

## **Ultraschallbasierte Untersuchung rheologischer Eigenschaften von Polymeren für die Prozessüberwachung**

**Marcel Achzet, Benedict Schaller, Thomas Schlech, Florian F. Linscheid, Markus G. R. Sause**

### **Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:**

Achzet, Marcel, Benedict Schaller, Thomas Schlech, Florian F. Linscheid, and Markus G. R. Sause. 2023. "Ultraschallbasierte Untersuchung rheologischer Eigenschaften von Polymeren für die Prozessüberwachung." In DACH-Jahrestagung 2023: Zerstörungsfreie Materialprüfung, 15. - 17. Mai 2023, Friedrichshafen. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP e.V.).

# Ultraschallbasierte Untersuchung rheologischer Eigenschaften von Polymeren für die Prozessüberwachung

Marcel ACHZET<sup>1</sup>, Benedict SCHALLER<sup>1</sup>, Thomas SCHLECH<sup>1</sup>, Florian F.  
LINSCHIED<sup>1</sup>, Markus G. R. SAUSE<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> MRM, Universität Augsburg, Augsburg

Kontakt E-Mail: marcel.achzet@mrm.uni-augsburg.de

**Kurzfassung.** Für unterschiedliche Fertigungsprozesse ist eine Überwachung der rheologischen Eigenschaften der verwendeten Materialien von großem Vorteil. So ist beispielsweise der Aushärte- beziehungsweise Polymerisationsgrad ein entscheidendes Qualitätsmerkmal der in Infusionsprozessen gefertigten Bauteile. Da die Ausbreitung von Ultraschallwellen von den rheologischen Eigenschaften des Trägermediums abhängen, lassen sich deren zeitliche Veränderungen durch Verfahren der Ultraschallprüfung verfolgen.

Für die Kalibrierung der Messmethode wurde ein Sende-Empfangs Ultraschallprüfkopf in ein Rheometer mit beheizbarem Probehälter eingebaut. Eine oft verwendete Methode zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften ist die Laufzeitmessung bzw. die Messungen der Schallgeschwindigkeit. Die hierfür notwendige Transmissionsmessung beziehungsweise Extraktion des Rückwandechos schränkt jedoch die Anwendbarkeit in der Praxis ein. Deshalb wird anders als sonst üblich im Impuls Echo Verfahren ein Schallimpuls während der rheologischen Messung in die Probe eingekoppelt.

Für die Datenverarbeitung des Ultraschallsignals werden unterschiedliche Signalmerkmale analysiert, die Zugang zu Informationen über die rheologischen Eigenschaften ermöglichen. Um diese Merkmalsextraktion zu optimieren, werden zur Bewertung und Kalibrierung der verwendeten Auswertemethodik die synchron ermittelten Messwerte des Rheometers, wie die Viskosität, herangezogen. Es konnten versuchsübergreifend hohe Korrelationen zwischen gemessener Viskosität und Signalmerkmale ermittelt werden, was das Potential einer ultraschallbasierten Überwachung rheologischer Eigenschaften verdeutlicht.

## 1 Einführung

Für nachhaltige und kosteneffiziente Fertigungsverfahren können in den Herstellungsprozess integrierte Überwachungslösungen und Regelungssysteme einen erheblichen Vorteil darstellen. Für viele Prozesse ist dabei die Überwachung der rheologischen Eigenschaften verwendeter Werkstoffe von entscheidender Bedeutung.

Insbesondere bei der Herstellung von Verbundwerkstoffen, wie beispielsweise in den Infusion- und Injektionsverfahren, ist es noch immer eine große Herausforderung, eine kosteneffiziente Fertigung komplexer Bauteile konstanter Qualität sicherzustellen. Dafür



kann durch die Überwachung der rheologischen Eigenschaften der Polymermatrix sichergestellt werden, dass die Aushärtung oder für z.B. den Fall einer in-situ Polymerisation auch die Polymerisation in einer kontrollierten Weise abläuft und das Endprodukt die gewünschten mechanischen Eigenschaften aufweist [1, 2].

Eine Möglichkeit zur Onlineüberwachung und Vorhersage rheologischer Eigenschaften ist der Einsatz akustischer Verfahren. Diese ermöglichen eine Sensorintegration innerhalb des Formwerkzeugs und erfolgt ohne direkten Kontakt mit dem Werkstück. Dadurch wird die Integration der Überwachungslösung erleichtert. Nichtsdestotrotz müssen äußere Einflussfaktoren, wie beispielsweise Störsignale, Temperatur und Sensorausrichtung und deren Auswirkungen auf das aufgenommenen Signal in der Auswertung berücksichtigt werden. Im Vorfeld industrieller Anwendungen ist es deshalb notwendig, robuste Auswertelgorithmen zu entwickeln und unter kontrollierten Bedingungen Kalibrierversuche durchzuführen [3-5].

