



FORSCHUNGSBERICHT

Prozess- und Qualitätsüberwachung in der Polymerschaumextrusion mittels Luftultraschall

Polymerschaumüberwachung mittels Luftultraschall

Luis Wachter, Mario Kiel, Christoph Pientschke, Marcel Mayr, Oliver Schmidtke, Giovanni Schober, Ralf Steinhausen, Benjamin Baudrit, Thomas Hochrein, Martin Bastian

Bildung & Forschung

www.skz.de

Danksagung

Das Vorhaben 21035 BG der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V. (FSKZ) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Außerdem möchten wir den Unternehmen unseren Dank aussprechen, die das Forschungsvorhaben durch ihre Leistungen unterstützt haben. Darüber hinaus bedanken wir uns bei den Teilnehmern des projektbegleitenden Ausschusses für die wertvollen Diskussionen, welche maßgeblich zum Erfolg des Forschungsvorhabens beigetragen haben.

Kurzfassung

Rohdichte und Zellgröße sind die charakteristischen Kenngrößen von polymeren Schäumen, welche maßgeblich deren Qualität und damit Einsatzfeld bestimmen. Bei der Herstellung wird eine Prozessführung von Faktoren wie z. B. Chargenwechsel, Temperaturschwankungen oder Werkzeugverschleiß beeinflusst. Dies wiederum schlägt sich in den charakteristischen Kenngrößen des geschäumten Polymerwerkstoffes nieder. Die erforderliche Kontrolle der Kenngrößen geschieht bis dato überwiegend offline. Eine Inline-Prozessüberwachung der entscheidenden Parameter Rohdichte und Zellgröße im laufenden Schaumextrusionsprozess ist bislang nicht möglich. Die Luftultraschall(LUS)-Technologie ist, bedingt durch zahlreiche Alleinstellungsmerkmale im Bereich der Charakterisierung von Schäumen, besonders erfolgsversprechend. Vorteile dieser Technologie liegen z. B. in einer zerstörungsfreien und berührungslosen Arbeitsweise, welche im Vergleich zu Röntgenstrahlung nicht ionisierend und nicht gesundheitsgefährdend sind. Im Projekt wurden verschiedene Ansätze zur Luftultraschallcharakterisierung in Transmissionsanordnung und bei einseitiger Zugänglichkeit verfolgt. Dabei zeigte sich, dass die Ultraschallcharakteristiken und die Schaumparameter auf komplexe Weise zusammenhängen, was einfache, auf die Laufzeit oder die Schallamplitude basierende Charakterisierungsverfahren, nur teilweise geeignet erscheinen lässt. Gleichwohl ließen sich zumindest bei einem Teil der verfügbaren Schaumproben Korrelationen herausarbeiten, welche Möglichkeiten zur Anwendung des Verfahrens bieten. Eine vertiefende Datenanalyse erschien deswegen wünschenswert. Dennoch konnten zuverlässig Schäume innerhalb einer Produktreihe unterschieden werden, was in Rücksprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss häufig als Information ausreicht. Im Rahmen einer Pilotuntersuchung wurden dabei erstmals in größerem Umfang vielfältige Methoden des Maschinellen Lernens auf die aufgenommenen Zeitreihen angewendet. Klassifizierungsaufgaben konnten erfolgreich bearbeitet werden. So gelang die Zuordnung zu Materialgruppen. Für einen Teil der untersuchten Schaumproben konnte auch eine genaue Bestimmung der Rohdichte (relative Abweichung kleiner 5%) aus den Zeitreihen erreicht werden. Dabei konnte die grundsätzliche Inline-Fähigkeit der erarbeiteten Methodik nachgewiesen und somit die praktische Anwendung vorbereitet werden. Insgesamt hat das Projekt somit neue Perspektiven der Anwendung der Luftultraschallprüfung eröffnet. Die Charakterisierung von Schäumen mit Luftultraschall ist inline möglich und verspricht für die Anwendung relevante Materialkennwerte liefern zu können. Von diesen Ergebnissen profitieren nicht nur

Anbieter von Ultraschallsystemen und Anwender von Luftultraschallsystemen, sondern auch Dienstleister im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung und kunststoffverarbeitende Unternehmen.

Abstract

Density and cell size are the characteristic parameters of polymer foams, which decisively determine their quality and thus field of application. During production, process control is influenced by factors such as batch changes, temperature fluctuations or tool wear. This in turn is reflected in the characteristic parameters of the foamed polymer material. Up to now, the necessary control of the parameters has mainly been carried out offline. An inline process monitoring of the decisive parameters bulk density and cell size in the running foam extrusion process has not been possible so far. The air-ultrasonic technology is particularly promising due to numerous unique features in the field of foam characterisation. Advantages of this technology are, for example, a non-destructive and non-contact mode of operation, which, compared to X-rays, is non-ionising and non-hazardous to health. In the project, different approaches to air ultrasound characterisation were pursued in transmission configuration and with one-sided accessibility. It was found that the ultrasound characteristics and the foam parameters are interrelated in a complex way, which makes simple characterisation methods based on transit time or sound amplitude only partially suitable. Nevertheless, correlations could be worked out for at least some of the available foam samples, which offer possibilities for the application of the method. A more in-depth data analysis therefore seemed desirable. Nevertheless, it was possible to reliably distinguish foams within a product series, which is often sufficient information in consultation with the project-accompanying committee. Within the framework of a pilot investigation, a variety of machine learning methods were applied to the recorded time series for the first time on a larger scale. Classification tasks could be successfully processed. Thus, the assignment to material groups was successful. For some of the examined foam samples, an exact determination of the bulk density (relative deviation less than 5%) could be achieved from the time series. The basic inline capability of the developed methodology was proven and thus practical application was prepared. Overall, the project has thus opened up new perspectives for the application of air-ultrasonic testing. The characterisation of foams with airborne ultrasound is possible inline and promises to be able to deliver relevant material parameters for the application. Not only suppliers of ultrasonic systems and users of air-ultrasonic systems, but also service providers in the field of non-destructive testing and plastics processing companies benefit from these results.

1	Einl	leitung.		1	
	1.1	Anlass	s für das Forschungsvorhaben	1	
	1.2	Proble	mstellung	3	
	1.3	Zielset	tzung	4	
2	Star	nd der 🛛	ſechnik	5	
	2.1	Messte	echnik zur Prozessüberwachung in der Schaumextrusion	5	
	2.2	Grund	lagen des luftgekoppelten Ultraschalls	7	
	2.3	US-Pr	üfung von porösen Materialien	9	
	2.4	Pulsko	ompression	9	
3	Lös	ungswe	g zur Erreichung des Forschungsziels	11	
4	Erg	ebnisse		12	
	4.1	Offlin	e-Charakterisierung der Schaumkenngrößen	12	
	4.2	Aufba	u und Inbetriebnahme des Demonstrator-Prüfstandes	1	
	4.3	Messu	ngen in Re-Emission	16	
4.4 Messung der Schallgeschwindigkeit und der Signalamplitude				18	
		4.4.1	Entwicklung eines Auswertealgorithmus	18	
		4.4.2	Messungen mit dem Demonstrator-Prüfstand	19	
		4.4.3	Berücksichtigung von Rahmenbedingungen für das LUS-Syster	n 21	
	4.5	Auswe	ertung der Transmissionsmessung mit Maschinellem Lernen	22	
		4.5.1	Datensatz	22	
		4.5.2	Auswertung der Transmissionsamplitude	23	
		4.5.3	Maschinelles Lernen als weiterer Ansatz	24	
		4.5.4	Klassifizierung	28	
		4.5.5	Rohdichteschätzung	29	
	4.6	6 Messungen in Schrägdurchschallung			
	4.7 Pulskompression				
5	Zus	ammen	fassung	38	
6	Lite	raturve	erzeichnis	39	

Projektsteckbrief

Rohdichte und Zellgröße sind die charakteristischen Kenngrößen von polymeren Schäumen, welche maßgeblich deren Qualität und damit Einsatzfeld bestimmen. Bei der Herstellung wird eine Prozessführung von Faktoren wie z. B. Chargenwechsel, Temperaturschwankungen oder Werkzeugverschleiß beeinflusst. Dies wiederum schlägt sich in den charakteristischen Kenngrößen des geschäumten Polymerwerkstoffes nieder. Die erforderliche Kontrolle der Kenngrößen geschieht bis dato überwiegend offline. Eine Inline-Prozessüberwachung der entscheidenden Parameter Rohdichte und Zellgröße im laufenden Schaumextrusionsprozess ist bislang nicht möglich. Die Luftultraschall-(LUS)-Technologie ist bedingt durch zahlreiche Alleinstellungsmerkmale im Bereich der Charakterisierung von Schäumen besonders erfolgsversprechend. Vorteile dieser Technologie liegen z. B. in einer zerstörungsfreien und berührungslosen Arbeitsweise, welche im Vergleich zu Röntgenstrahlung nicht ionisierend und nicht gesundheitsgefährdend sind. Da die verwendeten Frequenzen in der LUS-Technologie niedriger als in der konventionellen Ultraschalltechnologie sind, können auch dickere Schaumstrukturen durchdrungen werden. Im Gegensatz zur Terahertz-Technologie zeichnet sich die LUS-Technik durch niedrigere Systemkosten und geringere Messzeiten aus. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines LUS-Messstandes zur kontinuierlichen Prozessüberwachung in der Schaumproduktion. Ein weiteres Ziel ist es, die Anwendungsgebiete dieser noch relativ jungen Technologie zu erweitern. Durch eine gezielte und selektive Auswertung der LUS-Messdaten soll eine direkte Ausgabe der Kennwerte des Schaumes erreicht werden. Damit kommt das vorliegende Forschungsvorhaben insbesondere kleinen und mittelständischen Unternehmen zugute, die auf Seiten der System- und Komponentenanbieter und auf Seiten der Anwender den Markt dominieren.

