Sachbericht zum Verwendungsnachweis:

Teil I: Kurzbericht

zum Teilvorhaben: Entwicklung eines interdisziplinären Ansatzes zur Tumorfrüherkennung: Scherwellenelastographie und Modellierung des menschlichen Tumorgewebes aus Ingenieurssicht

Zuwendungsempfänger:	**Technische Hochschule Deggendorf**
Förderkennzeichen:	**01KD2439**
Laufzeit des Vorhabens:	**01.10.2024 bis 31.03.2025**

Im Projekt SWEFTD wurde eine durchgängige numerische Methodik zur Scherwellen-Elastographie (SWE) aufgebaut: Die Acoustic Radiation Force (ARF) wurde mit MATLAB k-Wave simuliert und als Körperkraft in ein FE-Modell (Abaqus) eingebracht, um Scherwellen in einem definierten Gewebemodell anzuregen. Aus der resultierenden Wellenausbreitung wurde die Wellengeschwindigkeit bestimmt und mittels manueller Inversion eine Elastizität zurückgerechnet. Diese stimmte gut mit den vorgegebenen Materialparametern überein. Damit ist die prinzipielle Machbarkeit der rein numerischen Kette aus ARF-Berechnung, FE-Simulation und Inversion gezeigt und eine Grundlage für künftige Erweiterungen geschaffen.

Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

- **Zielsetzung**. Ausgangspunkt des Projekts war die Frage, ob sich ingenieurwissenschaftliche Simulationsmethoden zur nicht-invasiven Tumorfrüherkennung nutzen lassen. Konkret sollte ein simulativer Workflow geschaffen werden, mit dem sich die mechanischen Eigenschaften von Tumorgewebe über Scherwellen numerisch ableiten lassen. Ziel war nicht die vollständige klinische Umsetzung, sondern der Machbarkeitsnachweis.
- **Stand der Technik**. Methoden wie B-Mode-Ultraschall, klassische Elastographie oder Magnetresonanz-Elastographie sind etabliert, zeigen aber Schwächen bei der Differenzierung zwischen gut- und bösartigen Tumoren. SWE nutzt die Geschwindigkeit von Scherwellen, die durch Acoustic Radiation Force Impulse (ARFI) angeregt werden, um Rückschlüsse auf die Gewebesteifigkeit zu ziehen.
- **Innovationskern**. SWEFTD unterscheidet sich, indem es diesen Weg rein numerisch abbildet: von der Berechnung des ARF-Feldes bis zur Auswertung der Scherwellengeschwindigkeit und Inversion. Dadurch können Einflussgrößen präzise kontrolliert, Parameterstudien durchgeführt und methodische Grundlagen unabhängig von den Einschränkungen realer Messsysteme gelegt werden.

Ablauf des Vorhabens

- **ARF-Simulation mit k-Wave**. Im ersten Schritt wurde das akustische Feld eines Ultraschallwandlers mithilfe von k-Wave berechnet. Aus den simulierten Druck- und Intensitätsverteilungen konnte die Acoustic Radiation Force abgeleitet werden. Diese Kraftverteilung bildet die physikalische Anregung, die in realen Messungen durch fokussierte Ultraschallpulse erzeugt wird.
- **Kopplung zur FE-Simulation**. Die berechnete ARF wurde anschließend als räumlich verteilte Körperkraft in ein Finite-Elemente-Modell (Abaqus) übertragen. Dort war bereits ein geeignetes Materialmodell definiert, das die elastischen Eigenschaften des Gewebes beschreibt.
- **Generierung und Analyse der Scherwellen**. Durch die Anregung mit der ARF breiteten sich Scherwellen im Modell aus. Diese Wellen wurden numerisch verfolgt, und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit konnte an verschiedenen Positionen bestimmt werden.
- **Inversionsschritt**. Mit einer manuellen Inversionsmethode wurde aus der gemessenen Scherwellengeschwindigkeit die effektive Elastizität berechnet. Diese zurückgerechneten Werte wurden mit den ursprünglich in das Materialmodell eingegebenen Parametern verglichen.
- **Besonderheit**. Die gesamte Untersuchung erfolgte rein numerisch, ohne begleitende Experimente. Dadurch lag der Fokus klar auf der methodischen Machbarkeit und der Vergleichbarkeit zwischen Eingangsdaten und Simulationsergebnissen.

Wesentliche Ergebnisse sowie ggfs. Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

- **Nachweis der Machbarkeit**. Die Kombination aus ARF-Simulation, FE-Modellierung und Inversionsanalyse hat sich als konsistente Methodik erwiesen. Damit wurde gezeigt, dass sich die wesentlichen Schritte der SWE auch ohne experimentelle Messungen abbilden lassen.
- **Validierung**. Die berechneten Elastizitätswerte stimmten in guter Näherung mit den Eingangsdaten überein. Dies bestätigt, dass die gewählte Inversionsmethode korrekt arbeitet und die Simulationen physikalisch plausibel sind.
- **Flexibilität für zukünftige Arbeiten**. Durch den rein numerischen Aufbau können weitere Parameter, etwa komplexere Materialmodelle (viskoelastisch, hyperelastisch), unterschiedliche Geometrien oder variierte Ultraschall-Einstellungen, systematisch untersucht werden.
- **Grundstein für Weiterentwicklung**. Die geschaffene Methodik liefert eine stabile Basis für spätere Projekte, in denen experimentelle Daten oder Patientendaten eingebunden werden können, um eine Brücke zwischen Ingenieurmodellierung und medizinischer Diagnostik zu schlagen.
- **Kooperation**. Das Projekt wurde am Technologie Campus Hutthurm der TH Deggendorf durchgeführt. Für das medizinische Verständnis und die korrekte Interpretation der Ergebnisse wurde die TH Deggendorf von Experten der Universität Regensburg und dem Universitätsklinikum Regensburg unterstützt.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

zum Teilvorhaben: Entwicklung eines interdisziplinären Ansatzes zur Tumorfrüherkennung: Scherwellenelastographie und Modellierung des menschlichen Tumorgewebes aus Ingenieurssicht