In dieser Arbeit wurde im Hinblick auf die Validierung der in [4] beschriebene T-RTM Versuche die Polymerisation von Caprolactam zu Polyamid-6 näher untersucht. Dazu wurde ein Rheometer mit einem beheizbaren Prüfkopf mit aktiver Ultraschallsensorik ausgestattet. Nach der Vorverarbeitung des empfangenen Ultraschallsignals werden aus diesem zunächst unterschiedliche Signalcharakteristika im Zeit- sowie Frequenzraum extrahiert. Zur Bewertung der Tauglichkeit der Signalcharakteristika zur Bestimmung rheologischer Eigenschaften werden diese mit den Messwerten des Rheometers verglichen. Spezieller Fokus liegt hier auf der komplexen Viskosität als wichtige Prozessvariable in Injektions- und Infusionsversuchen. Durch geeignete Algorithmen, die die Korrelation zwischen Ultraschallsignal und den mit dem Rheometer ermittelten Eigenschaften bewerten, werden robuste Charakteristika für zukünftige Anwendungen identifiziert, auf deren Basis die zeitliche Änderung der rheologischen Eigenschaften verfolgt werden kann.

## 2 Material und Methodik

Um die simultane Aufnahme rheologischer und akustischer Messungen zu ermöglichen, wurde das Rheometer MCR 302 (Anton Paar GmbH, Österreich) mit einem an der Universität Augsburg entwickelten Ultraschallmesssystem [6] ausgestattet. Für die zu untersuchenden Proben wird das Monomer  $\epsilon$ -Caprolactam (AP-NYLON®) der Firma L. Brüggemann GmbH & Co. KG (Deutschland) als Ausgangsstoff für die Polymerisation zu PA-6 verwendet (Brüggemann, 2019a), wobei Hexamethylene-1,6-Dicarbamoyl-Caprolactam (BRUGGOLEN® C20P von L. Brüggemann GmbH & Co. KG, Deutschland) als Aktivator der Reaktion dient. In [7] wird die Polymerisationsreaktion genauer beschrieben.

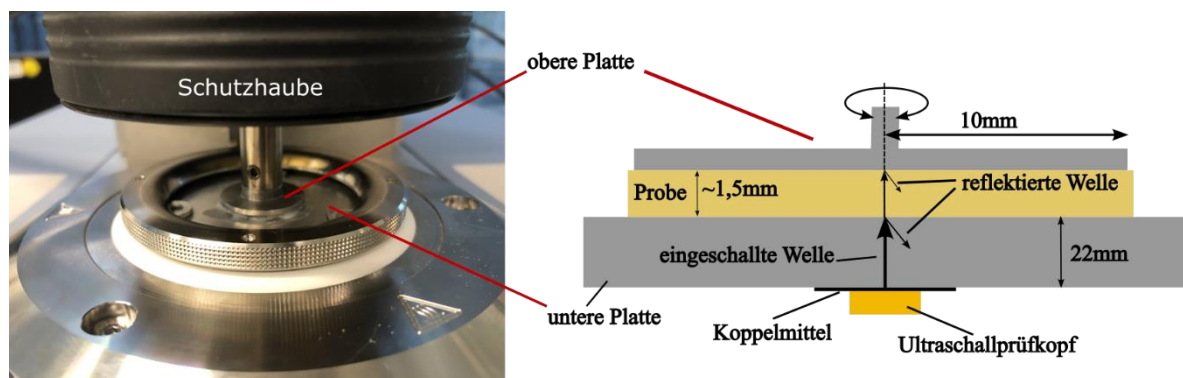


Abbildung 1: Links: Rheometer Prüfkopf. Rechts: Dazugehörige schematische Zeichnung des Querschnitts.

## 2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

In Abbildung 1 ist der Prüfkopf des Rheometers dargestellt. Die Probe befindet sich zwischen zwei Platten, wobei für eine ideale Polymerisationsreaktion mittels einer Schutzhaube eine inerte Stickstoffumgebung erzeugt wird. Die untere Platte, deren Temperatur über ein verbautes Peltierelement und Kühlswassersystem gesteuert werden kann, ist statisch im Rheometer verbaut. Die obere Platte oszilliert für die Messung in Form einer Drehschwingung um die eigene Achse, sodass mit Hilfe vorhergehender Kalibrierung die Viskosität der Probe bestimmt werden kann.

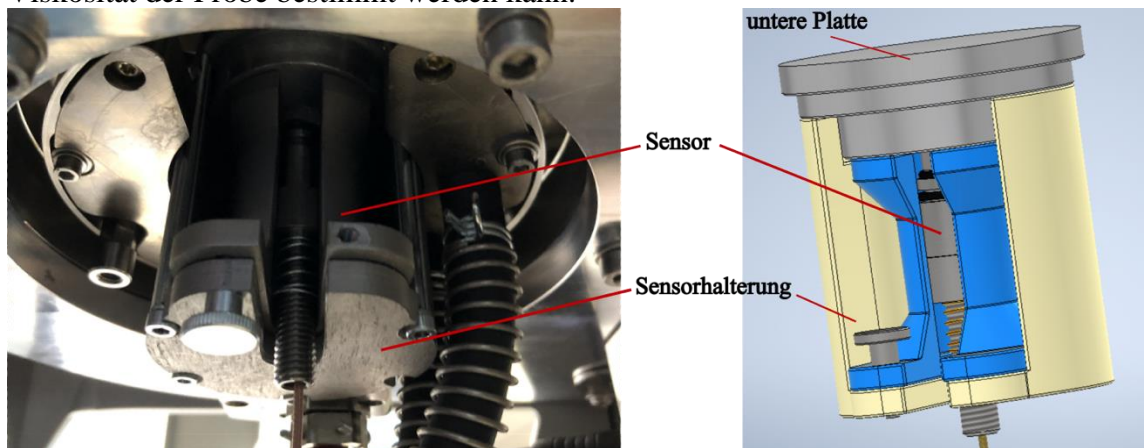


Abbildung 2: Links: Unterseite des Rheometerprüfkopfs mit montierter Sensorhalterung. Rechts CAD-Zeichnung der Sensorhalterung.