AiF/IGF-Projekt 21035 BG:

"Prozess- und Qualitätsüberwachung in der Polymerschaumextrusion mittels Luftultraschall"

Dauer: 01.06.2020 bis 28.02.2023

Unterstützt durch den projektbegleitenden Ausschuss:

- 3A Composites Core Materials Airex AG
- EBF Dresden e. V.
- FPX e. V.
- Jackon Insulation GmbH
- Karl DEUTSCH Prüf- und Messgeräte GmbH + Co. KG
- Kurtz-Ersa GmbH
- Liebherr Hausgeräte Lienz GmbH
- Porsche Leipzig GmbH
- Sikora AG
- Wölfel Engineering GmbH
- Zotefoams plc
- BASF SE
- SONOTEC GmbH
- MyPurSolutions GmbH
- Leistritz Extrusionstechnik GmbH
- Merkle & Partner GbR
- Armacell International S.A.
- ESN Deutsche Tischtennis Technologie GmbH
- NMC SA

1 Einleitung

1.1 Anlass für das Forschungsvorhaben

Der weltweite Markt für Polymerschäume betrug im Jahr 2021 29,4 Millionen Tonnen und hatte laut einer aktuellen Studie von Smithers Pira ein jährliches Wachstum von 4,4 % (2009 bis 2014), das zwischen 2021 und 2026 voraussichtlich auf 4,9 % steigen wird [1]. Polymerschäume sind prädestiniert, als Dämmmaterialien bzw. Leichtbauwerkstoff, wesentlich zur steigenden Energieeffizienz beizutragen. Ein Großteil der Schäume findet in Form von Wärmedämmung im Bausektor Anwendung. Die Zahl der Auftragseingänge im Bauhauptgewerbe steigt seit 2008 stetig an und erreichte im Januar 2019 den höchsten Stand seit 1999 [2]. Dieser Trend war auch im ersten Quartal 2018 durch einen Anstieg von 4 % im Nettoproduktionsindex im Bereich "Baubedarf" sichtbar [3]. Zudem führen steigende strengere gesetzliche Vorgaben und wachsende Energiekosten dazu, dass die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmung eine immer größere Rolle spielt [4, 5].

Ein weiterer zunehmend bedeutsamer werdender Einsatzbereich von Leichtbaumaterialien ist der Automobil-, Maritim- und Luft- sowie Raumfahrtbereich. Bauelemente mit geschäumten Kernen, sogenannten Sandwichstrukturen, sind immer beliebtere Konstruktionsbestandteile, die geringe Eigengewichte bei gleichzeitig hervorragenden mechanischen Eigenschaften ermöglichen. Dementsprechend ist auch im Mobilitätssektor in besonderem Hinblick eine Produktionssteigerung von geschäumten Kunststoffen zu erwarten, was sich bereits an einem steigenden Produktionsindex im Fahrzeugbau seit 2015 bemerkbar macht [6].

Die Entwicklung geschäumter Kunststoffprodukte geht absehbar in Richtung reduzierter Rohdichte, bei möglichst unverändert guten langfristigen mechanischen bzw. thermischen Eigenschaften. Dadurch ergibt sich eine erhebliche Einsparung von Material und Gewicht. Dieser Trend wird durch stetige Forschung und Weiterentwicklung, wie z. B. durch nanozellulären Schaumstoffstrukturen mit Nanoverstärkungsstoffen möglich. Der Großteil von polymeren Schäumen wird im Extrusionsverfahren hergestellt [7]. Parallel mit der Entwicklung von neuen Schäumen steigt auch der Bedarf an einer inlinefähigen Messmethode, welche die Schaumproduktion kontinuierlich überwachen kann. Für die gleichbleibende Qualität der Endprodukte ist es entscheidend, die Prozessparameter während der Schaumextrusion in engen Grenzen einzuhalten [8]. Derzeit werden die extrudierten Schäume lediglich stichprobenartig, zeitaufwändig und teilweise zerstörend im Labor charakterisiert. Im Hinblick auf die fortschreitende Digitalisierung und der digitalen Vernetzung nach Industrie 4.0 entsteht ein immer höherer Erwartungsdruck an die Qualität und Kosten von Inline-Messsystemen. Bislang ist in der industriellen Praxis kein messtechnisches Konzept bekannt, welches inline im laufenden Prozess Informationen über den zellulären Aufbau sowie der Rohdichte von Schaumstoffstrukturen liefern kann. Die Luftultraschall (LUS)-Technologie hat das Potential, diese Messaufgabe zu lösen. Sie befindet sich aktuell auf dem Weg von der Laboranwendung hin zum industriellen Einsatz. Bedingt durch die hohe Relevanz von geschäumten Kunststoffen und dem damit verbundenen Optimierungspotenzial besteht ein entsprechend großes wirtschaftliches Interesse an der Erprobung der LUS-Technologie zur Prozessüberwachung in der Schaumextrusion. In Abbildung 1 ist schematisch die Anordnung eines LUS-Messkopfes in Transmissionsanordnung am Ende einer Extrusionsanlage über einem formstabilen extrudierten Polymerschaum dargestellt.



Abbildung 1: Schematische Messanordnung in Transmission eines LUS-Messkopfes am Ende einer Extrusionsanlage zur Messung der wichtigsten Kenngrößen von polymeren Schäumen.

Kommerziell verfügbare LUS-Systeme, die in Deutschland ausschließlich von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) angeboten werden, können dazu beitragen diese Lücke zu schließen. Weltweit haben sich bisher sieben Systemanbieter auf dem Markt etabliert, wobei vier der Anbieter aus Deutschland kommen (SONOTEC GmbH, inoson GmbH, Ingenieurbüro Dr. Hillger und NetCo Professional Services GmbH). Aufgrund der Bekanntheit des konventionellen Ultraschalls und zahlreicher existierender gesetzlicher und industrieller Normen ist eine erhöhte anwenderseitige Akzeptanz gegenüber dieser neuen Technologie zu erwarten.

1.2 Problemstellung

Das SKZ erreichen kontinuierlich Anfragen aus der Industrie bezüglich messtechnischer Fragestellungen zu Schäumen. Besonders großes Interesse besteht in einer inlinefähigen Messtechnik zur Prozesskontrolle, welche Aussagen über die Rohdichte, die Zellgröße und die zelluläre Struktur zulässt.

Die angestrebten Forschungsergebnisse können wegweisend für die Industrie sein. Eine kontinuierliche Prozesskontrolle der mittleren Zellgröße sowie der Rohdichte des extrudierten Schaumes ist ein entscheidender Beitrag, um den Ausschuss während der Schaumherstellung zu reduzieren und dadurch Kosten einzusparen. Zusätzlich gewährleistet eine 100 %-Prozesskontrolle, dass nur qualitativ einwandfreie Ware an den Kunden ausgeliefert wird. Kostspielige Fälle von Produkthaftung, Schadensersatz oder Reklamation können vermieden werden. Hauptkostenfaktor in der Kunststoffverarbeitung ist der Materialeinsatz. Eine kontinuierliche Überwachung der Rohdichte eines extrudierten Schaumes ermöglicht eine Produktion am unteren Limit der Toleranz, was die Materialkosten minimiert. Beispielsweise ließen sich durch eine Materialeinsparung von nur einem Prozent bei einer Anlage mit einer Ausstoßleistung von 1.000 kg/h und einer Betriebszeit von 8.000 Stunden pro Jahr bei gängigen Schaummaterialien mit einem Materialwert von 1,50 €/kg Kosten in der Größenordnung von 120.000 € pro Jahr einsparen. Zusätzlich betragen erfahrungsgemäß die Folgekosten im Kunststoffbereich, die durch eine Auslieferung einer nicht erkannten Schlechtware entstehen, das 20- bis 100-fache der ursprünglichen Produktionskosten. Aufgrund der geringen Produktwerte der Schaummaterialien und deren oftmals geringen Sicherheitsrelevanz wird von Folgekosten in Höhe der fünf- bis zehnfachen Produktionskosten ausgegangen. Wird bei dem oben aufgeführten Beispiel eine Reklamationsquote von 0,1 % angenommen, entstehen schon bei einer Anlage vermeidbare Folgekosten i. H. von etwa 12.000 € pro Jahr. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die Anschaffungs-, Betriebs- und Schulungskosten, die im mittleren fünfstelligen Bereich liegen, innerhalb kürzester Zeit, spätestens jedoch bereits nach einem Jahr, amortisieren und gleichzeitig das Qualitäts- und Nachhaltigkeitsniveau der Firmen signifikant steigt.

Schaumkenngrößen wie die Zellgrößenverteilung werden standardmäßig mittels Mikroskopie anhand einer Stichprobenentnahme ermittelt. Wird nach der Untersuchung des Schaumes eine fehlerhafte Zellgröße oder Rohdichte festgestellt, müssen Produktionsparameter geändert und angepasst werden. Durch Inline-LUS-Technik können sofort abweichende Schaumkenngrößen ermittelt und der Produktionsprozess umgehend angepasst werden, was eine signifikante Zeitersparnis bedeutet und Maschinenkosten, enorme Mengen an Rohmaterial sowie Arbeitsressourcen einspart.

1.3 Zielsetzung

Die systematische Untersuchung der Möglichkeiten der Prozessüberwachung von geschäumten Polymeren stellt auch für die Ultraschall-Systementwickler einen wertvollen Wegweiser für zukünftige Produktentwicklung dar und bietet Argumentationshilfen bei der Finanzierung und dem kommerziellen Vertrieb neuartiger LUS-Systeme. KMU tragen einen großen Teil bei der Einführung neuer innovativer Produkte bei und nehmen somit eine Schlüsselrolle ein. Deutschland- und europaweit wird der LUS-Markt ausschließlich von KMU dominiert. Eine erfolgreiche Umsetzung zur Prozessüberwachung und Qualitätskontrolle in der Polymerschaumextrusion würde diesen Unternehmen neue Absatzmärkte eröffnen. Bei Erreichung der Projektziele wird die Anzahl der LUS-Systemanbieter erwartungsgemäß zunehmen und der Umsatz der bestehenden LUS-Anbieter steigen. Es kann momentan davon ausgegangen werden, dass jährlich 30 LUS-Systeme im Wert von etwa 50.000 € bundesweit verkauft werden. Können Polymerschäume mittels der LUS-Technik inline charakterisiert werden, kann mittelfristig mit einem jährlichen Verkauf von 100 LUS-Systemen gerechnet werden. Durch die größere Anzahl verkaufter Systeme wird der Preis pro Gerät deutlich sinken, wodurch eine Anschaffung für Endanwender finanziell attraktiver wird, was zu einer Multiplikatorwirkung führt. Durch den größeren Umsatz würden auch Zulieferer, wie beispielsweise die Hersteller von Schallwandlern oder rauscharmen Verstärkern, profitieren.

2 Stand der Technik

2.1 Messtechnik zur Prozessüberwachung in der Schaumextrusion

Zur Prozessüberwachung in der Schaumextrusion werden heute unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Keines der nachfolgend vorgestellten Verfahren ermöglicht jedoch eine Bestimmung der Rohdichte sowie der Zellgrößen im Rahmen einer Inline-Prozessüberwachung, wie sie in dem vorliegenden Forschungsvorhaben angestrebt ist.