Zuwendungsempfänger:	**Technische Hochschule Deggendorf**
Förderkennzeichen:	**01KD2439**
Laufzeit des Vorhabens:	**01.10.2024 bis 31.03.2025**

Teil II: Eingehende Darstellung

1) Abgleich mit ursprünglicher Vorhabenbeschreibung

Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung eines durchgängigen Simulationsansatzes zur Kopplung von akustischer Strahlkraftanregung (Acoustic Radiation Force, ARF) mit der Ausbreitung von Scherwellen in viskoelastischem Gewebe. Auf dieser Basis sollte ein Verfahren zur numerischen Bestimmung von Gewebeelastizitäten und deren Rückrechnung aus Wellengeschwindigkeiten untersucht werden. Dazu wurden sechs Arbeitspakete (AP) definiert, die in enger Abstimmung zwischen den beteiligten Standorten der Technischen Hochschule Deggendorf bearbeitet wurden.

In AP1 stand die Berechnung des ARF-Feldes mit Hilfe numerischer Simulationen im Vordergrund. Geplant war eine Berechnung mit MATLAB MUST, tatsächlich wurde jedoch auf die Toolbox k-Wave zurückgegriffen, da wir eine zeitabhängige Volumenkraft (Body Force) benötigten und sich diese aus den k-Wave-Simulationen (zeitaufgelöste Felder) unmittelbar ableiten ließ. AP2 befasste sich mit der Definition der Materialmodell-Komplexität. Statt einer eigenen Kalibrierkampagne wurden validierte Literaturkennwerte für ein (nahezu inkompressibles) Basismodell herangezogen, um die Methodik gezielt auf die zeitaufgelöste Scherwellenausbreitung und den Inversionspfad zu konzentrieren; für die Baseline-Verifikation ist dieser Ansatz fachlich belastbar und reproduzierbar. AP3 diente der Festlegung eines exemplarischen Anwendungsfalls und der Parameterauswahl. Hier wurden idealisierte Geometrien und homogene Materialeigenschaften gewählt, um den Inversionsansatz klar nachvollziehen zu können.

In AP4 erfolgte die Umsetzung der Geometrie in ein Finite Elemente (FE) **-**Modell. Dabei wurden stabile Diskretisierungen und geeignete Zeitschritte erarbeitet, um sowohl die kurzzeitige ARF-Anregung als auch die nachfolgende Wellenausbreitung konsistent darstellen zu können. AP5 hatte die Anwendung und Verifikation zum Ziel: die berechnete Wellengeschwindigkeit wurde in Elastizitätswerte rückgeführt und mit den vorgegebenen Eingangsparametern verglichen. Hier zeigte sich eine gute Übereinstimmung, sodass der grundsätzliche Ansatz bestätigt werden konnte. In AP6 wurden die Ergebnisse schließlich zusammengeführt und in einer konsistenten Datenstruktur dokumentiert. Der Schwerpunkt lag hier auf der Nachvollziehbarkeit der Methodik und der Vorbereitung einer möglichen Weiterentwicklung hin zu komplexeren Materialmodellen und realitätsnäheren Geometrien.

Insgesamt konnte die Zielsetzung trotz kleiner Abweichungen erreicht werden. Die Anpassungen im methodischen Vorgehen führten zu einer Fokussierung auf den numerischen Kern und erlaubten es, den Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit des Ansatzes klar herauszustellen.

2. Durchgeführte Arbeiten im Detail

2.1) AP1 – ARF-Berechnung (MATLAB/k-Wave)

In diesem Arbeitspaket wurde ein durch Ultraschall erzeugtes ARF-Feld mit k-Wave numerisch berechnet und anschließend so aufbereitet, dass es in Abaqus als zeitlich begrenzte, räumlich verteilte Volumenkraft eingebracht werden kann. Ziel ist es, die durch den Push-Impuls angeregten Scherwellen für Shear Wave Elastography (SWE) in einem FE-Modell realistisch zu simulieren.

Geometrie, Koordinaten und Randbedingungen:

Die FE-Domäne entspricht einem quaderförmigen Weichgewebsblock mit den Abmessungen $X = 30\ mm$ (Tiefe), $Y = 21\ mm$ (lateral) und $Z = 4\ mm$ (Elevation). Der Ursprung liegt in der Mitte der Y–Z-Vorderfläche; die X-Achse zeigt in die Tiefe. In Y und Z ist die Domäne zentriert (Y ∈ [−10,5 mm, +10,5 mm], Z ∈ [−2 mm, +2 mm]). Die FE-Diskretisierung beträgt 60×42×8 Elemente (je 0,5 mm Kantenlänge), flankiert von Infinite Elements (CIN3D8) an ±Y, ±Z sowie +X. Für die eindeutige Zuordnung des Lastfeldes wurden die Elemente in Abaqus neu nummeriert (Zunahme der Labels schnellst in X, dann Y, dann Z, Beginn bei 1).