Für die Ultraschallmessung wurde, wie in Abbildung 2 dargestellt, ein Ultraschallprüfkopf mit einem Koppelmittel (KORASILON® Paste mittelviskos, Kurt Obermeier GmbH & Co. KG) an die Unterseite der unteren Platte montiert. Die Sensorhalterung wurde dabei an die Geometrie des Rheometers sowie des Prüfkopfs angepasst und aus Edelstahl additiv gefertigt.

Zu Beginn der Messungen wurde das Rheometer auf 120°C geheizt und anschließend für 10 Minuten auf dieser Temperatur gehalten, um eine konstante Temperatur im Messaufbau zu erreichen. Danach wurde die Probe in Form von festen Plättchen zwischen den Platten positioniert und aufgeschmolzen. Zum Start der Messung wurde die obere Platte auf einen Spaltabstand von etwa 1,5 mm gefahren, wobei dieser während der Messung automatisch nachgeregelt wird, um während der Polymerisation durchgehend in Kontakt mit der Probe zu stehen. Anschließend wurden die Viskositäts- und Ultraschallmessung gestartet, wobei die Temperatur des Rheometers mit einer Rate von 20 K/min auf 160 °C aufgeheizt wurde. Die Oszillation der oberen Platte wird über die Software *Rheocompass* (Anton Paar GmbH, Österreich) gesteuert und erfolgte mit einer Frequenz von 1 Hz und einer logarithmisch mit der Zeit abnehmenden Scherdeformation von 10 % zu 0,1 %.

## 2.2 Ultraschallmesssystem und Sensorik

Der verwendete Ultraschallprüfkopf besteht aus einer piezoelektrischen Keramikscheibe (Typ PRYY-0227, PICeramic) mit einer Dicken-Resonanzfrequenz von 2 MHz, einem Stahlgehäuse mit Gewinde, einer Dämpfungskomponente und einer Feder, welche einen konstanten Anpressdruck zur Ankopplung der Sensoren erzeugt. Der Prüfkopf wird sowohl als Sensor für eingehende Schallwellen als auch als Pulsgeber für die Erzeugung von Ultraschallwellen benutzt. Das Ultraschallelement ist über ein Kabel mit einem Hardwaremodul verbunden, welches im Wesentlichen aus Selektions-, Filter- und Verstärkungsschaltungen und einem Mikrocontroller besteht. Der Messrechner digitalisiert

und speichert die Messdaten und ermöglicht eine Ansteuerung des Hardwaremoduls über die Software SBench 6 (Spectrum Instrumentation GmbH, Deutschland). Der Aufbau des Messsystems wurde in [8] detailliert beschrieben.

Für die Ultraschallmessung im Impuls-Echo Verfahren werden in 21 ms Intervallen Ultraschallimpulse erzeugt. Dabei wird das Signal in einem 1 ms langen Zeitbereich nach den Impulsen zur weiteren Verarbeitung gespeichert. Bereiche zwischen den einzelnen Impuls-Echo-Events liefern hingegen keine brauchbaren Informationen und werden zur Reduktion der Datenmengen nicht gespeichert. Das beschriebene Prinzip ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

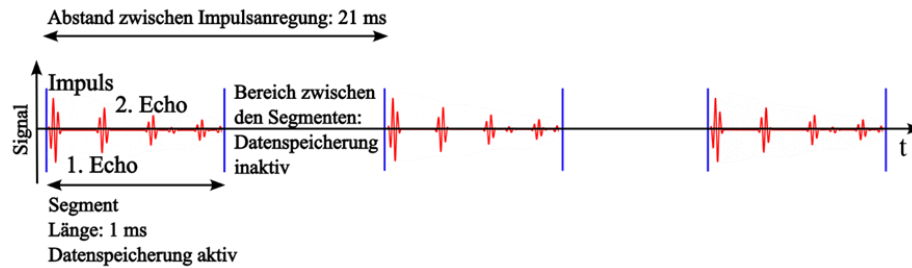


Abbildung 3: Schematische Darstellung zur Aufnahme der Ultraschalldaten

Mittels eines Instrumentenverstärkers wird das aufgenommene Signal um 40 dB verstärkt, mit einem 1 MHz Hochpassfilter analog gefiltert und mit einer Abtastrate von 20 MS/s digitalisiert. Die weitere Verarbeitung der Messdaten erfolgt aktuell nachträglich an einem externen Rechner über die Software MATLAB.