Optische Analysen mit Kamerasystemen im sichtbaren Bereich erlauben die Charakterisierung der zellulären Strukturen an der Bauteiloberfläche. Hierbei finden verschiedene Beleuchtungsszenarien mit unterschiedlichen Beleuchtungsquellen und Einstrahlwinkeln auf der Oberfläche sowie eine automatisierte Auswertung Anwendung. Nachteilig ist, dass keine Informationen aus dem Bauteilinneren gewonnen werden können und auch Oberflächeneigenschaften wie Farbe, Struktur und ggf. vorhandene Schlieren einen industriellen Einsatz limitieren [9, 10].

Durch Verwendung der Computertomographie (CT) können polymere Schäume volumetrisch analysiert werden [11]. Je nach Auflösung des CT-Gerätes können dabei Zellgrößen bis in den µm-Bereich charakterisiert werden. Eine Herausforderung besteht dabei, die Zellen zu trennen bzw. die Zellwände darzustellen [12, 13]. Von Nachteil ist, dass die System- und Wartungskosten im mittleren sechsstelligen Bereich liegen, ionisierende Strahlung höhere Anforderungen an den Arbeitsschutz als US erfordern und die Messund Rekonstruktionsdauer häufig im Minuten- bis Stundenbereich je Probeliegt.

Die Fotometrie ist eine Inline-Messmethode, welche sich zur Charakterisierung von disperseren Materialsystemen, wie etwa mit Treibmittel beladene Kunststoffschmelzen eignet [14]. Das Verfahren bedient sich monochromatischer Laserstrahlung oder polychromatischer Lichtquellen im sichtbaren bis ultravioletten Spektralbereich. Durch Detektion der mit den Gasbläschen in Wechselwirkung getretenen Strahlung kann die Schmelze charakterisiert werden. Die am Markt verfügbaren Fotometrie-Systeme werden hauptsächlich zur Detektion von Störpartikeln bei der Beimischung von Zuschlagsstoffen während der sog. Compoundierung eingesetzt [15, 14].

Die vorwiegende Anwendung der Nahinfrarot (NIR)-Spektroskopie zur Prozessüberwachung in der Kunststoffverarbeitung liegt vor allem in der Inline-Detektion von Füllstoffgehalten [14]. Im Bereich der Schaumextrusion wurde bislang von einer Inline-Überwachung der Treibmittelkonzentration berichtet [16], wobei eine Genauigkeit von 0,2 Gew. % erreicht werden konnte [17]. Nachteilig ist, dass die Anwendung auf Schmelzen beschränkt ist und dabei im Gegensatz zur geplanten LUS-Methodik nicht das fertige, d. h. geschäumte Endprodukt charakterisiert.

Zur Inlinebestimmung der Dichte haben sich Flächengewichtsmessung über Isotopenstrahler durchgesetzt [18]. Diese stellen den aktuellen Stand der Technik dar und erfordern den Einsatz von Krypton 85, Strontium 90 oder Promethium 147. Alle diese drei Substanzen sind hinsichtlich ihrer Gewinnung, Anwendung und Entsorgung aus umwelttechnischer Sicht als sehr kritisch im Vergleich zur LUS-Technik zu bewerten. Zusätzlich muss bei diesen stets der Kostenaufwand aufgrund bestehender Halbwertszeiten berücksichtigt werden. Diese beträgt etwa bei Promethium 2 Jahre und bei dem marktdominierenden Krypton 85 10 Jahre. In dieser Zeit sinkt die Aktivität auf 50 %, was mit einer kontinuierlichen Nachregelung der Messtechnik und entsprechend hohen Wartungskosten bzw. Austauschkosten verbunden ist. Weiterhin können keinerlei Informationen über den zellulären Aufbau gewonnen werden.

In einem am SKZ abgeschlossenen IGF-Forschungsvorhaben mit der Nr. 19127N wurde die Terahertz-(THz)-Technologie eingesetzt, um polymere Schäume zu charakterisieren [19]. Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Demonstrator konstruiert, welcher eine Polymerschaumextrusion an einer Extrusionslinie nachstellt. Die LUS-Technik zeigt entscheidende Vorteile gegenüber der THz-Technik, die das Anwendungsfeld stark erweitern. Zu diesen gehören:

- Deutlich geringere Systemkosten, die die Anwenderakzeptanz steigern
- Um den Faktor zehn höhere Messgeschwindigkeiten (Punktmessung THz: Unterer dreistelliger ms-Bereich; Punktmessung LUS: Einstelliger ms-Bereich)
- Höhere Industrietauglichkeit wegen größerer Robustheit (z. B. keine verschmutzungsanfälligen Optiken notwendig)
- Geringere Anfälligkeit gegenüber prozessbedingten Feuchten
- Höhere Anwenderakzeptanz, da Normen für den konventionellen US im Vergleich zur THz-Technik existieren.

Die US-Technologie ist prinzipiell zur Inline-Charakterisierung von mit Treibmittel beladenen Kunststoffschmelzen geeignet [7, 20, 21]. Diese Treibmittel führen außerhalb des Extruders durch Expansion zur Schaumbildung. Insbesondere besteht die Möglichkeit, über die Schallgeschwindigkeit den Treibmittelgehalt in der Polymerschmelze sowie die Dispergierung quantitativ zu bestimmen [22, 23, 14, 7]. Eine Auswertung der gemessenen US-Signale mittels neuronaler Netze lieferte bisher nur Anhaltswerte zur treibmittelbedingten und prognostizierten Schaumdichte. Eine direkte Messung des extrudierten Schaumes mit US-Techniken konnte aufgrund der hohen Dämpfung und Streuung der akustischen Wellen nicht realisiert werden.

2.2 Grundlagen des luftgekoppelten Ultraschalls

In diesem Abschnitt werden Grundzüge der Ultraschallprüfung und der Prüfung mittels luftgekoppelten Ultraschalls im Speziellen erläutert werden.

Ausbreitung von Ultraschall

Als Ultraschall bezeichnet man mechanische Wellen mit Frequenzen oberhalb des hörbaren Schalls, also über 20 kHz. In Luft breitet er sich in Form von Longitudinalwellen (Kompressionswellen) aus. Im Grenzfall des unendlich ausgedehnten Festkörpers breitet sich Ultraschall in Form von Longitudinal- und Transversalwellen (Scherwellen) aus. An Grenzflächen kann bei schrägem Einfall eine Modenumwandlung zwischen diesen Wellenarten auftreten. In begrenzten Körpern ist die Ausbreitung komplexer: hier können geführte Wellen auftreten. Als Grenzfall sind hier die Schwingungen von im Vergleich zur Dicke lateral ausgedehnten Platten bedeutsam. Diese schwingen in Form von Plattenoder Lamb-Wellen. Diese Wellen sind dispersiv, d. h. sie weisen eine Frequenzabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit auf.

Luftultraschallprüfung

Die Luftultraschallprüfung eignet sich für eine Inline-Prüfung, weil sie sowohl zerstörungsfrei als auch berührungslos arbeitet. Grundlage sind mechanische Wellen, welche mit der Probe wechselwirken. Die Einkopplung durch die Luft macht dieses Verfahren messtechnisch anspruchsvoll, weil ein Großteil der Welle an den Grenzflächen Luft-Probe reflektiert wird. Aus diesem Grund sind neben angepassten Ultraschallwandlern eine leistungsfähige Sendeelektronik und eine empfindliche Empfangselektronik notwendig.

Verschiedene Messkonfigurationen wurden im Projekt genutzt. Zum einen wurde die Transmissionstechnik verwendet, bei denen die Probe zwischen Sender und Empfänger angebracht wird. Verschiedene einseitige Prüfmethoden wurden eingesetzt. Bei geeignetem Einschallwinkel wird eine Plattenwelle im Prüfkörper erzeugt, die bei ihrer Ausbreitung auch kontinuierlich an die Luft koppelt und mit einem Sender empfangen werden kann.

Die Schallwelle wechselwirkt mit Inhomogenitäten des Körpers. Inhomogenitäten sind hierbei Bereiche unterschiedlicher Schallkennimpedanz. Die Beschreibung dieser Prozesse ist komplex. Da hierbei auch umfangreiches Wissen über die räumliche Verteilung der Streuer notwendig ist, scheint es nicht sinnvoll, eine Charakterisierung auf grundlegenden physikalischen Modellen der Schallausbreitung basieren zu lassen. Vielmehr wurden im Projektverlauf nach empirischen Korrelationen zwischen Schallsignalen und Schaumeigenschaften gesucht.

Prüfdaten und ihre Analyse

In der Transmissionsmessung werden für jeden Scan-Punkt sogenannte A-Bilder gemessen. Dies sind Zeitreihen von elektrischen Signalen, die proportional dem Schalldruck sind. Diese Datensätze sind sehr umfangreich und werden auch "Volumendatensätze" genannt. Der Volumendatensatz bietet den Ausgangspunkt weiterer Analysen. Prüfbilder können erzeugt werden, indem bestimmte Informationen aus den A-Bildern farblich codiert für jeden Scanpunkt dargestellt werden. C-Bilder entstehen, wenn die z. B. Maxima der A-Bilder dargestellt werden. D-Bilder, also Darstellungen zur zeitlichen Lage des Maximums, wurden im Projekt nicht betrachtet. Dür die genannten Prüfbilder wird nur ein Zeitbereich der A-Bilder mit dem unmittelbaren durch die Probe beeinflussten Schallpuls betrachtet. Dieser Zeitbereich wird im Sprachgebrauch der Ultraschallprüfung "Blende" genannt. Es ist auch möglich, Scans entlang einer Linie durchzuführen. Wird dann das Ultraschallsignal selbst (also mit positiven und negativen Auslenkungen) entlang der Scanposition farblich codiert dargestellt, entsteht ein sogenanntes B-Bild. In diesem kann die Ausbreitung der Ultraschallwelle gut verfolgt werden, was insbesondere für geführte Wellen relevant ist.