Ultraschall-Array, Anregung und Fokussierung:

Als Anregung diente ein 128-Element-Lineararray mit Pitch 0,3 mm, Elementbreite 0,27 mm (lateral, Y) und Elementhöhe 4 mm (Elevation, Z). Der Push-Impuls ist ein gaussian-modulierter Tonburst mit Mittelpunktfrequenz $f_0 = 7{,}61 MHz$ und Pulsdauer 100 µs. Um eine räumliche Fokussierung in der Tiefe zu erreichen, wurden phasenrichtige Verzögerungen je Element berechnet, so dass die Wellenzüge bei $x = 15\ mm,\ y = 0,\ z = 0$ in Phase zusammentreffen.

Numerische Akustik-Simulation (k-Wave):

Die Wellenausbreitung wurde in k-Wave in 3D simuliert. Die räumliche Auflösung wurde anistrop gewählt: $dx = dy = 0{,}1\ mm$ für X/Y (zur Auflösung der lateralen Fokussierung) und $dz = 0{,}5\ mm$ in Z (Elevation; schwächere Fokussierung, geringerer Auflösungsbedarf). Die Zeitschrittweite beträgt 20 ns, die Gesamtdauer 120 µs, so dass der 100-µs-Push vollständig erfasst wird. Zur Reduktion der Datenmenge wurde direkt die Effektivgröße Root-Mean-Square (RMS) des Schalldrucks über den Puls (p_{rms}) im gesamten Volumen aufgezeichnet.

Von Druckfeld zu ARF:

Aus p_{rms}wurde die Intensität berechnet (für ebene Wellen):

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$$

Unter Berücksichtigung einer frequenzabhängigen Schallschwächung (α in dB/(MHz·cm)) wurde α in Neper/m überführt. Das volumetrische ARF-Feld ergibt sich zu

$$ARF = \frac{2\alpha \mathrm{I}}{c}$$

in N/m³, d. h. als Kraftdichte.

Anpassung an das FE-Gitter und Export:

Das hochaufgelöste ARF-Volumen (k-Wave-Raster) wurde mittels trilinearer Interpolation auf die Elementmittelpunkte der FE-Diskretisierung 60×42×8 abgebildet. Dadurch liegt pro FE-Element genau ein ARF-Wert vor. Anschließend wurde eine Abaqus-Include-Datei erzeugt, die eine Amplitude (100-µs-Rechteck mit 10-µs-Anrampe) sowie für jedes Element eine *DLOAD-Zeile (BX, N/mm³) enthält.

Visualisierung und Qualitätssicherung:

Für die Dokumentation wurden diese Abbildungen erzeugt:

(i) Z-Max-Projektion des ARF (X–Y-Ebene) zur Übersicht der Fokussierung,

(ii) ARF in Y–Z-Schnitt bei x≈15 mm (Fokusebene),

Übertragung ins FE-Modell:

In Abaqus wird das ARF-Feld als volumetrische Last BX (N/mm³) über die Include-Datei eingebracht und mittels der definierten Amplitude auf die Dauer des Pushes (100 µs) zeitlich begrenzt. Für numerische Stabilität (insb. bei quasi-inkompressiblen Geweben) empfiehlt sich ein expliziter Zeitschritt für die kurzzeitige Impulsanregung und Wellenlauf, wobei Material-/Elementwahl (reduzierte Integration, geeignete Hourglass-Kontrolle) zu beachten sind. Die so erzeugten Verschiebungen und Scherwellenfelder bilden die Basis für die anschließende SWE-Auswertung (z. B. Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten, Inversionsverfahren).

In diese AP haben wir ein vollständiges, reproduzierbares Verfahren implementiert: phasenfokussierte Ultraschallanregung, zeitgemittelte Druck- und Intensitätsfelder, ARF-Berechnung in physikalisch korrekten Einheiten, passgenaue Abbildung auf das FE-Gitter und automatischer Export für Abaqus inkl. Zeitamplitude. Begleitende Abbildungen und QA-Schritte sichern die Plausibilität (Fokuslage, Nebenkeulen, Einheiten). Damit steht ein belastbares Lastfeld für SWE-Simulationen zur Verfügung.

2.2) AP2 – Materialmodell

Ziel & Auswahlkriterien:
Ziel von AP2 war die Auswahl eines Gewebemodells, das (i) die frequenzabhängige Steifigkeit im für SWE relevanten Band realistisch wiedergibt, (ii) thermodynamisch zulässig ist, (iii) sich direkt in der FE-Zeitdomäne verwenden lässt und (iv) auf Literaturkennwerten basiert, um die Methodik ohne eigene Materialkampagne zu verifizieren.

Getroffene Modellannahmen:
Eingesetzt wurde ein linear-viskoelastisches Generalized-Maxwell-Modell (Prony-Reihe) im Schermodul:

$$G(t) = G_\infty + \Sigma_{i=1}^{N} g_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \qquad g_i \geq 0, \qquad G_\infty \geq 0.$$

Die Inkompressibilität wurde über $\upsilon = 0{,}495$ angenommen (kleine Dehnungen, SWE-Anregung). Für die frequenzbasierte Einordnung wurde der komplexe Schermodul $G^*(\omega)$ aus der Prony-Parametrisierung genutzt; der Zusammenhang $C_s(\omega) \approx \sqrt{|G^*(\omega)|/\rho}$ diente nur zur Interpretation.

Als Referenz dienten Literaturdaten zu Querkontraktionszahl (ν) und Dichte (Palmeri et al. 2017) und viskoelastischen Eigenschaften von Brustgewebe in einem Mausmodell (Qiu et al. 2018). Die publizierten Speicher-/Verlustmodul-Kurven wurden im Frequenzraum per nichtlinearer Least-Squares-Approximation auf eine endliche Prony-Reihe abgebildet.