### 2.3 Überwachung der Polymerisation

Veranschaulicht in Abbildung 4, treffen die senkrecht eingekoppelten Schallwellen nach Durchlaufen der unteren Platte auf die Grenzfläche zwischen der unteren Platte und der zu untersuchenden Probe. Das eintreffende Wellenpaket wird dort teilweise reflektiert bzw. transmittiert. Die dort reflektierten Schallwellen erzeugen im Signal eine ausgeprägte Hauptechokaskade. Auch an der Grenzfläche zwischen der Probe und oberen Platte wird das Signal reflektiert und transmittiert. Das dort reflektierten Schallwellen können als gedämpfte Echos, im weiteren Verlauf als Probenechos bezeichnet, erfasst werden. In Abbildung 4 sind die Schallwege in jeweils blau und rot dargestellt.

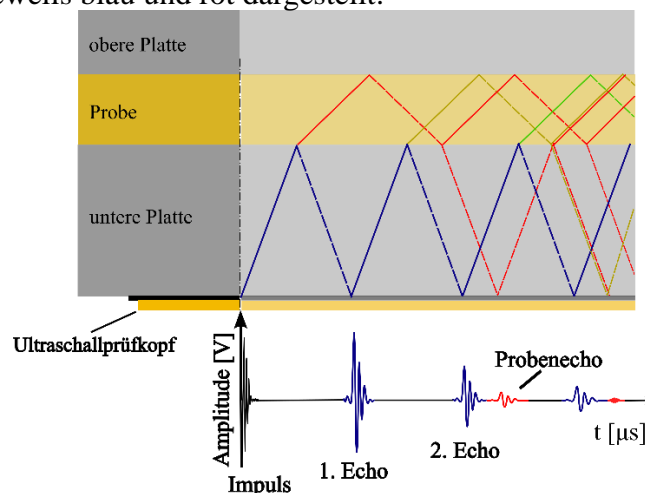


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Ultraschallwellenausbreitung Messaufbau und der Probe sowie der am Sensor gemessene Spannungsverlauf, in Anlehnung an [3].

Die Stärke der Hauptechos ist abhängig vom Reflexionsfaktor  $R$  zwischen der unteren Platte und der Probe. Mit der akustischen Impedanz der Probe bzw. der unteren Platte (Aluminium) des Rheometers  $Z_P$  bzw.  $Z_{Al}$  kann dieser mit der Formel [9]

$$R = \frac{p_r}{p_0} = \frac{Z_P - Z_{Al}}{Z_P + Z_{Al}}$$

berechnet werden, wobei  $p_0$  der Schalldruck der eingehenden Welle und  $p_r$  der Schalldruck der reflektierten Welle ist. Die Schallimpedanz ist wiederum abhängig von der Schallgeschwindigkeit und der Dichte des Mediums und wird über die Formel [9]

$$Z = c \cdot \rho$$

beschrieben. Durch die Polymerisation erhöht sich die Impedanz der Probe  $Z_P$ . Die damit verbundene Änderung des Reflexionsgrad  $R$  beeinflusst dadurch Form und Stärke des Ultraschallsignals, sodass daraus mit geeigneter Analysemethoden der Polymerisationsverlauf verfolgt werden kann [3, 4, 10].

### 3 Auswertung

Um mit den aufgenommenen Ultraschallsignalen Aussagen über die rheologischen Messwerte treffen zu können, ist die Merkmalsextraktion von zentraler Bedeutung. Diese vereinfacht den Umgang mit großen Datenmengen und dient als Basis für maschinelles Lernen zur Vorhersage der rheologischen Messwerte. In dieser Arbeit soll eine Vorgehensweise für eine geeignete Auswahl der Merkmale vorgeschlagen werden, dessen Schema in Abbildung 5 dargestellt ist.

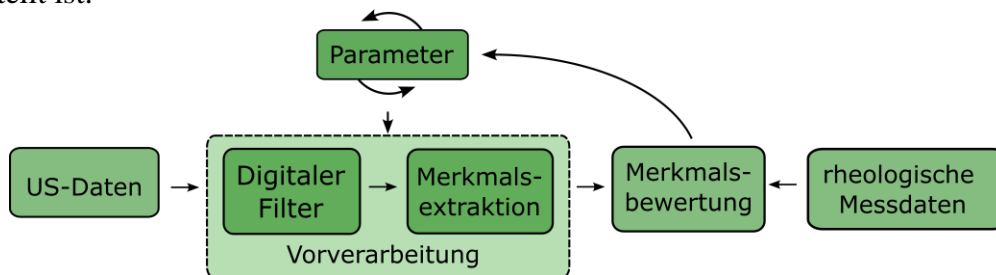


Abbildung 5: Schema zur Merkmalsextraktion.

Nachdem auf das Rohsignal digitale Tiefpass- und Hochpassfilter mit Stoppbandfrequenzen von jeweils 3 MHz und 1,4 MHz angewandt werden, erfolgt die Extraktion der Merkmale, die anschließend auf Korrelationen mit den rheologischen Messwerten untersucht und bewertet werden. Für die Merkmalsbewertung werden die Pearson Correlation Coefficients zu den rheologischen Messwerten herangezogen, um effizient und unabhängig vom später verwendeten Lernmodell die Relevanz der Merkmale für die betrachteten Versuche bewerten und interpretieren zu können. In einem iterativen Prozess kann so systematisch nach aussagekräftigen Merkmalen und deren Parametereinstellungen gesucht werden.