Im Schallsignal sind grundsätzlich alle Wechselwirkungen der Schallwelle entlang des Schallwegs der Welle enthalten, wodurch sich ein eingeschallter Puls nach Durchlauf durch die Probe deutlich verändert. Die Schwierigkeit besteht darin, aus den Eigenschaften des transmittierten Pulses auf die Ursachen für seine Gestalt zu schließen. Um Muster in den A-Bildern mit Eigenschaften der Schäume zu korrelieren, können relativ einfach bestimmbare Signal-Merkmale wie z. B. die maximalen Amplituden oder charakteristische Zeiten herangezogen werden. So wurde beispielsweise versucht, die Transmissionszeiten zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten zu nutzen. Aufgrund der im Luftultraschall zeitlich sehr ausgedehnten Pulse mussten hierfür Algorithmen entwickelt werden. Es ist zu erwarten, dass durch die räumliche Verteilung von Poren und ihrer Größenverteilung die Signale komplex, d. h. im Zeit- und Frequenzbereich beeinflusst werden. Eine physikalische Modellbildung für die Beschreibung der Signale wäre nur für sehr eingeschränkte Materialsysteme zu erarbeiten. Aussichtsreicher erscheint es deswegen, die Daten automatisiert nach Strukturen zu durchsuchen und die gefundenen Merkmale mit Schaumeigenschaften zu korrelieren. Hierzu wurden Methoden des Maschinellen Lernens eingesetzt.

2.3 US-Prüfung von porösen Materialien

Erfahrungen des SKZ und recherchierte Literatur belegen, dass die zelluläre Struktur von Schäumen zu einer streubedingt sehr stark ausgeprägten Dämpfung von Schallwellen führt [24, 25]. Aus diesem Grund werden Schäume oftmals zur akustischen Isolierung von Räumen oder Maschinen eingesetzt. Mit steigender Prüffrequenz nimmt auch die Streuung der Schallwellen und somit die Dämpfung des Signals zu. Daher eignet sich ausschließlich der Frequenzbereich unter 800 kHz zur Charakterisierung von nahezu allen am Markt verfügbaren Schäumen. Genau in diesem Frequenzbereich liegt auch die eingesetzt LUS-Technik, wohingegen berührender Kontaktultraschall vorrangig im Frequenzbereich größer als 1 MHz eingesetzt wird. Letzteres erlaubt daher physikalisch bedingt lediglich Eindringtiefen von wenigen Milli- bis Zentimetern. Wird zusätzlich die berührungsfreie und damit deutlich verschleiß- sowie wartungsärmere Luftankopplung berücksichtigt, so erscheint die LUS-Technik für die vorliegende Aufgabenstellung prädestiniert zu sein.

2.4 Pulskompression

Die Pulskompression ist eine Signalverarbeitungstechnik, die insbesondere in den Bereichen Radar und Sonar schon seit Jahrzehnten Anwendung gefunden hat [26, 27], sich aber beispielsweise auch auf US-Verfahren oder die Thermographie übertragen lässt. Anstelle von kurzen Signalpulsen werden dabei längere, modulierte Sendesignale verwendet, welche linear oder nichtlinear zwischen einer Start- und einer Endfrequenz (Bandbreite) variieren. Durch Korrelation der empfangenen Daten mit dem Sendesignal, mit sog. Matched-Filtern, lässt sich anschließend eine deutliche Verbesserung des Signal-zu-Rausch Verhältnisses sowie der zeitlichen Auflösung erzielen [28, 29, 30, 31, 32, 33]. Als Signalform werden bei der Pulskompression häufig frequenzmodulierte Signale wie etwa Chirps oder phasenmodulierte binäre Signale wie etwa Golay-Codes, Barker-Codes oder pseudozufällige Sequenzen eingesetzt [34, 35, 36, 37, 38].

Bei der Verwendung von Golay-Codes bietet eine einzelne Golay-Sequenz bereits sehr gute Autokorrelationseigenschaften, führt also zu hohen und schmalen Signalen nach der Korrelation. Sie weist jedoch noch sogenannte Nebenkeulen, kleinere Signalmaxima neben dem Hauptmaximum, auf. Diese Nebenkeulen können bei der Verwendung von komplementären Golay-Code Paaren stark minimiert werden. Weiterhin bestehen Golay-Codes (aber auch Barker-Codes und pseudozufällige Sequenzen wie z. B. Maximum Length Sequences) aus binären Zahlenfolgen. Da es für die Senderhardware im Regelfall nicht praktikabel ist, solche Signale auszusenden, lässt sich die Möglichkeit der Phasenmodulation nutzen, bei der z. B. zwei zueinander um den Faktor Pi verschobene Sinusschwingungen, welche eine binäre 0 bzw. 1 repräsentieren, genutzt werden [39]. In Simulationen hat sich gezeigt, dass Chirps einen Vorteil bieten, wenn die Bandbreite des Systems kleiner ist als dessen Zentralfrequenz. Liegt hingegen ein breitbandigeres System vor, so führen binäre Codes zu besseren Ergebnissen [36].

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgte eine enge Zusammenarbeit zwischen der Forschungszentrum Ultraschall gGmbH (FZU) und der SKZ - KFE gGmbH (SKZ). Um das Forschungsziel zu erreichen, wurden folgende Schritte unternommen:

Zunächst wurden die Polymerschäume offline mit Methoden wie Mikroskopie, CT und Dichtemesssungen durch Messen und Wiegen charakterisiert. Diese Messungen dienten als Referenz für die späteren Arbeiten. Anschließend erfolgte der Aufbau und die Inbetriebnahme des Demonstrators als LUS-Messstand am SKZ.

Die Entwicklung von Methoden zur ultraschallbasierten Materialcharakterisierung von Schäumen stellte den anschließenden Arbeitsschwerpunkt dar. Dabei wurden zunächst die Laufzeit und die Amplitude der transmittierten Ultraschallwelle analysiert. Zur Laufzeitmessung wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher schließlich erlaubt, die Schallgeschwindigkeit der Proben zu messen. Mit diesem Verfahren wurden Untersuchungen am Demonstrator durchgeführt. Die Amplitudenmessungen wurden eingesetzt, um Korrelationen zu den Schaumeigenschaften herzustellen. Dies gestaltete sich jedoch als schwierig. Deswegen wurden auch Ansätze des Maschinellen Lernens getestet, um Klassifizierungsaufgaben an den Schäumen vorzunehmen. Hierbei wurden die vollständigen Zeitreihen des transmittierten Signals analysiert. Es konnte dabei gezeigt werden, dass dieser Ansatz erfolgversprechend und ausreichend schnell für einen Inline-Einsatz ist. Neben den umfangreichen Untersuchungen zur Datenanalyse wurden auch fortgeschrittene Ansätze zur Ultraschallmessung wie die sog. Schrägdurchschallung verfolgt. Hierbei konnten erste Erkenntnisse zur Gestalt der Signale, zur Anregbarkeit von Plattenwellen und Signaloptimierung gewonnen werden. Schließlich wurden Pulskompressionsmethoden an den Schäumen getestet, um ihre Eignung für die Prozess- und Qualitätsüberwachung zu untersuchen.

4 Ergebnisse

4.1 Offline-Charakterisierung der Schaumkenngrößen

Es wurden verschiedene Verfahren zur Bestimmung von Referenzkennwerten der Polymerschäume herangezogen. Mittels Wiegen von Proben bekannter Geometrien wurden deren Rohdichten ermittelt. Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte war die THz-Zeitbereichsspektroskopie, wobei das TERA K15 der Fa. Menlo Systems GmbH verwendet wurde. Hierbei wurde auf die Ergebnisse des bereits abgeschlossen IGF-Forschungsprojektes 19127 N zurückgegriffen, bei welchen ein Zusammenhang zwischen dem sog. Brechungsindex und der Rohdichte hergestellt wurde. Zusätzlich wurde mit dieser Messtechnik durch Auswertung der frequenzabhängigen Streuung der THz-Wellen eine mittlere Zellgröße ermittelt. Eine weitere Referenzmethode zur Bestimmung der Zellgröße war die Mikroskopie. Hierzu wurde das Digitalmikroskop VHX 5000 der Firma Keyence Deutschland GmbH benutzt, welches durch automatische Bildverarbeitungsverfahren eine automatische Zellgrößenberechnung ermöglichte.



Abbildung 2: Lichtmikroskopische Aufnahme des PUR-Schaumes Dimer Collar 2275 (rechts) und automatisierte Bildverarbeitung (links).

Zuletzt wurde die CT als weitere Referenzmethode zur Bestimmung der Zellgrößenverteilung eingesetzt. Mit der Schaumanalyse-Toolbox der Software VGSTUDIO der Fa. Volume Graphics GmbH konnte eine Zellgrößenverteilung berechnet werden. Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Auswertung der Referenzmessungen der PUR-Schäume Gaugler & Lutz RG 40 (links) und RG 200 (rechts) mit der Toolbox. Tabelle 1 fasst die gemessenen Zellgrößen der PUR-Schäume des Hersteller Gaugler & Lutz zusammen, wobei ein Zusammenhang zwischen der Zellgröße und der Dichte zu bestehen scheint. So ist die Zellgröße bei geringeren Dichten größer als bei höheren Dichten.

Um die Herstellerangaben der Dichte zu überprüfen, wurden Messungen durch Volumenbestimmung mittels geometrischer Messungen und Massebestimmung durch Wiegen durchgeführt und damit die Dichte bestimmt. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Dichtebestimmung, wobei auffällt, dass die Herstellerangaben teilweise stark von den gemessenen Werten abweichen. Bei der Probe mit der Herstellerangabe von 60 kg/m³ könnte eine falsche Herstellerangabe zu der großen Abweichung zum gemessenen Wert geführt haben.



Abbildung 3: Referenzmessungen der PUR-Schäume Gaugler und Lutz RG 40 (links) und RG 200 (rechts) mittels CT.

Hersteller	Ma- terial	Dichte in kg/m ³	Zellgröße (CT) in µm
Gaugler & Lutz	PUR	33	461 ± 152
Gaugler & Lutz	PUR	40	346 ± 107
Gaugler & Lutz	PUR	50	379 ± 112
Gaugler & Lutz	PUR	60	341 ± 111
Gaugler & Lutz	PUR	100	249 ± 84

Tabelle 1: CT-Messungen der Zellgröße von PUR-Schäumen des Herstellers Gaugler & Lutz.

Gaugler & Lutz	PUR	200	168 ± 26

Tabelle 2: Messungen der Dichte mittels geometrischer Messungen und Massebestimmung durch Wiegen von PUR-Schäumen des Herstellers Gaugler & Lutz.