Querkontraktionszahl (ν) = 0,495

Dichte = 1000 kg/m³

G_∞= 0,37 kPa, $g_1 = C_1$= 0,98 kPa, $g_2 = C_2$= 0,48 kPa

τ_1 = 1,64 s, τ_2 = 53,14 s

Statischer Grenzwert: $G_0 = G_\infty + g_1 + g_2 \approx$ 1,82 kPa

Die Relaxationszeiten τ_i wurden logarithmisch gestaffelt über das relevante Band gewählt; Nebenbedingungen stellten Positivität und Stabilität sicher ($g_i \geq 0,\ \Sigma\, g_i + G_\infty > 0$). Die so erhaltenen Prony-Parameter wurden als Baseline-Satz übernommen. Diese Entscheidung stützt die Zielsetzung des Projekts: Methodik-Verifikation der Pipeline (ARF → Scherwelle → Inversion), nicht die erneute Materialcharakterisierung.

Das gewählte Prony-Modell gibt die Trendtreue der Referenzspektren im interessierenden Frequenzfenster wieder. In der Zeitdomäne zeigt das Modell eine stabile und effiziente Kopplung an das FE-Modell.

2.3) AP3 & AP4 – Anwendungsfall, Parameter-Screening & Geometrie/FE-Setup

Wir definieren einen klaren Referenz-Use-Case und untersuchen die Parameter, die die Scherwellenausbreitung und damit die Scherwellengeschwindigkeit-Bestimmung dominieren. Danach setzen wir alles in ein stabil laufendes FE-Modell (Abaqus) um, dass Randartefakte minimiert und die Inversion nicht verfälscht.

Abaqus-Step-Type: warum explizit?

Für kurzzeitige, transiente Wellenprozesse ist Abaqus/Explicit die richtige Wahl:

- Zeitgetreue Wellenabbildung: Der explizite Algorithmus folgt dem Courant-Kriterium; kleine Zeitschritte sind physikalisch motiviert (Ausbreitungsgeschwindigkeit, Elementgröße) und erhalten die Phaseninformation.
- Keine globalen Gleichungslöser: Dadurch robust bei großen Modellelasten, starken Materialkontrasten und bei kurzen Pulsanregungen (Push-Pulse).
- Weniger numerische Dämpfung: Im Gegensatz zu Implizit (das zur Stabilität oft stärker dämpft) bleiben kurzwellige Anteile erhalten, wichtig für Scherwellengeschwindigkeit (c_s) und Amplitudengang.

Elementwahl & Vernetzung – C3D8/CIN3D8:

- Für Wellen gilt: regelmäßige Hex-Gitter reduzieren numerische Dispersion und verbessern die Phasengenauigkeit.
- In Abaqus/Explicit gibt es kein hybrid Hex-Elemente C3D8H. Bei nahezu inkompressibler Matrix (ν = 0,495) stehen realistisch C3D8 (volle Integration) und

C3D8R (reduziert) zur Wahl. Da Bei sehr weichen Scheranteilen und kleinen Wellenamplituden kann C3D8R zu Hourglassing neigen; C3D8 Elemente wird bevorzugt.

- Strukturiertes Hex-Raster mit konstanter Zellgröße in x (Ausbreitung) und y (lateral). In z (Elevation) genügt eine kleine Schichtzahl, um 3D-Effekte zuzulassen, aber den Aufwand im Rahmen zu halten.

- Randbehandlung mit Infinite Elements (CIN3D8) ; Zur Minimierung von Randreflexionen wird eine ein- bis mehrlagige CIN3D8-Schicht an den offenen Rändern platziert (±Y, ±Z und +X). Die Volumenlast ARF (als DLOAD, BX in N/mm³) wird ausschließlich den regulären C3D8-Volumenelementen zugewiesen; die CIN3D8-Zone bleibt lastfrei. Kopplung erfolgt knotenkompatibel ohne zusätzliche Kontakte; die Elementkantenlänge der letzten C3D8-Schicht entspricht der der CIN3D8-Eingangsfläche, um numerische Impedanzsprünge zu vermeiden.

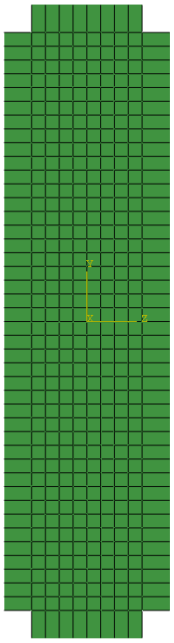

Abbildung 1: Vernetzung (X=0)

Elementgröße, Herleitung & Frequenzbereich:

Die Netzwahl (h=0,5mm) folgt dem FE-Leitfaden für ARF-induzierte Scherwellen in gewebeimitierenden Medien (Palmeri et al. 2017). Für Phasen-/Dispersionstreue sind N=8 bis 10 Elemente pro kürzeste Wellenlänge λ_{min} sinnvoll. Mit $\lambda = c_s/\mathrm{f}$ ergibt sich:

$$f_{max} = c_s/\mathrm{Nh}$$

da $c_s = \sqrt{G/\rho}$=1,35 m/s und h = 0,5mm = 5×10e−4 m,

bei N = 8:

$$f_{max} \approx 337\ Hz$$

Bei N = 6:

$$f_{max} \approx 421\ Hz$$

Das bedeutet Elementgroße von 0,5mm deckt ~300–500 Hz Frequenzbereich ab (je nach Scherwellengeschwindigkeit und gewünschtem N).

