooperation zum Projektpartner SKZ erreichte Wissenstransfer wird es der SONOTEC in den nächsten Jahren ermöglichen, noch besser auf Anforderungen am Markt zu reagieren. Mit den erzielten Projektergebnissen können darüber hinaus zusätzliche Anwendungsfelder akquiriert werden, wodurch sich ein Umsatzwachstum ergeben wird. Auch wenn die Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet wohl noch lange nicht abgeschlossen ist, so können einzelne Anwendungen adaptiert und dadurch das Spektrum bedienbarer Kundenanfragen deutlich erweitert werden. Die im Rahmen des Projekts aufgebaute Kooperation zum Süddeutschen Kunststoffzentrum wird über das Projekt hinaus aufrechterhalten und wird die Entwicklungen aller positiv beeinflussen.

Veröffentlichungen, Vorträge etc.

SONOTEC wird das Luftultraschall-Prüfsystem unter anderem auf folgenden Veranstaltungen präsentieren:

- ECerS2025 (Dresden)
- UNITECR2025 (Cancun)
- ECNDT2026 (Verona)
- WCNDT2028 (Buenos Aires)

Darüber hinaus sind die Erstellung und Veröffentlichung von Anwenderberichten zur Charakterisierung der extrudierten Schäume geplant.

Erfolgskontrollbericht – „FoamResControl“

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens, erreichte Nebenergebnisse und gesammelte wesentliche Erfahrungen

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Vorhabens wurden in Teil I und II dargestellt.

Fortschreibung des Verwertungsplans

Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Es wurden bislang noch keine Schutzrechte angemeldet. Dies kann jedoch perspektivisch erfolgen, um die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse abzusichern und eine Vermarktung der innovativen Lösung nach weiteren Entwicklungstätigkeiten zu ermöglichen.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u.a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen etc. darzustellen

Unverändert zum Antrag sind die wirtschaftliche Bedeutung und damit die Erfolgsaussichten in Hinblick auf die wirtschaftliche Verwertung sind sehr groß. Bislang ist eine Prozess- und Qualitätsüberwachung bei der Polymerschaumextrusion nicht möglich, Verfahren zur Qualitätssicherung sind auf die stichprobenartige, zeitaufwändige und teilweise zerstörende Charakterisierung im Labor beschränkt. Insgesamt ist eine Kontrolle der Schäume daher in hohem Maße unwirtschaftlich. Die Ermittlung, Präparation, Mikroskopie, manuelle Auswertung und darauf basierende nachträgliche Steuerung des Herstellungsprozesses gestaltet sich äußerst zeit- und kostenintensiv und senkt somit maßgeblich die Wettbewerbsfähigkeit der KMU bei der Schaumherstellung. Folgender wirtschaftlicher Verwertungshorizont ergibt sich im Anschluss an das Vorhaben für SONOTEC:

	Kurzfristig (1 – 2 Jahre)	Mittelfristig (2 – 5 Jahre)	Langfristig (5 – 10 Jahre)
SONOTEC	• Erweiterung des Produktportfolios • Vorbereitung Markteintritts des neuartigen Luftultraschall-messsystems • Erste Umsätze durch Vertrieb des Messsystems (Umsatz bei ca. 244 T€)	• Umsatzzuwachs durch Vertrieb des Luftultraschall-messsystems in den Jahren 3, 4 und 5 nach Projektende auf 1.380 T€ (vgl. Tabelle 2) • Verbesserung der Wettbewerbs-situation	• Hohes Umsatzpotenzial durch Vertrieb der Luftultraschall-sensorik • Technologie-Know-how kann für zahlreiche andere (luft-)ultraschallbasierte Sensoren genutzt und eingesetzt werden à Technologietransfer • Stärkung der Marktposition im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung und der luftultraschall-gekoppelten Sensorik

Der Projektpartner SONOTEC beabsichtigt nach Erreichung der Marktreife den Vertrieb des Luftultraschallmesssystems. Der Vertrieb erfolgt vorwiegend über das bestehende Vertriebsnetz auf den Märkten von SONOTEC (Europa, Asien, Nordamerika). Kumuliert sollen bis im Jahr 2029 drei neue Mitarbeiter eingestellt werden, der Mitarbeiterzuwachs resultiert zunächst aus einer geplanten Neueinstellung in den Bereichen Entwicklung bzw. Applikation; im Weiteren dann durch Fertigungsmitarbeiter zur Herstellung der Messsystems. Innerhalb kurzer Zeit stellt sich infolge der Umsatzsteigerung ein wirtschaftlicher Erfolg ein.