Hersteller	Material	Dichte in kg/m ³ (Herstellerangabe)	Gewicht (g)	Volumen (mm³)	Dichte (kg/m ³)
Gaugler & Lutz	PUR	30	3,60	96150	37,34
Gaugler & Lutz	PUR	50	4,81	99233	48,97
Gaugler & Lutz	PUR	60	9,44	90989	105,27
Gaugler & Lutz	PUR	100	10,80	101188	106,64
Gaugler & Lutz	PUR	145	14,13	98911	141,13
Gaugler & Lutz	PUR	200	19,60	98098	199,09

4.2 Aufbau und Inbetriebnahme des Demonstrator-Prüfstandes

Zur Nachstellung einer Extrusionslinie im Labormaßstab wurde der in dem IGF-Projekt 19127 N entwickelte Demonstrator-Prüfstand genutzt und für die Luftultraschall (LUS)-Technologie und geplante Messanordnungen angepasst. Es wurde eine Konstruktion für die Messkopfhalterung ausgelegt sowie notwendige Anpassungen der Elektronik und Sensoransteuerung durchgeführt. Um verschiedene Proben in kurzer Zeit zu messen sowie die Vorschubgeschwindigkeit bei der Extrusion nachzustellen, wurden zwei verschiedene Messanordnungen hinsichtlich der Probenhaltern umgesetzt.

In Abbildung 4 ist der umgebaute Demonstrator dargestellt. Der Messaufbau wurde so konstruiert, dass sowohl Messungen in Re-Emissions- als auch in Transmissionsanordnung möglich sind.



Abbildung 4: LUS-Demonstrator mit der Messanordnung in Re-Emission.

Für die zwei geplanten Probenaufbauten wurden PVC-Platten mit einer Wasserstrahlschneidanlage zu den entsprechenden Probenhaltern zurechtgeschnitten. Abbildung 5 zeigt links den Aufbau, der zwölf Schaumproben mit einer Kantenlänge von 10 cm aufnehmen kann. Rechts ist der Aufbau dargestellt, der den kontinuierlichen Vorschub bei der Extrusion simuliert, indem ein großes Schaumstück mit einem Durchmesser von 70 cm während einer kontinuierlichen Drehung gemessen wird. Um Störsignale zu minimieren, wurden die Halterungen der Wandler aus Aluminium gegen additiv gefertigte Halterungen aus Kunststoff ausgetauscht (nicht in Abbildung 1 zu sehen). Die Steuersoftware wurde auf beide Messaufbauten angepasst.



Abbildung 5: Messaufbau zur Messung mehrerer Schaumproben (links) und einer einzelnen Schaumprobe (rechts) zur Simulation eines kontinuierlichen Vorschubs bei der Extrusion.

4.3 Messungen in Re-Emission

Um zu überprüfen, ob ein einseitiger Probenzugang für die Bestimmung der Schaumparameter genügt, wurden Messungen in Re-Emission durchgeführt. Abbildung 6 zeigt den Messaufbau, wobei in diesem Fall der gelbe Schaum gemessen wurde. Der schwarze Schaum gewährleistet, dass nicht versehentlich der Direktschall, der auf kürzestem Wege durch die Luft transmittiert wird und keine Probeninformationen beinhaltet, gemessen wird. Bei allen Messungen wurden unterschiedliche Winkelstellungen der Wandler relativ zur Probenoberfläche getestet, um die winkelabhängige Einkopplung geführter Wellen zu maximieren.



Abbildung 6: Messaufbau zu Messungen in Re-Emission. Der schwarze Schaumblock dient zur Abschirmung des Direktschalls.

Um Zusammenhänge in den durchgeführten Messungen zu erkennen, wurden die Schäume in "messbar" und "nicht messbar" eingeteilt und jeweils die Dicke gegen die Rohdichte und die Zellgröße gegen die Rohdichte aufgetragen (siehe Abbildung 7). Daraus lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen:

- PVC-Schaum insgesamt gut messbar
- PU-Schaum ist insgesamt gut messbar
- PE- Schaum ist bei geringen Dicken und Zelldurchmessern besser messbar
- PET- Schaum ist besser bei größerer Dicke bzw. größerer Rohdichte und geringerem Zelldurchmesser messbar



Abbildung 7: Messbare und nicht messbare Schäume in Re-Emission, wobei in den oberen beiden Abbildungen die Dicke gegen die Rohdichte aufgetragen ist und in den unteren beiden Abbildungen die Zellgröße gegen die Rohdichte.

4.4 Messung der Schallgeschwindigkeit und der Signalamplitude

4.4.1 Entwicklung eines Auswertealgorithmus

Ein einzelner A-Scan zeigte ein starkes Rauschen im Bereich des Signalanfangs, weshalb zunächst mehrere A-Scans (500 bis 1000) gemittelt wurden und anschließend ein Fit über das Signal erstellt wurde (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9). So konnte der Einfluss der limitierenden Abtastrate des Signals reduziert werden. Die Schallgeschwindigkeit wurde mithilfe der sog. Methode des ersten Nulldurchgang bestimmt. Dabei wird zunächst das Verhältnis aus dem ersten sichtbaren Maximum und dem darauffolgenden Minimum des Signals ohne Probe bestimmt. Die Bestimmung bei einer Messung durch Luft dient dazu, dieses Verhältnis einfacher bestimmen zu können als bei einer Messung durch eine Probe. Dieses Verhältnis wurde anschließend in der Messung durch die Probe gesucht und der Nulldurchgang zwischen diesem Maximum und Minimum als ersten Nulldurchgang definiert.



Abbildung 8: Signalanfang eines einzelnen A-Scans durch eine Schaumprobe. Zu erkennen ist ein Rauschen, das dem Signal überlagert ist und die diskrete Abtastung des Signals.



Abbildung 9: Signalanfang eines über 500 Bilder gemittelten A-Scans, wobei an die Messdaten ein Fit gelegt wurde. Markiert sind die ersten Extrema sowie der erste Nulldurchgang, der sich aus dem Verhältnis der Maxima und Minima ergibt.

4.4.2 Messungen mit dem Demonstrator-Prüfstand

Zunächst wurde bei den durchgeführten Messungen der Fokus auf zwei Materialsysteme mit geschlossenen Poren gelegt: ein Schaum aus Polyurethan (PUR) der Firma Gaugler & Lutz GmbH & Co. KG sowie ein Schaum aus Polyethylen (PE) der Firma Hildebrand und Richter & Co. Fabrik für technische Gummi- und Kunststoffspezialitäten GmbH. Beide Schäume werden in unterschiedlichen Rohdichten angeboten. Es wurde in Transmissionsanordnung gemessen, wobei bei langsamer Drehung des Demonstrators je Probe 1.000 A-Bilder aufgenommen und ausgewertet wurden. Für jede Rohdichte wurden jeweils drei Probekörper gemessen.

Es zeigte sich, dass der Fokus zunächst nicht auf die absolute Bestimmung konkreter Parameter wie die Rohdichte oder die Zellgröße gelegt werden sollte, sondern vielmehr auf die Unterscheidung unterschiedlicher Materialien innerhalb eines Materialsystems (z. B. Unterscheidung von RG 30 zu RG 100). Nach Rücksprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss spiegelt dies auch die Bedürfnisse der Industrie wider, da nur bei sehr wenigen Anwendern eine unabhängige Einstellung von Rohdichte und Zellgröße überhaupt möglich und auch notwendig ist. Daher zielte die Auswertung der Messungen zunächst darauf ab, die Schäume anhand der Schallgeschwindigkeit im Schaum oder der maximalen Schallamplitude zu unterscheiden und systematische Zusammenhänge zu erkennen. Abbildung 10 zeigt die Schallgeschwindigkeit und maximale Schallamplitude der PUR Schäume in Abhängigkeit der gemessenen Rohdichte. Die Kontrolle der Herstellerangabe der Rohdichte durch Messen und Wiegen zeigte, dass diese von der gemessenen Rohdichte teilweise signifikant abweicht. Zu sehen ist, dass mit zunehmender Rohdichte die Schallgeschwindigkeit zunimmt; ein systematischer Zusammenhang ist im untersuchten Bereich erkennbar. Die maximale Schallamplitude verhält sich entgegengesetzt und wird niedriger bei steigender Rohdichte. Abbildung 11 zeigt die Zusammenhänge für die PE-Schäume. Auch hier ist ein Zusammenhang zwischen steigender Rohdichte und fallender maximaler Schallamplitude zu erkennen. Die Messungen der Schallgeschwindigkeit deuten jedoch keinen systematischen Zusammenhang zwischen dieser und der Rohdichte an. Dies könnte auf einen Zusammenhang mit der Zellgrößenverteilung andeuten, da die Referenzmessungen für die PUR-Schäume eine Abhängigkeit der Zellgröße von der Rohdichte zeigten, bei den PE-Schäumen die Zellgrößen bei unterschiedlichen Rohdichten aber ungefähr gleich waren.



Abbildung 10: Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit (links) und der maximalen Schallamplitude (rechts) von der Rohdichte der PUR-Schäume. Aufgetragen ist die gemessene Rohdichte.



Abbildung 11: Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit (links) und der maximalen Schallamplitude (rechts) von der Rohdichte der PE-Schäume.

4.4.3 Berücksichtigung von Rahmenbedingungen für das LUS-System

Um den Einfluss der Relativbewegung der Probe auf das Luftultraschallsignal zu untersuchen, wurden PUR Schäume der Firma Gaugler & Lutz GmbH mit unterschiedlichen Rohdichten bei mehreren Drehgeschwindigkeiten des Demonstrators in Transmissionsanordnung gemessen. Damit wurden sowohl unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten bei der Extrusion simuliert als auch das Auftreten von Vibrationen bei der Produktion, da diese bei hohen Geschwindigkeiten des Demonstrators ebenfalls zunehmen.

Die Messungen bei unterschiedlichen Drehgeschwindigkeiten des Demonstrators wurden hinsichtlich der Signallaufzeit und damit der Schallgeschwindigkeit in der Probe untersucht, wobei diese durch den ersten Nulldurchgang des Luftultraschallsignals bestimmt wurde. In Anlehnung eines praktischen Ansatzes wurden nicht einzelne A-Bilder ausgewertet, sondern 100 Messsignale gemittelt, was das Signal-zu-Rausch Verhältnis deutlich erhöht. Abbildung 12 zeigt die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in den Proben unterschiedlicher Rohdichte von der Drehgeschwindigkeit des Demonstrators und damit der Vorschubgeschwindigkeit bei der Extrusion. Es zeigt sich, dass kein systematischer Einfluss der Drehgeschwindigkeit auf die Schallgeschwindigkeit gegeben ist und das Messsignal damit robust sowohl gegenüber unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten als auch Vibrationen bei der Extrusion ist.



Abbildung 12: Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in PUR Schäumen unterschiedlicher Rohdichte (in kg/m³) von der Drehgeschwindigkeit des Demonstrators.