4) Geplante Studien (experimentell schwer zugänglich)

Mit der Pipeline „ARF → FE-Scherwelle → Inversion“ können wir Parameter systematisch untersuchen, die experimentell nur schwer oder gar nicht zugänglich sind:

- Wir untersuchen die Fokaltiefe und beschreiben, wie die Fokuslage das angeregte Volumen, die Form der Welle und die Genauigkeit der Geschwindigkeitsbestimmung beeinflusst.
- Wir variieren die Tumorgröße (Inklusion) und beobachten, wie Streuung an der Inklusionsgrenze die gemessene Scherwellengeschwindigkeit verändert.
- Wir ändern die Tumortiefe und bewerten, wie Dämpfung und Fokusgeometrie das Signal-zu-Rausch-Verhältnis sowie die Stabilität der Auswertung beeinflussen.
- Wir analysieren Kontrast und Heterogenität des Gewebes, indem wir Materialkontrast (ΔG), Form und Randkrümmung der Inklusion verändern; als Ausblick prüfen wir auch Anisotropie

2.4) AP5 – Anwendung & Verifikation (Extraktion der Steifigkeit)

Ziel:
Die in AP1 bis AP4 aufgebaute Kette wird auf den definierten Anwendungsfall angewendet. Aus der simulierten Antwort bestimmen wir zunächst die Scherwellengeschwindigkeit c_s und leiten daraus Steifigkeitsgrößen ab. Anschließend prüfen wir, ob die rückgerechneten Größen mit den eingestellten Materialparametern (Prony-Reihe) im erwartbaren Rahmen liegen.

Vorgehen / Datenpfad:
Zuerst wird die zeitabhängige akustische Strahlkraft f(**r**,t) aus AP1 als Volumenlast in das explizite FE-Modell eingespielt. Während der Ausbreitung der resultierenden Scherwelle zeichnen wir an definierten Messpunkten entlang einer Messlinie die zeitlichen Antwortsignale (Verschiebung) auf. Aus diesen Zeitsignalen bestimmen wir die Laufzeitdifferenzen zwischen benachbarten Messpunkten und erhalten daraus die lokale Scherwellengeschwindigkeit. Die Scherwellengeschwindigkeit wird anschließend zur Rückrechnung von effektiven Steifigkeitswerten verwendet, die mit den Vorgabewerten der Prony-Parametrisierung verglichen werden.

Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeit mit Kreuzkorrelation:
Die Kreuzkorrelation ermittelt, wie stark sich zwei Zeitsignale ähneln, wenn eines gegenüber dem anderen zeitlich verschoben wird. Konkret wählen wir zwei benachbarte Messpunkte A und B im Modell mit dem Abstand Δs. Die zugehörigen Zeitsignale heißen $u_A(t)$ und $u_B(t)$. Wir verschieben $u_B(t)$ um eine Zeit τ und berechnen für jede Verschiebung ein Ähnlichkeitsmaß; der Zeitversatz $\hat{\tau}$, bei dem dieses Maß maximal ist, entspricht der Laufzeit der Welle von A nach B. Mit dem bekannten Abstand Δs folgt daraus die lokale Geschwindigkeit

$$c_s = \Delta s / \hat{\tau}$$

Inversion zu Steifigkeitsgrößen:
Unter kleinen Dehnungen und nahezu inkompressiblem Verhalten gilt näherungsweise

$$G_{eff} = \rho c_s^2, \qquad E_{eff} = 2G_{eff}(1+\upsilon)$$

Im viskoelastischen Kontext interpretieren wir G_{eff} als frequenznahe effektive Schersteifigkeit und vergleichen ihn mit $|G^*(\omega)|$ der gewählten 2-Term-Prony-Reihe (G_∞ = 0,37 kPa, g_1 = 0,98 kPa, g_2 = 0,48 kPa, τ_1 = 1,64 s, τ_2 = 53,14 s, G_0 = 1,82 kPa) im entsprechenden Frequenzbereich.

CFL-Kriterium und erforderliches Δt:
Für die stabile explizite Zeitintegration muss das Courant–Friedrichs–Lewy-Kriterium (CFL) erfüllt sein. Es fordert, dass die numerische Informationsausbreitung je Zeitschritt nicht schneller ist als die physikalische Welle. In der hier verwendeten Form schreiben wir:

$$\Delta t \leq \frac{h}{C c_{max}}$$

wobei h die kleinste Elementkante ist, c_{max} eine maßgebliche Wellengeschwindigkeit im Material (hier die Scherwellengeschwindigkeit c_s) und C ein konservativer Formfaktor (hier C=1). Mit der Elementgröße h = 0,5 mm (5e-4 m), und den im Bericht verwendeten Geschwindigkeiten für den im Setup ebenfalls betrachteten oberen Bereich $c_s = 2\ m/s$ erhalten wir:

$$\Delta t \leq \frac{5e-4}{2} = 0{,}25\ ms$$

Damit liegt das erforderliche Zeitinkrement im Bereich $\Delta t \leq 0{,}25\ ms$, wenn wir uns am strengeren Fall orientieren. Ein gewähltes Δt, das deutlich unterhalb dieses Grenzwerts liegt, erfüllt das Kriterium und bildet die Wellenphasen zuverlässig ab. In den Simulationen wurde ein Zeitinkrement von 1 µs verwendet

Vergleich „eingestellt vs. rückgerechnet“:
Aus den Geschwindigkeiten erhalten wir G_{eff} und E_{eff} und vergleichen diese mit den Zielgrößen der Prony-Parametrisierung. Die Kenngrößen (prozentuale Abweichung) werden nach Eintrag der konkreten Zahlen aufgeführt.