#### 3.1 Merkmalsextraktion

Signalcharakteristiken (engl. Feature) der Ultraschallsignale werden in der Regel aus dem Frequenz- und Zeitbereich extrahiert oder bestehen aus einer Kombination aus dieser. Für die Extraktion gibt es eine Vielzahl an parametrisierbaren Möglichkeiten, diese umzusetzen. Dies umfasst sowohl die Zeitbasis der Featureberechnung als auch die exakte Definition der jeweiligen Signalcharakteristiken. Betrachtet man beispielsweise den Signalverlauf in Abbildung 4, kann es nützlich sein, die Extraktion im Zeitbereich lediglich auf relevante

Teilbereiche der Signalsegmente anzuwenden. So erhält man beispielsweise gezielt Informationen über die Reflexionsbedingungen, indem die Merkmale aus einem um das 1. Echo gelegten Gate extrahiert werden. Analog zu dieser Methodik im Zeitbereich können im Frequenzbereich die spektralen Energiebereiche (Partial Powers) herangezogen werden, die den Anteil der Energie eines gewählten Frequenzbereiches vom gesamten Energiegehalt des Signals wiedergeben. Je nach aufgabenspezifischen zu analysierenden Effekten müssen die zu untersuchenden Frequenzbereiche sinnvoll definiert werden.

Erfahrungswerte zusammen mit einer vorausgehenden Analyse der Ultraschallsignale und deren Frequenzspektren können zu einer guten Abschätzung geeigneter Parametereinstellungen für Gate und Frequenzbereiche führen. In der Praxis wird jedoch eine eindeutige Identifikation der Echos im Zeitbereich zum Beispiel durch störende Reflexionen, Abweichung der Ausrichtungen und Ankopplung der Ultraschallsensoren oder weitere Messartefakte erschwert. Dies unterstreicht die Relevanz einer gegenüber dieser Einflussfaktoren robuste Merkmalsextraktion. Eine systematische Variation von Gateposition und Frequenzbereichen liefert hier ihren Beitrag zur weiteren Optimierung und Interpretation der Ultraschallsignale.

Zur Demonstration der Vorgehensweise zur Merkmalsextraktion sollen hier neben der spektralen Energiedichte ein Merkmal im Zeitbereich betrachtet werden. Für jedes Segment (vgl. Abbildung 3) wird jeweils ein Feature berechnet. Dazu wurden bei verschiedensten Gateeinstellungen im Zeitbereich das Merkmale mit betragsmäßig größtem R-Wert mit Punkten gewichtet. Das Ergebnis kann wie in Abbildung 6 dargestellt werden. Als nützlich Merkmal aus dem Zeitbereich hat sich wie dort ersichtlich in diesem Fall der RMS-Wert erwiesen, der mit der Signalamplitude korreliert.

Um mit dem R-Wert als Bewertungskriterium ideale Parameter für den Frequenzbereich zur Berechnung der spektralen Energiedichte zu finden, wurden dessen Länge und Start über die relevanten Frequenzen um den Prüfbereich des Ultraschallsensors von 1,4 MHz bis 3 MHz parametrisiert. Das Gate im Zeitfenster bei der Berechnung der spektralen Energiedichte wird konstant gehalten und erstreckt sich über das gesamte Segment. Für jede Parametereinstellung wird der zeitliche Verlauf der spektralen Energiedichte und dessen R-Wert zu dem logarithmischen Verlauf der Viskosität berechnet, da im Vergleich zum linearen Verlauf generell stärkere Korrelationen gefunden wurden. Analog dazu folgt die Berechnung der R-Werte für das RMS-Merkmal über die Variation des Gates im Zeitbereich. Die R-Werte sind in Abbildung 7 in Abhängigkeit der Frequenz- und Zeitfenster dargestellt. Für eine leichtere Unterscheidung der interessanten, hohen R-Werte wurde eine bilogarithmische Farbskala gewählt. Dies erleichtert im Farbdigramm eine Identifikation der maximalen Werte. Ein hoher Betrag bedeutet dabei eine starke Korrelation zur gemessenen Viskosität. Das Vorzeichen steht für eine positive bzw. negative Korrelation zur gemessenen Viskosität.

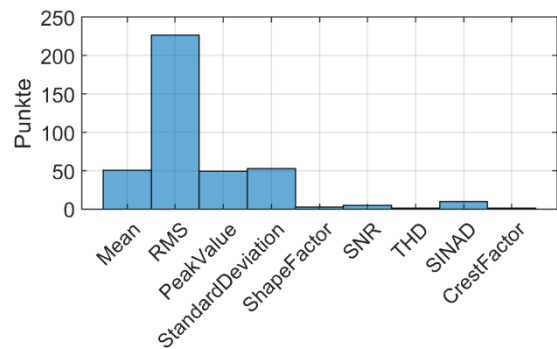


Abbildung 6: Ein Punkt erhält das Merkmal mit betragsmäßig größtem R-Wert bei einer festen Gateposition. Das Histogramm zeigt die Punkteverteilung bei zufälliger Variation der Gatepositionen.