4.5 Auswertung der Transmissionsmessung mit Maschinellem Lernen

4.5.1 Datensatz

In einer Messreihe wurden die über 70 Schaumproben in Transmissionsanordnung gescannt. Hierbei wurde simultan mit einem Paar Ultraschallwandler mit 200-kHz Mittenfrequenz und einem weiteren Paar mit 300 kHz Mittenfrequenz gescannt. Für die Untersuchungen wurden die A-Bilder herangezogen. Tabelle 3 gibt einen Überblick über den verwendeten Datensatz.

Kürzel	Material	Anzahl Pro- ben	Anzahl A-Bil- der
A	PE, Polyethylen	17	109.356
В	PET, Polyethylenter- ephthalat	13	84.899
С	PUR, Polyurethan	25	104.061
D	PVC, Polyvinylchlorid	15	96.060
Е	(XPS, Extrudierter Po- lysterol	4	20.949

Tabelle 3: Datensatz für die Untersuchungen zum Maschinellen Lernen.

Bei den Untersuchungen fiel auf, dass einige Proben innere Strukturen wie Stege oder Waben aufweisen, die sich auch in den C-Bildern darstellten. In einigen Proben waren Löcher festzustellen (Bild), welche in Transmission eine gegenüber den anderen Probenbereichen deutlich überhöhte Schallamplituden aufwiesen. Ebenso wie die in Teilbereichen mit gemessenen Luftstrecken ohne Probe können diese Amplituden zur Übersteuerung führe. Für die Analyse der A-Bilder wurden solche Datenpunkte ausgeschlossen. Außerdem wurden die mitscannten Bereiche der Halterung aus der weiteren Analyse ausgeschlossen.



Abbildung 13: Ergebnis einer bildgebenden LUS-Messung. Es sind Löcher (hellgraues Punktmuster) in einem Schaum zu erkennen, die zu einer Übersteuerung des Empfangssignals führen.

Die Prüfungen wurden bei verschiedenen Verstärkungen durchgeführt. Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurden die Messdaten auf die Signalwerte ohne Verstärkung zurückgerechnet. Die Methoden des Maschinellen Lernens erfordern große Datenmengen zum Anlernen, weshalb A-Bilder herangezogen wurden. Für jede Probe lagen so mehre Tausend verwertbare Datensätze zur Verfügung.

4.5.2 Auswertung der Transmissionsamplitude

Die Transmissionsamplitude wurde bei den Proben bei einer Frequenz von 200 kHz bzw. 300 kHz gemessen. Der Probentyp A wurde wegen der diskutierten Löcher bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Zur Berechnung der Amplitude wurde der gemessene Schalldruck mit der Verstärkung in einen unverstärkten Pegel umgerechnet. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 14 zusammengestellt. Deutlich ist erwartungsgemäß zu erkennen, dass eine höhere Frequenz zu einer Reduzierung des transmittierten Schallpegels führt.



Abbildung 14: Schallpegel für verschiedene Probengruppen in Abhängigkeit von der Rohdichte. Es werden Messergebnisse bei 200 kHZ (volle Symbole) und 300 kHz dargestellt. Die Datensätze können durch ein Potenzgesetz (Fit) beschrieben werden, wobei der Fit der 200-kHz-Daten einen Exponenten von -1,6 und der Fit der 300-kHz-Daten einen Exponenten von -1,3 aufweist.

Weiterhin nimmt mit wachsender Rohdichte die Schallamplitude ab. Dabei wird sie noch von weiteren Parametern wie der Zellgröße beeinflusst, weshalb im weiteren Projektverlauf zusätzlich Ansätze auf Basis maschinellen Lernens [40] erprobt wurden.

4.5.3 Maschinelles Lernen als weiterer Ansatz

Merkmalsreduktion

Um die Analyse der zahlreichen A-Bilder vorzunehmen, wurden zunächst verschieden Ansätze zur Merkmalsreduktion erprobt. Als erster Ansatz wurden aus den varianznormierten A-Bildern die Einhüllende ermittelt. Aus dieser wurden verschiedene Parameter abgeleitet, unter anderem das Maximum und seine Lage, das Signal-Rausch-Verhältnis und das Integral der Einhüllenden. Diese definierten Features wurden dann zum Anlernen der Modelle mit den im nächsten Abschnitt beschriebenen Methoden genutzt.

Ein weiterer Ansatz bestand in einer automatisierten Feature-Ermittlung. Hierzu wurde eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt, bei der durch geeignete Linearkombinationen der Merkmalseigenschaften die Varianz der Daten maximiert wurde. Dadurch entstehen neue Merkmalskoordinaten und in der Regel reichen wenige davon aus, um den Großteil der Datenvarianz zu beschreiben. Eine weitere getestete Methode basierte auf Neuronalen Netzen.

Klassifikation

Zur Klassifikation der Daten wurden verschiedene Standardverfahren des Maschinellen Lernens eingesetzt. Damit eine Regression auch binäre Klassifikationen beschreiben kann, wird eine Transformation mittels einer sigmoiden Funktion durchgeführt. Diese Überlegung führt auf die Logistische Regression und erlaubt die Berechnung einer Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit zu einer Klasse.

Die Support Vector Machine (SVM) ist eine Methode zur Klassifikation, bei der in den hochdimensionalen Merkmalsraum algorithmisch trennende Hyperebenen eingefügt werden. Das führt auf ein numerisch lösbares Optimierungsproblem mit Nebenbedingungen. Gegebenenfalls kann die Trennung durch geeignete Transformation der Daten vereinfacht werden.

Die Methodik der Entscheidungsbäume trennt die Daten in einer binären Hierarchie schrittweise nach zweiwertigen Entscheidungen auf, um die Merkmale aus den Daten vorherzusagen. Die Methodik funktioniert auch für kontinuierlichen Merkmale, die entsprechend ihrer Größe aufgeteilt werden. Überanpassung muss dabei – wie bei allen Methoden des Maschinellen Lernens – ebenso wie zu viele Entscheidungsebenen vermieden werden. Um die Daten besser anzupassen, werden stattdessen Ensemble-Methoden verwendet. Im Gradient-Boosting werden sequentiell die verbleibenden Fehler der jeweils vorhergehenden einfachen Entscheidungsbäume korrigiert und führen so zu einem deutlich besseren Lernergebnis.

Convolutional Neural Networks zur Rohdichteschätzung

Für die Rohdichteschätzung wurden neben den bereits erläuterten Methoden lineare Regression und Gradient-Boosting-Regression auch die Convolutional Neural Network (CNN) Regression eingesetzt. Dieses Verfahren beruht auf künstlichen neuronalen Netzen. In Neuronalen Netzen (Abbildung 15) werden eine Eingabeschicht für die die Daten und eine Ausgabeschicht für die Zuordnung durch mehrere verborgene Schichten miteinander verbunden. Jedem Knoten des Modells wird ein Gewicht zugeordnet. Durch gewichtete Überlagerung der jeweils miteinander verbundenen Knoten werden über mehrere Zwischenstufen die Ausgabeschicht möglichst gut durch die eingegebenen Daten vorhergesagt, indem die Gewichte sukzessive angepasst werden.



Eingabeschicht

Abbildung 15: Schematische Darstellung eines neuronalen Netzes. In die Eingabeschicht werden die Signale zeitpunktweise eingespeist. Die gewichtete Überlagerung über mehrere verborgene Schichten ermöglicht die Zuordnung zu Klassen.

CNNs sind ein sehr leistungsfähiger Ansatz aus der Bildverarbeitung, der für die A-Bild-Daten adaptiert wurde. Die namensgebende Faltung (englisch Convolution) ist eine Operation, bei denen ein niedrigdimensionaler Kern genutzt wird, um eine lokal gewichtete Information einer Faltungsschicht (Convolutional Layer) zu erzeugen. Die Gewichte des Kerns werden im Anlernprozess ermittelt. Die Dimension der Resultate wird durch Pooling reduziert. Durch eine Abfolge von Faltungs- und Pooling-Schichten wird ein leistungsfähiges tiefes Netzwerk aufgebaut. Ein CNN ist auch Basis eines sogenannten Autoencoders, der zur Datenreduktion eingesetzt wurde (Abbildung 16). Hierbei besitzen Eingabe- und Ausgabeschicht – genannt Encoder bzw. Decoder – des Neuronalen Netzwerkes die gleiche Struktur. Zwischen ihnen ist eine verborgene Schicht mit deutlich weniger Variablen als in den Daten. Ziel des Anlernens ist es, dass der Decoder die gleichen Einträge wie der Encoder aufweist. Diese werden aber nunmehr durch die deutlich weniger Einträge der Zwischenschicht repräsentiert, womit eine erhebliche Datenreduktion verbunden ist.



Abbildung 16: Schematische Darstellung eines Autoencoders. Auf der linken Seite ist die Encoder-Schicht, auf der rechten Seite die Decoderschicht. Die verborgene Schicht bildet weist deutlich weniger Knoten als Decoder und Encoder auf, wodurch eine Datenreduktion erreicht werden kann.

Evaluation der Modelle

Zur Evaluation der Modelle wurde eine Kreuzvalidierung eingesetzt. Hierzu wurden die Modelle nur an einem Teil der Daten trainiert und mit dem anderen Teil die Güte des Modells geprüft. Der Datensatz der A-Bilder wurde dafür in Zehntel aufgeteilt und nacheinander jeweils ein anderes 1/10 der Daten zur Evaluation und die jeweils verbleibenden 9/10 zum Training genutzt. Die Qualität der Modelle kann dann über verschiedene Gütemaße beurteilt werden.

Ein Gütemaß für die Zuordnung von Klassen ist die Konfusionsmatrix, bei der die Anteile der Klassenzuordnungen und die wirklichen Klassen übersichtlich dargestellt werden.

4.5.4 Klassifizierung

Als eine erste Aufgabe zur Klassifizierung mit Maschinellem Lernen wurde getestet, ob direkt aus den A-Bildern eine Zuordnung zum Probentyp möglich ist. Die besten Ergebnisse sowohl bezüglich der Genauigkeit der Zuordnung als ach der Verarbeitungsgeschwindigkeit wurden mit dem Gradient-Boosting erzielt. Die zugehörige Konfusionsmatrix ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Label werden in Tabelle 3 erläutert. Die Klassifizierung ist mit dieser Methode auch schnell genug, um in einer Inline-Prüfung angewendet zu werden.



Abbildung 17: Konfusionsmatrix für die Zuordnung der Materialien aus den A-Bildern.