Mit den Entwicklungen im Rahmen des Projekts hat SONOTEC die Technologie für die luftgekoppelte Ultraschallprüfung sowie die dazugehörigen Ultraschallwandler weiter verbessert und damit seine Position am Markt deutlich gestärkt. Der vor allem durch die sehr gute Kooperation zum Projektpartner SKZ erreichte Wissenstransfer wird es der SONOTEC in den nächsten Jahren ermöglichen, noch besser auf Anforderungen am Markt zu reagieren.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u.a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen etc. darzustellen

Für SONOTEC ergab sich ein enormer wissenschaftlicher Mehrwert aus dem Vorhaben. Dies umfasst perspektivisch die Entwicklung neuer Produkte im Bereich der (Luft-)Ultraschallsensorik für das verarbeitende Gewerbe, insbesondere die Steigerung der FuE-Kompetenz im Bereich der Luftultraschalltechnik. Ebenfalls wird ein Transfer der technologischen und wissenschaftlichen Erkenntnisse auf weitere Produktionsverfahren für zusätzliche Steigerungen der Ressourceneffizienz in der Industrie angestrebt. Es bestehen bereits Anfragen von Herstellern von Kunststoffschäumen, welche eine nachhaltige und automatisierte Lösung für die Überwachung der Prozesse integrieren möchten. Ein Wissenstransfer auf weitere Branchen und Bereiche der produzierenden Industrie wird als möglich und wahrscheinlich angesehen. Als wissenschaftlicher Verwertungshorizont für SONOTEC können folgende Aspekte angesehen werden:

	Kurzfristig (1 – 2 Jahre)	Mittelfristig (2 – 5 Jahre)	Langfristig (5 – 10 Jahre)
SONOTEC	• Erarbeitung eines neuen Mess-systemkonzepts • Vereinfachter Zugang zu Informationen/ Know-how	• Wissenstransfer auf andere Produkte und Projekte • Sicherung und Schaffung von Arbeitsplätzen	• Aufbau einer neuen Produktgruppe innerhalb des Geschäftsfeldes Vorbeugende Instandhaltung sowie Luftultraschalltechnik

SONOTEC kann durch das Vorhaben sein Know-how in den Bereichen Luftultraschalltechnik, Künstlicher Intelligenz, Prüf- und Qualitätssicherung weiter vertiefen, was dem Unternehmen einen wissenschaftlichen und technologischen Vorsprung gegenüber Wettbewerbern verschafft. Dies ermöglicht einerseits den Ausbau von Produkten und Dienstleistungen in diesen Bereichen und dient andererseits als Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Außerdem werden dadurch Umweltaspekte berücksichtigt, indem die bisherige Ressourcenverschwendung eingedämmt wird und die benötigten Ressourcen erheblich

zielgerichteter genutzt werden. Die Ergebnisse des Vorhabens leisten einen bedeutenden Beitrag zur Festigung und dem Ausbau der Marktposition von SONOTEC und tragen zur Erschließung neuer Märkte bei.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse

Im nächsten Schritt muss der entwickelte Demonstrator in die Serie überführt werden. Parallel dazu sollen damit unterschiedliche Schäume charakterisiert und repräsentative Messreihen aufgenommen werden, auf dessen Basis ein statistisch sicherer Zusammenhang zwischen den Ultraschallkennwerten und den Materialeigenschaften abzuleiten bzw. zu bestätigen ist. Neben der Überwachung des Herstellungsprozesses kann das System auch zur Prozessoptimierung eingesetzt werden und somit durch Optimierung von Prozessparametern zur Ressourcenreduzierung beitragen. SONOTEC wird das Projekt nach Projektende auf eigene Kosten fortführen mit dem Ziel:

- die Bandbreite der niederfrequenten Luftultraschallwandler auf 50 % zu erhöhen
- den Zusammenhang zwischen den akustischen Messungen und den Materialeigenschaften statistisch zu belegen

Durch die Verwendung von niedrigen Frequenzen im Bereich zwischen 50 und 500 kHz ermöglicht die luftgekoppelte Ultraschallprüfung prinzipiell Messungen an hoch dämpfenden Materialien, welche mit der wassergekoppelten Ultraschallprüfung kaum oder gar nicht prüfbar wären. Hierzu zählen außer den Schäumen beispielsweise Komposite, Keramiken, Holz, Beton sowie Wabenstrukturen. Eine Entwicklung der Technologie und des Verfahrens für die Prozess- und Qualitätsüberwachung von Polymerschäumen könnte prinzipiell für die genannten Materialien ebenfalls möglich sein. Da die Materialstruktur eine entscheidende Rolle für die Auswerteverfahren und Frequenzen spielt, ist die individuelle Bewertung je Verfahren und das Auswerteverfahren grundsätzlich different. Mit weitergehenden Entwicklungen im Anschluss an das FuE-Projekt könnte die in diesem Projekt entwickelte technologische Basis allerdings zielführend genutzt und ausgebaut werden. Potenziell erscheinen dadurch vielfältige weitere Anwendungen über dieses FuE-Projekt hinaus möglich. Eine Übertragbarkeit der enormen Vorteile und Vorhabensergebnisse auf eine nachhaltige Produktion verschiedenster Materialien und Bauteile wird angenommen.

Angaben zu Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Alle Arbeitspakete im Teilvorhaben wurden erfolgreich abgeschlossen.

Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung

Der Kosten- und Zeitplan für die Durchführung des Vorhabens wurde eingehalten.