

Schlussbericht vom 30.06.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 20669 BG

Thema

Entwicklung einer multisensorbasierten Systemlösung zum Bestimmen der mechanischen Reinigungswirkung in Ultraschallanlagen als Voraussetzung für die zukünftige Integration von intelligenten Steuer- und Regelungskonzepten

Berichtszeitraum

01.04.2019 - 31.12.2021

Forschungsvereinigung

Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e.V. – DGO

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsstelle 1:
Fraunhofer IVV Dresden,
Institutsteil Verarbeitungstechnik
Heidelberger Str. 20, 01189 Dresden
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschak
Projektleiter: Dr.-Ing. Enrico Fuchs

Forschungsstelle 2:
Fraunhofer IGCV,
Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler
Projektleiter: Andreas Wörfel, M.Sc.

Gefördert durch:

Inhalt

1	Einleitung.....	2
2	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	2
2.1	Ausgangssituation.....	2
2.2	Stand der Forschung und Entwicklung.....	4
2.3	Arbeitshypothese.....	11
3	Forschungsziel.....	11
4	Ergebnisse der Forschungseinrichtungen.....	12
4.1	Vorbemerkungen.....	12
4.2	durchgeführte Arbeiten und erreicht Ergebnisse.....	14
5	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielstellungen des Antrages und Angaben zur Mittelverwendung.....	49
6	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse des Forschungsvorhabens für kleine und mittlere Unternehmen (KMU).....	53
7	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	56
8	Literaturverzeichnis.....	59

1 Einleitung

Industrielle Reinigungsprozesse sind ein qualitätserzeugender Prozessschritt bei der Herstellung von Bauteilen, in dem filmische Verschmutzungen aus Vorprozessen (Kühlschmierstoffe, Ziehöle etc.) sowie partikuläre Fertigungsrückstände (Späne, Grat etc.) entfernt werden. Sie erzeugen die für Nachfolgeprozesse (Kleben, Schweißen, Beschichten, Lackieren, Montage etc.) erforderliche Sauberkeit der Teileoberflächen und haben hierdurch direkten Einfluss auf die resultierende Funktionssicherheit, Optik und Haptik des Endproduktes. Aus der Relevanz für die Produktqualität und dem signifikanten Anteil an den Fertigungskosten und dem Ressourcenverbrauch von Wertschöpfungsketten resultiert ein zunehmender Innovationsdruck in der industriellen Bauteilreinigung.

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

2.1 Ausgangssituation

Steigende Anforderungen an den Umweltschutz, die Notwendigkeit nach Ressourcenschonung und zunehmende Produktvielfalt führen unter anderem zu sich verändernde Reinigungsprozesse im Kontext der Fertigung industrieller Bauteile. Ein Ansatz zur Beherrschung der Komplexität und der schnellen Reaktion auf sich verändernde Anforderungen ist der Wandel ausgehend von der erfahrungsbasierten Prozess- und Anlagengestaltung sowie Steuerung durch den Bediener hin zur wissensbasierten, adaptiven Reinigung. Maßgebliche externe Treiber dieser Entwicklung sind:

- steigende Anforderungen an Prozess- und Produktqualität sowie Ressourceneffizienz im für den Wirtschaftsstandort Deutschland wichtigen High-Tech- und Premium-Segment, welches durch einen hohen Anteil von Fein- und Feinstreinigung und die zunehmende Bedeutung von Ultraschall gekennzeichnet ist,
- neue Richtlinien, die – analog zur VDA 19 für Partikel [1] – zukünftig restriktive Anforderungen bezüglich filmischer Verunreinigungen festschreiben werden [2],
- Fachkräftemangel und Verlust von erfahrenen Mitarbeitern bei deren Erreichen des Rentenalters,
- globalisierte Wertschöpfungsketten, die einen effizienten Transfer von Fertigungsprozessen zwischen unterschiedlichen Anlagen- oder Produktionsstandorten unter Beibehaltung hoher Qualitätsstandards erfordern,
- die Flexibilisierung von Prozessketten im Zuge der Transformation zur Industrie 4.0,

- Lieferkettenprobleme im Zuge der weltweiten Corona-Pandemie,
- wegbrechende Märkte und Lieferprobleme infolge des Ukraine-Krieges,
- die notwendige Anpassung an neue Werkstoffe, Teilegeometrien und Oberflächen infolge neuer Materialien und Technologien, wie beispielsweise Verbund- und Kompositwerkstoffen sowie der additiven Fertigung (3D-Druck).

Aufgrund der komplexen, bislang nicht vollständig theoretisch beschriebenen Wirkzusammenhänge zwischen Verfahren, Chemie und Anlage sowie des Mangels an praktikabler Messtechnik zur notwendigen umfassenden Überwachung des Prozesszustandes (siehe Abschnitt) ist die Teilereinigung in vielen Prozessketten derzeit das kritische Glied auf dem Weg zur durchgängig wissensbasierten, adaptiven Fertigung der Industrie 4.0.