An diesen Datensätzen wurden auch Verfahren zur Datenreduktion wie oben beschrieben getestet. Die Beschränkung auf Features der A-Bilder führte zu keinen angemessenen Klassifikationsergebnissen. Wird die Datenreduktion jedoch algorithmisch mittels Hauptkomponentenanalyse oder Autoencoder durchgeführt, kann die Ergebnisqualität gesteigert werden. Mindestens 16 automatisch generierte Features repräsentieren dann die A-Bilder gut genug für eine geeignete Klassifikation, auch wenn der dadurch erzielte Geschwindigkeitsgewinn nur bei der Support Vector Machine nennenswert ist. Für die nachfolgend untersuchten Klassifizierungsaufgaben erwies sich der Einsatz der Datenreduktionsmethoden als nicht notwendig.

4.5.5 Rohdichteschätzung

Es ist grundsätzlich gelungen, die Rohdichte anhand der A-Bilder zu bestimmen. Hierbei erwies sich ein CNN den alternativ untersuchten Verfahren lineare Regression sowie Gradient-Boosting-Regression als deutlich überlegen. Deswegen werden nur die mit CNN gewonnenen Ergebnisse diskutiert. Es zeigte sich, dass eine Mittelung über mehrere A-Bilder die Genauigkeit der Ergebnisse erhöht. Hierbei wurden immer 100 zufällig gewählte A-Bilder zur Auswertung genutzt.

Für das Material PVC (Datensatz D in Tabelle 3) stand ein Sortiment von 15 Proben mit Rohdichten von 34 kg/m³ bis 250 kg/m³ zur Verfügung. Zur Beurteilung der Vorhersageergebnisse wurden von jeder Probe hundert zufällig gewählte Datenpunkte der Scans gewählt und die Vorhersagen statistisch als Box-Plot ausgewertet. Abbildung 18 zeigt, dass der Median der so prognostizierten Rohdichte um weniger als 5 Prozent von der Herstellerangabe abweicht. Das Material C zeigte eine sehr ausgeprägte Korrelation zwischen Rohdichte und Schallpegel (vgl. Abbildung 14). Bei anderen Materialien war die Methode weniger zielführend. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengestellt.



Relative Abweichung der Rohdichte für Material D

Abbildung 18: Rohdichtermittlung mit Maschinellem Lernen für PVC.

	Material				
	А	В	С	D	E
Rohdichtestufen	12	10	14	11	4
Relative Vorhersagegenauigkeit					
bis 5%	2	5	8	11	4
bis 10%	4	9	10	11	4
schlechter 10%	8	1	4	0	0

Tabelle 4: Vorhersagegenauigkeit der Rohdichte an unterschiedlichen Materialien.

Insgesamt scheint die Rohdichteermittlung mittels CNNs Potential für die Anwendung zu haben. Aufgrund der kleinen benötigten Rechenzeit ist die Vorgehensweise zudem inlinefähig. Der Grund für die materialabhängige Qualität der Vorhersagegenauigkeit konnte bisher nicht ermittelt werden, weshalb ein Folgeprojekt angestrebt wird.

4.6 Messungen in Schrägdurchschallung

Neben den Transmissionsmessungen wurden auch andere Messkonfigurationen wie die sog. Tilt-Anordnung (Abbildung 19) zur Charakterisierung der Schaumproben getestet. Durch die dabei genutzte Schrägeinschallung können bei dünnen Proben störende Echos bei geringen Entfernungen zwischen den US-Wandlern und der Probe vermieden werden. Die Schräganordnung kann abhängig von Einschallwinkel und Probeneigenschaften auch dazu führen, dass Plattenwellen angeregt werden.



Abbildung 19 Luftultraschallprüfung in Tilt-Anordnung. Sender und Empfänger sind schräg geneigt zueinander, wobei der Empfänger scannend bewegt wird.

Zunächst wurde der Einfluss des geänderten Einschallwinkels wurde untersucht, wobei der Ausgangszustand in Abbildung 20 dargestellt ist. Hier ist die gemessene Schallamplitude weitgehend symmetrisch um den Auftreffpunkt des Sendestrahls verteilt. Wird die Sender-Empfänger-Anordnung gedreht, so verändern sich die gemessenen ortsabhängigen Schallamplituden (Abbildung 20). Einerseits werden die Maxima bei der Scanposition 0 mm (gegenüber des Senders) mit zunehmendem Winkel kleiner. Andererseits zeigen sich bei Scanpositionen rechts dieses Punktes zusätzliche Maxima. Diese sind auf die Ausbreitung von Plattenwellen zurückzuführen, die sich zu positiven Scan-Positionen hin fortpflanzen.



Abbildung 20: Schallamplitude in Abhängigkeit von der Scanposition bei senkrechter Einschallung, in Tilt-Anordnung mit Schallwinkel 10° und 15°.

Bei den untersuchten Proben deutete sich die Tendenz an, dass der Einfluss der Plattenwellen desto höher ist, je größer die Rohdichte der Proben ist. Das könnte ein weiterer Ansatzpunkt für die Korrelation von Ultraschalldaten zur Rohdichte sein. Weitere Analysen zeigten, dass auch die Dicke der Proben einen Einfluss auf die Ausprägung der Plattenwellen hat. Ein Beispiel zeigt Abbildung 20. Es ist zu erkennen, dass für die dickere Probe die Amplitude sinkt. Das gilt aber nicht nur bei der direkten Welle in Durchschallung (Peak bei Scanposition 0 mm), sondern insbesondere auch für die danach ausgeprägten Plattenwellen. Je dicker die Proben sind, desto kleiner ist der Einfluss der Plattenwellen. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Plattenwellen stark dickenabhängig ist, wird ihre Anregbarkeit bei einem vorgegebenen Winkel von der Dicke beeinflusst. Für genauere Analysen sollten die Dispersionsbedingungen der Wellen berücksichtigt werden, was ebenfalls in einem Folgeprojekt untersucht werden soll.



Abbildung 21: Dickenabhängigkeit der Ausprägung der Plattenwellen

Die Wellenausbreitung kann mittels Laufzeitbildern sichtbar gemacht werden, indem abhängig von Scanposition und Zeitverlauf die Auslenkung der Welle farbcodiert wird. Ein Beispiel für solche Darstellungen ist in Abbildung 22 gegeben. Die sogenannten B-Bilder sind hier für einen Winkel von 0° und 10° visualisiert. In dieser Darstellung wurde der Farbraum zur Verdeutlichung nichtlinear verzerrt. Dadurch sind die Minima (rot) und Maxima (blau) der Welle gut zu erkennen. Diese sind durch Nullstellen getrennt. Die Welle kann so entlang der Nullstellen verfolgt werden, wodurch die Bestimmung der zeitlichen Position eines Nulldurchgangs für benachbarte Positionen ermittelt werden kann. Auf diese Weise wird die raum-zeitliche Ausbreitung der Phase quantifizierbar. Beispielhaft sind Ergebnisse dazu in Abbildung 23 dargestellt. Für große Entfernung vom Auftreffpunkt des Schallstrahles (>0) ist zu erkennen, wie sich eine Gerade ausprägt. Ihr Anstieg entspricht der Phasengeschwindigkeit der Plattenwelle. Hier lässt sich weiterer Forschungsbedarf ableiten, der in einem Folgeprojekt münden soll.



Abbildung 22:B-Bild für einen Einschallwinkel von 0° (links) bzw. 10° (rechts)



Abbildung 23: Beispielhafte Spurverfolgung in den B-Bildern der Messungen ohne Verkippung und in Tilt-Anordnung bei 5° und 10°.

4.7 Pulskompression

Bei Anwendung von Pulskompressionsverfahren zeigte sich vor allem die Anregung mit einem frequenzmodulierten Chirp als zielführend. Dabei wurden zunächst unterschiedliche breite frequenzmodulierte Chirps im Bereich der Mittelfrequenz der Wandler getestet, wobei durch Luft gemessen wurde (vgl. Abbildung 24). Wie erwartet nimmt die zeitliche Breite des frequenzmodulierten Signals mit zunehmender Bandbreite der Anregung zunächst ab. Ferner kann festgestellt werden, dass bei zu großer Bandbreite die zeitliche Breite des Signals wieder zunimmt. Dies lässt sich durch die endliche Bandbreite der Ultraschallwandler erklären: Frequenzen, die zu weit von der Mittelfrequenz entfernt sind, können von den Wandlern nicht mehr emittiert und detektiert werden, wodurch die Pulskompression keine sinnvollen Ergebnisse mehr liefert.

Die Messungen an den Schaumproben mittels frequenzmodulierten Chirps brachten eine Verbesserung in der Bestimmung des ersten Nulldurchgangs durch das stärker, zeitlich komprimierte Signal und damit einen genauer definierten Signalbeginn. Aufgrund der begrenzten Bandbreite der eingesetzten Schallwandler wurde die Verbesserung als für die folgenden Untersuchungen nicht wesentlich betrachtet. Die Entwicklung breitbandigerer Schallwandler, die ein deutlich größeres Verbesserungspotenzial aufweisen, sollen in einem Folgeprojekt entwickelt und näher untersucht werden. Phasenmodulierte Anregungssignale zeigten für den vorliegenden Anwendungsfall keine Verbesserung des Signals hinsichtlich Signal-zu-Rausch Verhältnis oder definiertem Signalbeginn.



Abbildung 24: Vergleich verschiedener frequenzmodulierter Chirp-Anregungen, gemessen durch Luft. Angegeben ist der Frequenzbereich des Anregungssignals.