Robustheit und beobachtete Einflüsse:
Innerhalb der durchgerechneten Bereiche zeigte sich: Eine feinere Netzweite reduziert numerisches Rauschen, ändert die gemessene Scherwellengeschwindigkeit jedoch nur gering. Die viskoelastische Dämpfung wirkt primär auf die Amplitude und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis.

Die Methode liefert stabile Scherwellengeschwindigkeiten und daraus konsistente Steifigkeitswerte. Im Referenzfall stimmen die rückgerechneten Größen plausibel mit den vorgegebenen viskoelastischen Kennwerten überein. Damit ist die Korrelation zwischen mechanischem Verhalten und Auswertung der Ultraschall-Simulation für den gewählten Anwendungsfall gezeigt und eine solide Grundlage für weiterführende Parameterstudien gelegt.

2.5) AP6 – Zusammenfassung, Datenkonsolidierung und Dissemination

Ziel:
AP6 fasst die in AP1–AP5 erarbeitete Pipeline zusammen, stellt die Korrelation zwischen Materialmodell und Auswertung der Ultraschall-Simulation klar heraus und bündelt die für die

Nachvollziehbarkeit erforderlichen Daten in einer kompakten Struktur. Außerdem werden die Kernergebnisse in einer kurzen, weiterverwendbaren Form dokumentiert.

Korrelation „Material ↔ Messmethode“:
Ausgehend vom viskoelastischen Prony-Modell (AP2) und der ARF-Anregung (AP1) zeigt die Simulation (AP3/4), dass die aus den Zeitsignalen abgeleitete Scherwellengeschwindigkeit mit der effektiven Schersteifigkeit erwartungskonform zusammenhängt. Im Abgleich mit dem Referenzsatz der 2-Term-Prony-Parameter (AP2) liegen die rückgerechneten Steifigkeitswerte im plausiblen Bereich; numerische Einstellungen (z. B. Netzweite $h=0{,}5\ \mathrm{mm}$, explizite Integration) beeinflussen primär Dispersion und Rauschen, nicht die generelle Tendenz der Korrelation.

Konsolidierung der Datenstruktur:
Zur Nachvollziehbarkeit werden Eingaben und Ergebnisse geordnet abgelegt: (i) Eingaben (Materialparameter des Prony-Modells, Basisgrößen E, ν, ρ, Geometrie/Netz), (ii) Anregung (ARF-Feld in Raum und Zeit), (iii) Simulationsergebnisse (Zeitverläufe an Messpunkten), (iv) Auswertung (ermittelte Scherwellengeschwindigkeit, daraus abgeleitete G_{eff} und E_{eff}). Diese Bündelung dient als Ausgangspunkt für spätere Erweiterungen (z. B. Heterogenitäten oder alternative Randmodelle).

Dissemination:
Auf Basis der konsolidierten Pipeline ist die Erstellung eines Fachartikels geplant, in dem die Methodologie sowie parametrische Studien zu Fokaltiefe, Inklusionsgröße und Inklusionstiefe systematisch dargestellt werden. Der Beitrag beschreibt die ARF-gekoppelte FE-Simulation, die Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeit mittels Kreuzkorrelation und die daraus abgeleitete Steifigkeitsrückrechnung. Gezeigt werden soll, in welchem Bereich die Methode robuste Geschwindigkeits- und Steifigkeitsschätzungen liefert und wie stark die genannten Parameter die Ergebnisse beeinflussen. Der Artikel umfasst eine klare Beschreibung von Geometrie, Randbedingungen, Netz, Zeitintegration, und Materialmodell, ergänzt um Reproduzierbarkeitsmaterial (Parameterlisten, Skript-Hinweise). Ziel ist die Einreichung bei einem einschlägigen Journal im Bereich Ultraschall/Elastographie oder Biomechanik.

3. Ergebnisse im Einzelnen (wissenschaftlich-technisch)

3.1) ARF-Feld und Wellenausbreitung

Die Abbildung zeigt die zeitgemittelte Acoustic-Radiation-Force (ARF)-Verteilung im X–Y-Schnitt bei Z = 0. Dargestellt ist die Kraftdichte in N/mm³ (farbkodiert, linear skaliert), wobei X in die Tiefe (0 bis 30 mm) und Y lateral (−10,5 bis +10,5 mm) verläuft. Die ARF wurde aus dem in k-Wave berechneten RMS-Druckfeld (p_{rms}) während des 100-µs-Pushes abgeleitet.