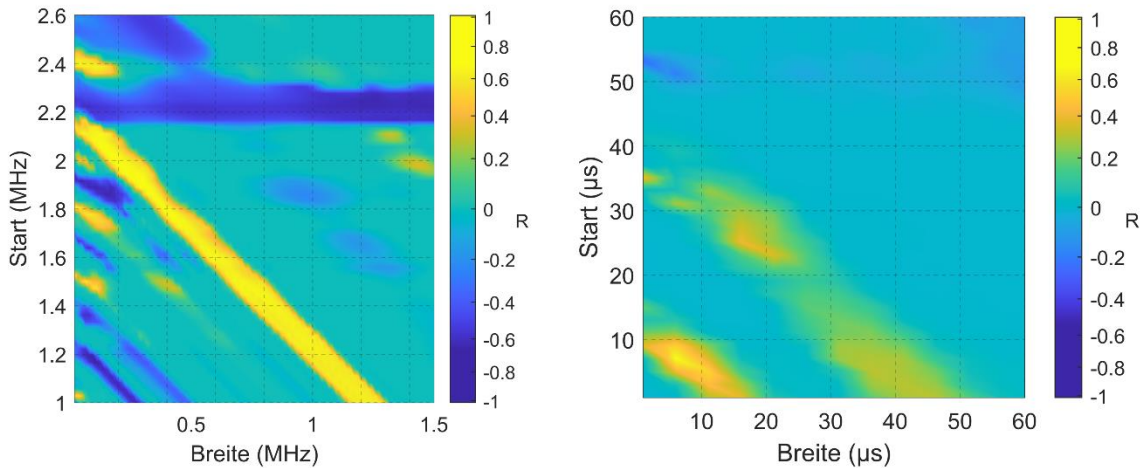


Abbildung 7: Links: R-Werte für die spektrale Energiedichte in Abhängigkeit vom Frequenzfenster. Rechts: R-Werte für den RMS in Abhängigkeit der Gateposition und -breite.

Auffällig im linken Diagramm ist die geradlinige Verteilung der maximalen, positiven R-Werte. Diesen Werten ist gemeinsam, dass der Frequenzbereich einheitlich bei circa 2,2 MHz endet. Der Startwert dazu kann ohne erheblichen Abfall des R-Wertes variabel gewählt werden. Die Frequenzbereiche mit hoher Korrelation zum rheologischen Messwert umfasst damit die Eigenfrequenz des Sensors sowie die dazu niedrigeren Frequenzen. Zum Vergleich ist der Ultraschallimpuls und das dazugehörige Frequenzspektrum in einer Leermessung ohne Probe in Abbildung 8 dargestellt.

Betragsmäßig große, negative R-Werte ergeben sich bei einem variabel langem Frequenzfenster mit einer Startfrequenz bei circa 2.2 MHz. Folglich ist es für starke Korrelationen zu den rheologischen Messwerten günstig, den Start bzw. das Ende des Frequenzfensters auf 2.2 MHz zu legen. Umfasst das Frequenzfenster Bereiche über und unterhalb dieser Frequenz, konkurrieren die negativen und positiven Beiträge zur spektralen Energiedichte und bewirken eine Abnahme der Korrelation. Dieses Muster wird versuchsübergreifend beobachtet, sodass sich aus diesen Überlegungen eine generelle Empfehlung für die Grenzen der spektralen Energiedichten ableiten lässt. Die Anwendung über den hier verwendeten Versuchsaufbau hinaus muss jedoch weiter untersucht werden. Weitere Untersuchungen zu Abhängigkeiten zwischen den spektralen Energiedichten und der Resonanzfrequenz der verwendeten Ultraschallsensorik kann die Grundlage für adaptive Algorithmen zur automatischen Bestimmung geeigneter Parameter bilden.

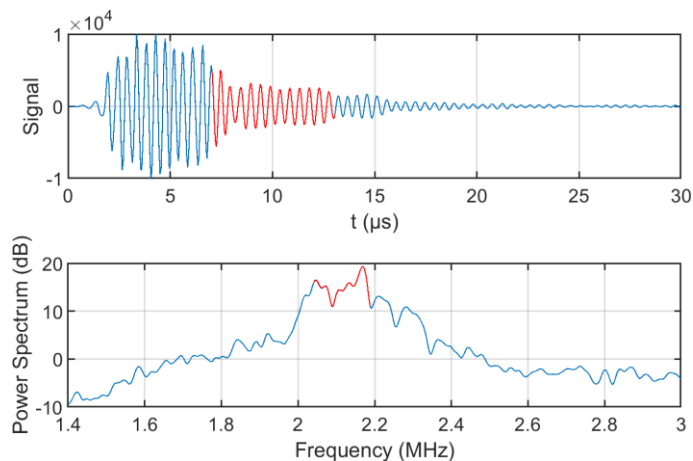


Abbildung 8: Impuls und Frequenzspektrum des verwendeten Ultraschallsensors. Die rot markierten Bereiche liegen innerhalb das als ideal befundene Zeit- bzw. Frequenzfenster.

Der Abfall des Energieanteils höherfrequenter Ultraschallwellen bei zunehmender Viskosität bzw. fortschreitender Polymerisation steht zudem im Einklang mit der thermoelastischen Dissipation, d.h. einer zunehmend stärkeren Dämpfung höherfrequenter Ultraschallwellen.