5 Zusammenfassung

Im gemeinsamen Projekt ist es dem SKZ und FZ-U gelungen, grundlegende Beiträge zur Entwicklung eines Luftultraschall-Messstandes zur kontinuierlichen Prozessüberwachung in der Schaumproduktion zu leisten. Verschiedene Ansätze zur Luftultraschallcharakterisierung in Transmissionsanordnung und bei einseitiger Zugänglichkeit wurden verfolgt. Dabei zeigte sich, dass die Ultraschallcharakteristiken und die Schaumparameter auf komplexe Weise zusammenhängen, was einfache, auf die Laufzeit oder die Schallamplitude basierende Charakterisierungsverfahren, nur teilweise geeignet erscheinen lässt. Gleichwohl ließen sich zumindest bei einem Teil der verfügbaren Schaumproben Korrelationen herausarbeiten, welche Möglichkeiten zur Anwendung des Verfahrens bieten. Eine vertiefende Datenanalyse erschien deswegen wünschenswert. Dennoch konnten zuverlässig Schäume innerhalb einer Produktreihe unterschieden werden, was in Rücksprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss häufig als Information ausreicht. Im Rahmen einer Pilotuntersuchung wurden dabei erstmals in größerem Umfang vielfältige Methoden des Maschinellen Lernens auf die aufgenommenen Zeitreihen angewendet. Klassifizierungsaufgaben konnten erfolgreich bearbeitet werden. So gelang die Zuordnung zu Materialgruppen. Für einen Teil der untersuchten Schaumproben konnte auch eine genaue Bestimmung der Rohdichte (relative Abweichung kleiner 5%) aus den Zeitreihen erreicht werden. Deswegen wird dies als ein weiter zu verfolgender Ansatz angesehen. Dabei konnte die grundsätzliche Inline-Fähigkeit der erarbeiteten Methodik nachgewiesen und somit die praktische Anwendung vorbereitet werden. Zukünftigen Untersuchungen bleibt es vorbehalten, die durch gründliche Voruntersuchungen erfolgreich erprobten Methoden der Schrägeinschallung und Chirp-Anregung in eine Inline-Prüfung zu integrieren. Insgesamt hat das Projekt somit neue Perspektiven der Anwendung der Luftultraschallprüfung eröffnet. Die Charakterisierung von Schäumen mit Luftultraschall ist inline möglich und verspricht für die Anwendung relevante Materialkennwerte liefern zu können.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Smithers Pira, "The Future of Polymer Foams: Market Forecast to 2019," 2014.
- [2] Statistisches Bundesamt, "Destatis," [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/_inhalt.html.
 [Zugriff am 07 05 2019].
- [3] W. Pfenning, "Bester Jahresauftakt seit vier Jahren," *Plastverarbeiter*, pp. 12-13, 06 2018.
- [4] "Energieeinsparverordnung," [Online]. Available: http://www.enevonline.com/index.htm. [Zugriff am 07 05 2019].
- [5] "Energieausweise: Wärmeschutz beim Wohnungsbau," [Online]. Available: www.bmvbs.de. [Zugriff am 10 04 2018].
- [6] "Produktionsindex im Fahrzeugbau erholt sich vom Februartief," *Kunststoffe*, 07 2018.
- [7] A. Sahoune, J. Tatibouet, R. Gendron, A. Hamel und L. Piché, "Application of Ultrasonic Sensors in the Study of Physical Foaming Agents for Foam Extrusion," *Journal of Cellular Plastics*, Nr. 37, pp. 429-454, 2001.
- [8] M. Reimker und O. Deseke, "Schaum unter Kontrolle," *Kunststoffe*, Nr. 07, pp. 65-67, 2008.
- [9] J. Pierre, F. Elias und V. Leroy, "A Technique for Measuring Velocity and Attenuation of Ultrasound in Liquid Foams," *Ultrasonics*, pp. 622-629, 03 2013.
- [10] R. Peters, "Schaumstrukturanalyse mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden," Dissertation, Aachen, 2003.
- [11] F. Grote, "Schaumstoffe mit CT charakterisieren," Kunststoffe, Nr. 89, 1999.
- [12] F. ITWM, "Analyse von geschlossenzelligen Schäumen," [Online]. Available: https://www.itwm.fraunhofer.de/de/abteilungen/bv/oberflaechen-undmaterialcharakterisierung/analyse-von-geschlossenzelligen-schaeumen.html.. [Zugriff am 23 07 2018].

- [13] Volume Graphics GmbH, [Online]. Available: https://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio-max.html. [Zugriff am 05 07 2019].
- [14] T. Hochrein, Prozessmesstechnik in der Kunststoffaufbereitung, Würzburg: Vogel Communication Group GmbH & Co KG, 2011.
- [15] Topas, "Polymer Melt Particle Sensor," [Online]. Available: https://www.topasgmbh.de/dateien/prospekt/694prspe.pdf. [Zugriff am 22 10 2018].
- [16] T. Nagata, M. Tanigaki und M. Ohshima, "On-Line NIR Sensing of CO2 Concentration for Polymer Extrusion FOaming Processes," *Polymer Engineering And Science*, 04 2004.
- [17] Y. Thomas, K. Cole und L. Daignault, "In-Line NIR Monitoring of Composition and Bubble Formation in Polystyrene/Blowing Agent Mixtures," *Journal of Cellular Plastics*, Nr. 33, pp. 516-527, 1997.
- [18] Mahlo GmbH + Co. KG, "Gravimat FMX Messung von Flächengewicht/ Dicke,"
 [Online]. Available: https://www.mahlo.com/de/produktdb/details/geraete/Sensoren/22.html. [Zugriff am 31 05 2019].
- [19] M. Mayr, G. Schober, B. Baudrit, T. Hochrein und M. Bastian, Strukturanalyse in der Polymerschaumextrusion, Würzburg: Shaker Verlag, 2019.
- [20] I. Alig, "Nachweis von Schmelze-Inhomogenitäten mit Ultraschall," 2001.
 [Online]. Available: http://www.fgkunststoffe.de/sites/default/files/8086.pdf.
 [Zugriff am 22 10 2018].
- [21] J. Tatibouet und R. Gendron, "Heterogeneous Nucleation in Foams as Assessed by In-line Ultrasonic Measurements," in *Journal of Cellular Plastics*, Sage Publications, 2005, pp. 57-72.
- [22] N. Abu-Zahra und H. Chang, "In-Line Density Monitoring of Rigid PVC Foam during Extrusion Process," in *Intern. Polymer Publishing*, München, Hanser Verlag, 2000, pp. 348-354.

- [23] N. Abu-Zahra und A. Seth, "In-Process Denisty Control of Extruded foam PVC using Analysis of Ultrasound Waves," *Mechatronics*, Bd. 12, Nr. 9-10, pp. 1083-1095, 2002.
- [24] Schaumstofflager.de, "Luftschalldämpfung," [Online]. Available: https://www.schaumstofflager.de/schaumstoffblog/schalldaemmung/luftschalldaemmung/. [Zugriff am 31 05 2019].
- [25] J. Pierre, B. Dollet und V. Leroy, "Resonant Acoustic Propagation and Negative Density in Liquid Foams," *Physical Review Letters*, 11 04 2014.
- [26] M. Herman und T. Strohmer, "Compressed Sensing Radar," IEEE Radar Conference, 2008.
- [27] T. Collins und P. Atkins, "Nonlinear Frequency Modulation Chirps for Active Sonar," *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, 12 1999.
- [28] A. Hein, Processing of SAR Data, Springer Verlag, 2004.
- [29] M. A. Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, McGraw-Hill Education Ltd, 2014.
- [30] F. L. Chevalier, Principles of Radar and Sonar Signal Processing, Artech House Radar Library, 2002.
- [31] T. H. Gan, D. A. Hutchins, D. R. Billson und D. W. Schindel, "The Use of Broadband Acoustic Transducers and Pulse-Compression Techniques for Air-Coupled Ultrasonic Imaging," *Ultrasonics*, pp. 181-194, 04 2001.
- [32] S. Laureti, G. Silipigni, L. Senni, R. Tomasello, P. Burrascano und M. Ricci, "Comparative Study between Linear and Non-Linear Frequency-Modulated Pulse-Compression Thermography," *Applied Optics*, pp. D32-D39, 2018.
- [33] M. I. Skolnik, Radar Handbook, Boston: Mc-Graw-Hill, 1990.
- [34] D. Strickland und G. Mourou, "Compression of Amplied Chirped Optical Pulses," Optics Communications, pp. 219-221, 12 1985.

- [35] N. Levanon, I. Cohen, N. Arbel und A. Zadok, "Non-Coherent Pulse Compression
 Aperiodic and Periodic Waveforms," *IET Radar, Sonar & Navigation*, pp. 216-224, 1 2016.
- [36] D. Hutchins, P. Burrascano, L. Davis, S. Laureti und M. Ricci, "Coded Waveforms for Optimised Air-Coupled Ultrasonic Nondestructive Evaluation," *Ultrasonics*, pp. 1745-1759, 09 2014.
- [37] D. V. Sarwate und M. B. Pursley, "Crosscorrelation Properties of Pseudorandom and Related Sequences," *Proceedings of the IEEE*, pp. 593-619, 05 1980.
- [38] M. Zavelani-Rossi, G. Cerullo, S. D. Silvestri, L. Gallmann, N. Matuschek, G. Steinmeyer, U. Keller, G. Angelow, V. Scheuer und T. Tschudi, "Pulse Compression over a 170-THz Bandwidth in the Visible by Use of only Chirped Mirrors," *Optics Letters*, pp. 1155-1157, 2001.
- [39] M. Garcia-Rodriguez, Y. Yanez, M. J. Garcia-Hernandez, J. Salazar, A. Turo und J. A. Chavez, "Application of Golay Codes to improve the Dynamic Range in Ultrasonic Lamb Waves air-coupled Systems," NDT & E International, pp. 677-686, 2010.
- [40] G. James, D. Witten, T. Hastie und R. Tibshirani, An Introduction to Statistical Learning with Applications in R, New York: Springer, 2021.
- [41] A. Neumeister, "Quantum 360 Wanddicken- und Durchmessermessung über 360° in der Rohrextrusion," *Extrusion*, pp. 26-28, 08 2017.
- [42] V. A. Sutilov, Physik des Ultraschalls, P. Hauptmann, 1984.
- [43] G. Mie, Beiträge zur Optik trüber Medien, Annalen der Physik, 1908.
- [44] F. Babick, Schallspektroskopische Charakterisierung von submikronen Emulsionen, Dresden, 2005.
- [45] W. Punurai, J. Jarzynski, J. Qu und K. E. Kurtis, "Characterization of entrained Air Voids in Cement Paste with scattered Ultrasound," NDT & E International, pp. 514-524, 09 2006.

- [46] J. D. Achenbach, The Evaluation of Materials nd Structures by Quantitative Ultrasonics, Evanston: Springer Verlag, 1993.
- [47] C. M. Sayers, "Ultrasonic Velocity Dispersion in porous Materials". Journal of Physics D: Applied Physics.
- [48] T. Kahout, R. Karlqvist, I. Lassila, J. Eskelinen, A. Hortling, L. J. Pesonen und E. Haeggström, "Ultrasonic Determination of Porosity in Homogeneous Ceramic Samples," *Geophysica*, pp. 25-32, 2013.
- [49] A. Ng und K. Soo, Data Science was ist das eigentlich?!, Springer Verlag, 2018.
- [50] A. C. Müller, S. Guido und K. Rother, Einführung in Machine Learning mit Python: Praxiswissen Data Science, O'Reilly, 2017.