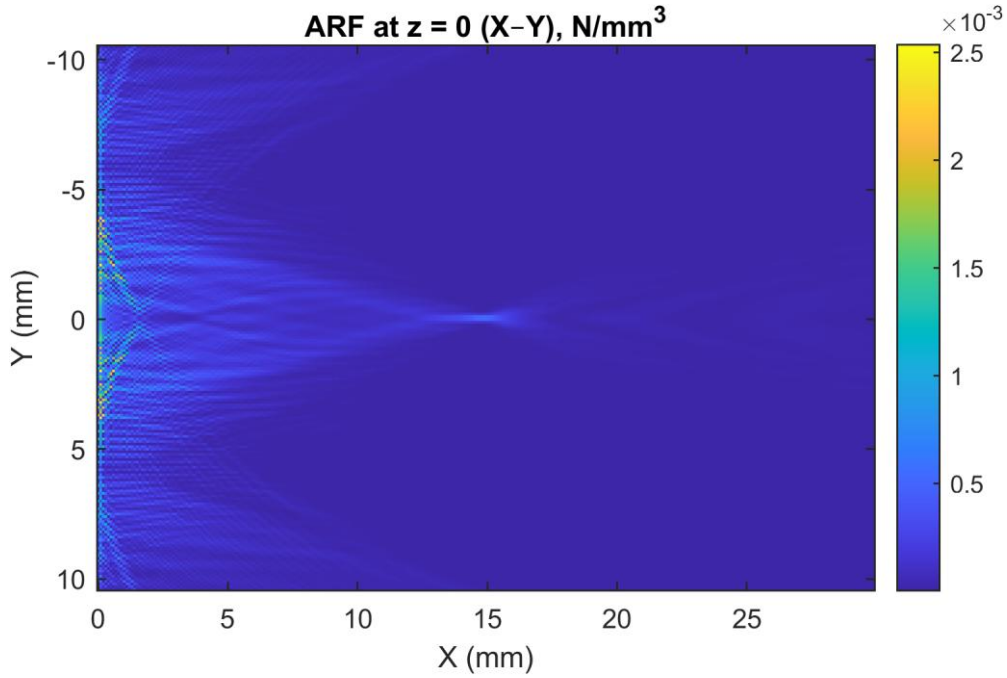

Abbildung 2: Zeitgemittelte ARF-Kraftdichte (N/mm³) im Mittelebenen-Schnitt Z = 0. Fokus bei x ≈ 15 mm

und anschließend auf das FE-Raster (60×42×8) trilinear interpoliert. Der Sender ist ein 128-Element-Lineararray (Pitch 0,3 mm), phasenfokussiert auf x ≈ 15 mm.

Beobachtungen im Bild (Z = 0):

- Ein lokalisiertes Maximum der ARF im Bereich x ≈ 15 mm, y ≈ 0 mm (Fokus).
- Asymptotisch abfallende ARF-Werte in Richtung Rand und in flacher Tiefe; im Nahfeld (nahe der Sendeebene) bleibt eine restliche Anregung sichtbar (apodisationsbedingt).
- Die laterale Hauptkeule ist aufgrund des großen Apertur-zu-Fokus-Verhältnisses (kleines F-Zahl) sehr schmal; im X–Y-Schnitt wirkt sie punktnah, was der erwarteten Beamlage entspricht.

3.2) Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeit

Die Abbildung 3 zeigt Verschiebungen bei t=1,5ms, t=2,5ms und t=4,5ms. Die Scherwelle breitet sich lateral aus; die Front ist glatt und mit zunehmender Zeit nimmt die Amplitude ab (viskoelastische Dämpfung), die laterale Ausdehnung der Wellenfront nimmt zu.

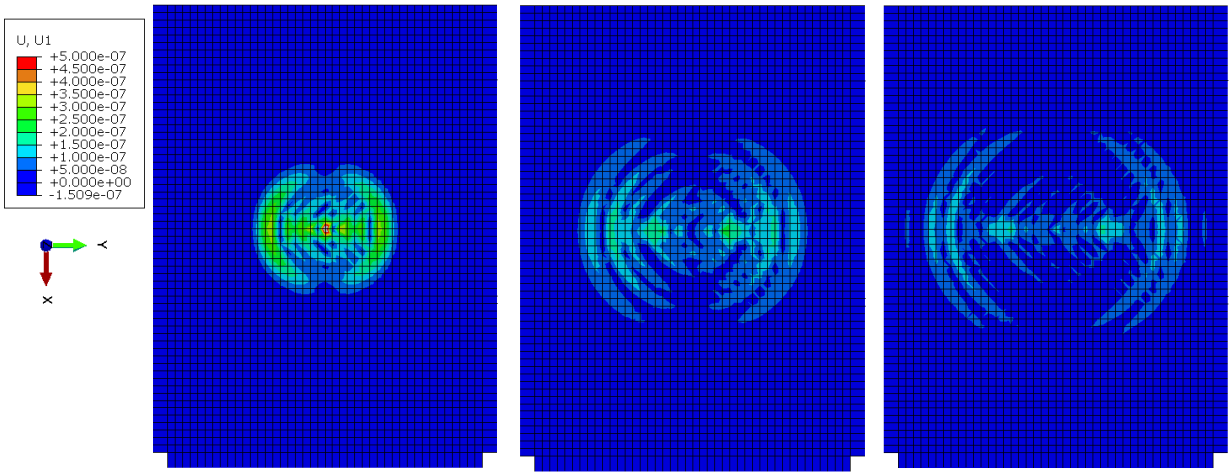

Abbildung 3: Verschiebung bei t=1,5 ms, 2,5 ms und 4,5 ms; Ebene Z=0

Die Geschwindigkeitsbestimmung erfolgte auf einer lateralen Linie in Fokusnähe (Tiefe X ≈ 15mm, Ebene Z = 0). Entlang eines Pfades zwischen zwei Messpunkten P1 (bei Y = 3,5 mm) und P2 (bei Y = 9,0mm) wurden die Zeitverläufe der Verschiebung ausgewertet. Der Punktabstand beträgt Δs = 5,5 mm. Als Laufzeit wurde die Zeitdifferenz bestimmt, bis die Verschiebung am Punkt P2 eintrifft. Die zugehörigen Zeitsignale stammen aus den in Abbildung 3a–f gezeigten Feldern.