Auf der rechten Seite der Abbildung 7 ist das Ergebnis für den durch die Parametervariation des Gates erhaltenen R-Wertes für den RMS zu sehen. Die größten Werte konzentrieren sich bei Startzeiten bzw. Gatebreite zwischen jeweils  $1\ \mu\text{s}$  und  $10\ \mu\text{s}$  mit maximalen Werten bei circa  $7\ \mu\text{s}$  bzw.  $6\ \mu\text{s}$ . Dabei beträgt die berechnete Laufzeit des ersten bzw. zweiten Hauptechos circa  $7\ \mu\text{s}$  bzw.  $14\ \mu\text{s}$  nach Impulssendung, sodass theoretisch das erste Hauptecho in den Bereich des Gates fällt. Dieses Echo ist jedoch im Signal in Abbildung 8 nicht klar zu identifizieren.

In Abbildung 9 ist die spektrale Energiedichte und der RMS mit den auf Grundlage der Ergebnisplots für ideal befundene Parametereinstellungen im Vergleich zur gemessenen Viskosität aufgetragen. Generell zeigen die Merkmale der spektralen Energiedichte höhere Korrelationen, was unter anderem auch aus Abbildung 7 entnommen werden kann. Die Zunahme des RMS Wertes spiegelt einen Anstieg der Echoamplitude, verursacht durch die aufgrund der fortschreitende Polymerisation veränderten Reflexionsbedingungen wider.

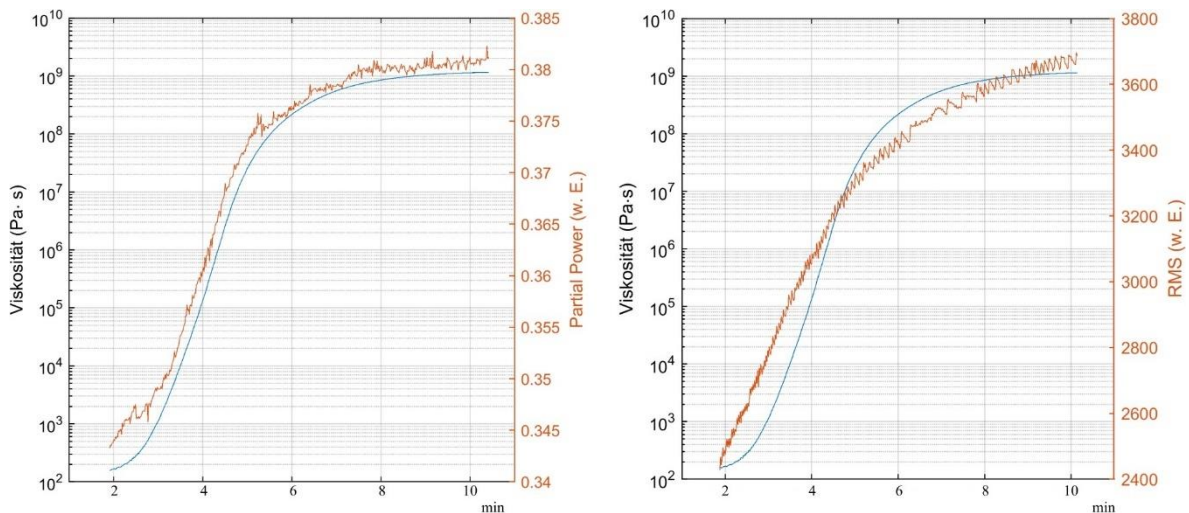


Abbildung 9 Links: Zeitlicher Verlauf der Spektrale Energiedichte bei einem Frequenzfenster von 2.05 MHz bis 2.19 MHz im Vergleich zur logarithmisch aufgetragenen Viskosität. Rechts: Analog der zeitliche Verlauf des RMS Wertes in einem Zeitfenster von  $7\ \mu\text{s}$  bis  $13\ \mu\text{s}$  nach Impulssendung.

In Abbildung 10 werden die spektrale Energiedichte und der RMS mit den als ideal ermittelten Parametern auf einen weiteren Versuch angewandt. Trotz des Ab- und Wiederaufbaus des Versuchs und der damit verbundenen Neujustage des Sensors wird eine hohe Korrelation insbesondere der spektralen Energiedichte mit dem Verlauf der Viskosität beobachtet. Dies ermöglicht, auf Grundlage der Ultraschallmessungen die zeitlichen Veränderungen der Viskosität abzuschätzen und damit auch das Sättigungsverhalten der

Polymerisationsreaktion zu verfolgen. Dies ist vor allem für industrielle Prozesse wie den T-RTM Prozess (thermoplastisches Resin-Transfer-Molding) von hohem Interesse [4, 10].