	Δs [mm]	$\hat{\tau}$ [ms]	c_s [m/s]	Abweichung %
P1-P2	5,5	3,5	1,57	16,5

3.3) Rückrechnung effektiver Steifigkeit

Aus der gemessenen Scherwellengeschwindigkeit wird eine effektive Schersteifigkeit bestimmt. Für kleine Dehnungen und nahezu inkompressibles Verhalten gilt näherungsweise

$$G_{eff} = \rho c_s^2, \qquad E_{eff} = 2G_{eff}(1+\upsilon)$$

Querkontraktionszahl (ν wurde mit 0,495 und die Dichte mit 1000 kg/m³ angenommen. Daraus ergibt sich die Berechnung:

$$G_{eff} = 2{,}465\ kPa, \qquad E_{eff} = 7{,}37\ kPa$$

4. Ergänzungen

4.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Fördermittel wurden überwiegend für Personalkosten zur Bearbeitung der Arbeitspakete (ARF-Berechnung, Materialmodellierung, Simulation, Auswertung) eingesetzt.

4.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren für das Erreichen der Projektziele zwingend erforderlich und in Umfang wie Tiefe angemessen. Die Kopplung aus ARF-Anregungsmodell, viskoelastischer Materialkalibrierung und 3D-FE-Wellenausbreitung ist Stand-der-Technik für eine belastbare SWE-Simulation. Die gewählten Methoden, der Ressourceneinsatz und die zeitliche Taktung folgten einer klaren Wirk-/Nachweiskette: Anregung → Ausbreitung → Messgröße → Rückrechnung.

In Summe ist die Projektarbeit sowohl fachlich notwendig als auch verhältnismäßig: Sie liefert belastbare technische Ergebnisse und übertragbare Werkzeuge bei effizientem Einsatz der bewilligten Mittel. Das spezifische Fachgebiet benötigt tiefes Fachwissen, wobei für die kurze Projektlaufzeit beachtliche Ergebnisse erzielt wurden.

4.3 Voraussichtlicher Nutzen

Die SWE-Methodik (ARF → 3D-FE-Ausbreitung → Scherwellengeschwindigkeit-Messung → Rückrechnung E/G) ist explizit für systematische Parameteruntersuchungen ausgelegt. Mit ihr lassen sich Sensitivitäten gegenüber Materialparametern (Prony-Anteile, ν, ρ), Diskretisierung (Elementgröße relativ zu λ, Zeitschritt relativ zu f_max), Randbedingungen (Infinite Elemente, Dämpfung) und Anregungsparametern (Pulsdauer, Apertur, Apodisierung) quantifizieren. So entstehen belastbare Ursache-Wirkungs-Kurven, die direkt in Leitlinien und Fehlertoleranzen übersetzbar sind.

Für die Verbesserung der SWE liefert die Vorgehensweise einen wertvollen Hebel. Automatisierte Grid/Time-Step-Empfehlungen aus Ziel-Frequenz und gewünschter Phasengenauigkeit, sowie Scherwellengeschwindigkeit-Robustheitsmetriken für die Inversion. Das erhöht Reproduzierbarkeit, reduziert Kalibrieraufwand und unterstützt die Ableitung praxisnaher Best-Practices für Forschung und Anwendung.

Die Ergebnisse zeigen die Machbarkeit des Ansatzes der Integration von Ingenieursmethoden in der Weiterentwicklung von medizinischen Diagnosemethoden wie dem Ultraschall. Die Arbeiten in dem Projekt dienen als Grundlage für weiterführende Forschungen mit Fokus auf Validierungen von spezifischen Anwendungsfällen und stellen die Basis des Transfers von Grundlagenforschung in die Praxis dar.

4.4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden in der Projektlaufzeit und kurz danach in allgemeinverständlichen Formaten publik gemacht, wie z.B.:

- Fachkommunikation
  - Bericht PRP, perpetuum – Agentur für die Nationale Dekade gegen Krebs (NDK)
- Öffentlichkeitsarbeit
  - Ausstellung: Roll-Up zur Öffentlichkeitsarbeit, Veranstaltung „500 Jahre Markt Hutthurm“ (breite Öffentlichkeit)
  - Social Media: Beitrag #ForscherFreitag der THD
  - Presse:
    - Lokalzeitung „MuW Nachrichten“ – Seite 1 inkl. Beitrag im Innenteil
    - Pressemitteilung über die Pressestelle der THD
  - Podcast / YouTube: ForschungsFunk #2 – *„Was ist die Zukunft der Tumorerkennung?“*
  - Projektvorstellung & Pressemitteilung für die Landtagsabgeordneten Josef Heisl und Stefan Meyer
  - LinkedIn-Newsletter der THD: *„Tumorfrüherkennung dank Ingenieurwissenschaften?“*

Interne Ergebnisse liegen als Technischer Bericht, Slides und Code-Repository (SWE-Toolkit, Beispiel-Cases) vor und bilden die Basis für die Publikation.

5. Referenzen

Qiu, Suhao, Xuefeng Zhao, Jiayao Chen, Jianfeng Zeng, Shuangqing Chen, Lei Chen, You Meng et al. "Characterizing viscoelastic properties of breast cancer tissue in a mouse model using indentation." Journal of Biomechanics 69 (2018): 81-89.

Palmeri, Mark L., Bo Qiang, Shigao Chen, and Matthew W. Urban. "Guidelines for finite-element modeling of acoustic radiation force-induced shear wave propagation in tissue-mimicking media." IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control 64, no. 1 (2016): 78-92.