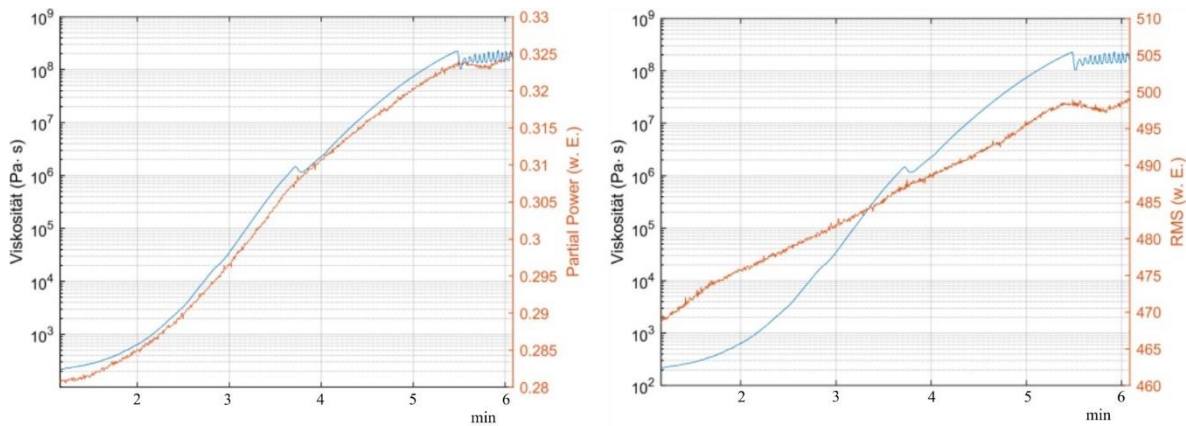


Abbildung 10: Links: Zeitlicher Verlauf der Spektrale Energiedichte und rechts der zeitliche Verlauf des RMS-Wertes mit gleicher Frequenz und Zeitfenster wie in Abbildung 9.

#### 4 Ausblick

Mittels einer Optimierung der Parameter zur Merkmalsextraktion konnten Merkmale aus Frequenz- und Zeitbereich mit hoher Korrelationen zum zeitlichen Viskositätsverlauf gefunden werden. Besonders die spektrale Energiedichte folgt versuchsübergreifend mit hoher Übereinstimmung dem Verlauf der gemessenen Viskosität und erlaubt so Abschätzungen über deren zeitliche Änderung. Der Vorteil der spektralen Energiedichte gegenüber dem RMS-Wert kann in dessen selbstnormierender Natur liegen, die gegenüber äußeren Unregelmäßigkeiten wie Temperaturschwankungen oder veränderte Sensoranbringung stabilisierend wirken können. Analog zu den spektralen Energiedichten kann es weiterhin interessant sein, den Anteil der Energiedichten in einem bestimmten Zeitintervall zu betrachten.

Die Ergebnisse veranschaulichen den Mehrwert der hier dargestellten Vorgehensweise zur Merkmalsextraktion. Diese trägt zum Verständnis der physikalischen Vorgänge im betrachteten Prozess bei und erleichtert die Interpretation der damit verbundenen Auswirkungen auf die berechneten Merkmale. Somit wird der Grundstein gelegt für die Extraktion von Merkmalen, die robust gegenüber äußeren Störfaktoren sind und als Größen für die Überwachung rheologischer Eigenschaften dienen können. Als nächster Schritt kann mit geeigneten Modellen und den optimierten Merkmalen als Inputparameter neben der qualitativen Vorhersage auch eine quantitative Bestimmung der rheologischen Messwerte erfolgen.

In fortführenden Arbeiten sollen weitere statistische Analysen unter Hinzunahme mehrerer Größen zur Bewertung der Merkmale für eine weitere Optimierung genutzt werden. Um zu berücksichtigen, dass aufgrund von beliebigen Störfaktoren die idealen Frequenz- und Zeitfenster variieren können, könnten die Parameter adaptiv angepasst werden oder die Merkmale aus multiplen Gates mit geeigneten statistischen Funktionen gewählt werden.

Neben dem Einsatz der Ultraschalluntersuchungen am Rheometer, soll der Ansatz in industriellen Prozessen weiterverfolgt werden. Neben Infusions- und Injektionsverfahren, ist dabei auch der generelle Einsatz in Systemen zur Überwachung der Viskosität im Prozess, wie z.B. Klebprozesse, Auftrag von Lacken oder Korrosionsschutz denkbar. Dazu sollen weitere Untersuchungen an anderen Materialsystemen und Randbedingungen erfolgen.

## 5 Referenzen

1. Fu, H., et al., *Overview of injection molding technology for processing polymers and their composites*. ES Materials & Manufacturing, 2020. **8**(4): p. 3-23.
2. Tamakuwala, V.R., *Manufacturing of fiber reinforced polymer by using VARTM process: A review*. Materials Today: Proceedings 2021. **987-993**.
3. Liebers, N., *Ultraschallsensorgeführte Infusions- und Aushärteprozesse für Faserverbundkunststoffe*. 2018, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt eV.
4. Faber, J., et al., *Sensor-based process monitoring of in-situ polymerization in T-RTM manufacturing with caprolactam*. 2021.
5. Wang, Z., et al. *Online monitoring technology for liquid composite molding based on Ultrasonic method*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. IOP Publishing.
6. Linscheid, F., *Entwicklung eines Zustandsüberwachungssystem durch Kombination von akustischen Überwachungsverfahren*. 2022, Universität Augsburg.
7. Kurt, S., *Kalorimetrische und rheologische Untersuchung der anionischen Polymerisation von  $\epsilon$ -Caprolactam zu Polyamid-6*. 2021, Universität Augsburg.
8. Linscheid, F. and M. Sause, *Hard- und Softwarefusion von mehreren akustischen Messmethoden zur Zustandsüberwachung*. 2021.
9. Krautkrämer, J. and H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 2013: Springer-Verlag.
10. Achzet, M., et al., *Ultraschallbasierte Prozessüberwachung am Beispiel eines T-RTM Prozesses*. 2022.