Im Dezember 2014 veranstaltete der Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (FiT) in Kooperation mit Forschungseinrichtung (FE) 1 den Workshop „Ultraschall – Anwendung in der industriellen Bauteilreinigung“ [3]. Im Dialog von Experten führender Anlagenhersteller und Anlagenbetreiber, Komponentenlieferanten sowie Forschungsinstitute wurde deutlich, dass die vorgenannten Hindernisse wegen der in Abbildung 1 dargestellten komplexen Wirkzusammenhänge in der Ultraschallreinigung in besonderem Maße zum Tragen kommen. Dies hat vor allem für kleine und mittelständige Unternehmen negative Konsequenzen, da bei ihnen die Problemstellungen der Prozess- und Anlagengestaltung sowie der Regelung vor dem Hintergrund begrenzter Ressourcen und der Konkurrenzbedingungen des globalisierten Marktes zusammentreffen. Beispielsweise ist die Entwicklung kundenspezifischer Reinigungsanlagen ein Kompetenzschwerpunkt von KMU in der Branche. Hierbei erfolgt die Auslegung zumeist auf Basis von Erfahrungswerten und aufwändigen Reinigungsversuchen. Letztere berücksichtigen typischerweise die Sauberkeit am Teileingang und Teileausgang, funktionsbestimmende Anlagenparameter (Ultraschalleistung, Badtemperatur etc.) sowie die Reinigerkonzentration. Die Wirkungskette des Ultraschalls (Abbildung 1) ist hierbei nicht zusammenhängend messtechnisch zugänglich und muss deshalb als Black-Box-Modell betrachtet werden, bei dem nur externe Parameter (z. B. elektrische Leistung der Ultraschall-Schwinger) variiert oder beobachtet werden können.

Stand der Technik zur Auslegung und Überprüfung der Ultraschallreinigung sind Versuchsreihen mit Aluminiumfolie oder Musterteilen, deren nachträgliche manuelle Auswertung Rückschlüsse auf die Erosionswirkung ermöglicht. Wegen der Vielzahl praxisrelevanter Einflussgrößen auf die Ultraschallwirkungskette (Reinigerkonzentration, Temperatur, Geometrie- und Strömungsverhältnisse etc.) würde der Umfang umfassender Einflussanalysen, beispielsweise zur systemorientierten Anlagen- oder Prozessoptimierung, mit diesen Testverfahren die zeitlichen und personellen Ressourcen von KMU übersteigen. Die Ursache hierfür ist das Fehlen der folgenden Schlüsselemente für das

zusammenhängende Erfassen der Wirkungskette:

- Messtechnik zur Überwachung des Ultraschallfeldes im Waschbad,
- Sensoren für die Erosionswirkung,
- praxistaugliche Systemlösungen zum Verarbeiten und Aufbereiten der Einzelergebnisse aus unterschiedlichen physikalischen Domänen (komplexe Impedanz der Schwinger, Schalldruckpegel etc.) hinsichtlich der Reinigungswirkung sowie
- konstruktive Lösungen zur Anlagenintegration einer entsprechenden Multisensorik.

Als Konsequenz der vorgenannten Defizite können vorhandene Optimierungspotenziale, beispielsweise bezüglich der elektrischen Ansteuerungsleistung der Schwinger oder der geometrischen Anlagengestaltung, derzeit nicht vollständig genutzt werden. Außerdem ist die Anwendung wissensbasierter Auslegungs- und Prozessführungskonzepte für die Industrie 4.0 erschwert, da Zusammenhänge zwischen einzelnen Gliedern der Ultraschallwirkungskette an der Anlage nicht direkt nachvollzogen werden können.

Erste erfolgreiche Praxisbeispiele aus der Reinigungstechnik verdeutlichen das Potenzial einer ganzheitlichen Prozessüberwachung durch den Einsatz von Multisensorik (SCUID, Chemische Werke Kluthe GmbH; Innovationsprojekt Ressourceneffiziente selbstoptimierende Großwäscherei, Herbert Kannegiesser GmbH). Speziell für die Ultraschallreinigung gibt es bislang keine derartigen Musterlösungen, da bezüglich der Messung von Schallfeldgrößen folgende besondere wissenschaftlich-technische Herausforderungen bestehen:

- Im Gegensatz zu skalaren, großräumig gleichverteilten Prozessgrößen wie Reinigerkonzentration, Temperatur oder Druck, besteht eine erhebliche Abhängigkeit vom Messort und den geometrischen Randbedingungen.
- Bei der Messung tritt eine signifikante Rückwirkung auf, da das Schallfeld durch das Einbringen von Sensoren beeinflusst wird.
- Komplexe, teils theoretisch nicht vollständig beschriebene Wirkzusammenhänge erfordern spezielle Verfahren zur Messwertverarbeitung.

Zu diesen Aspekten sollen im Projekt Lösungen entwickelt werden, die – gemessen an der applikativen Zielstellung – hinreichend genaue und im Kontext der Industrie 4.0 praktikable Messungen ermöglichen.

2.2 Stand der Forschung und Entwicklung

Ultraschallreinigung

Die Ultraschallreinigung ist ein Tauchverfahren, bei dem über Schwinger Ultraschall ins Reinigungsbecken eingebracht wird, der sich in Form von Longitudinalschwingungen im

Reinigungsmedium ausbreitet. Für die effiziente Reinigung kommen dabei typischerweise Frequenzen zwischen 20 kHz und 80 kHz zum Einsatz [4]. Unter dem Einfluss eines örtlich in der Unterdruckphase befindlichen Schallfeldes entstehen in Flüssigkeiten Hohlräume, die als Kavitationsblasen bezeichnet werden. Diese implodieren in der darauffolgenden Phase erhöhten Drucks wieder, erzeugen dabei Zugdrücke von theoretisch ca. 1000 bar und bilden Flüssigkeitsjets aus. Die mechanische Erosionswirkung dieser Jets bewirkt das Entfernen von partikulären und filmischen Verunreinigungen sowie – bei zu hohen Intensitäten – eine Abrasion der Bauteiloberfläche. Abbildung 1 zeigt die aus diesen Zusammenhängen resultierende Wirkungskette in der Ultraschallreinigung.

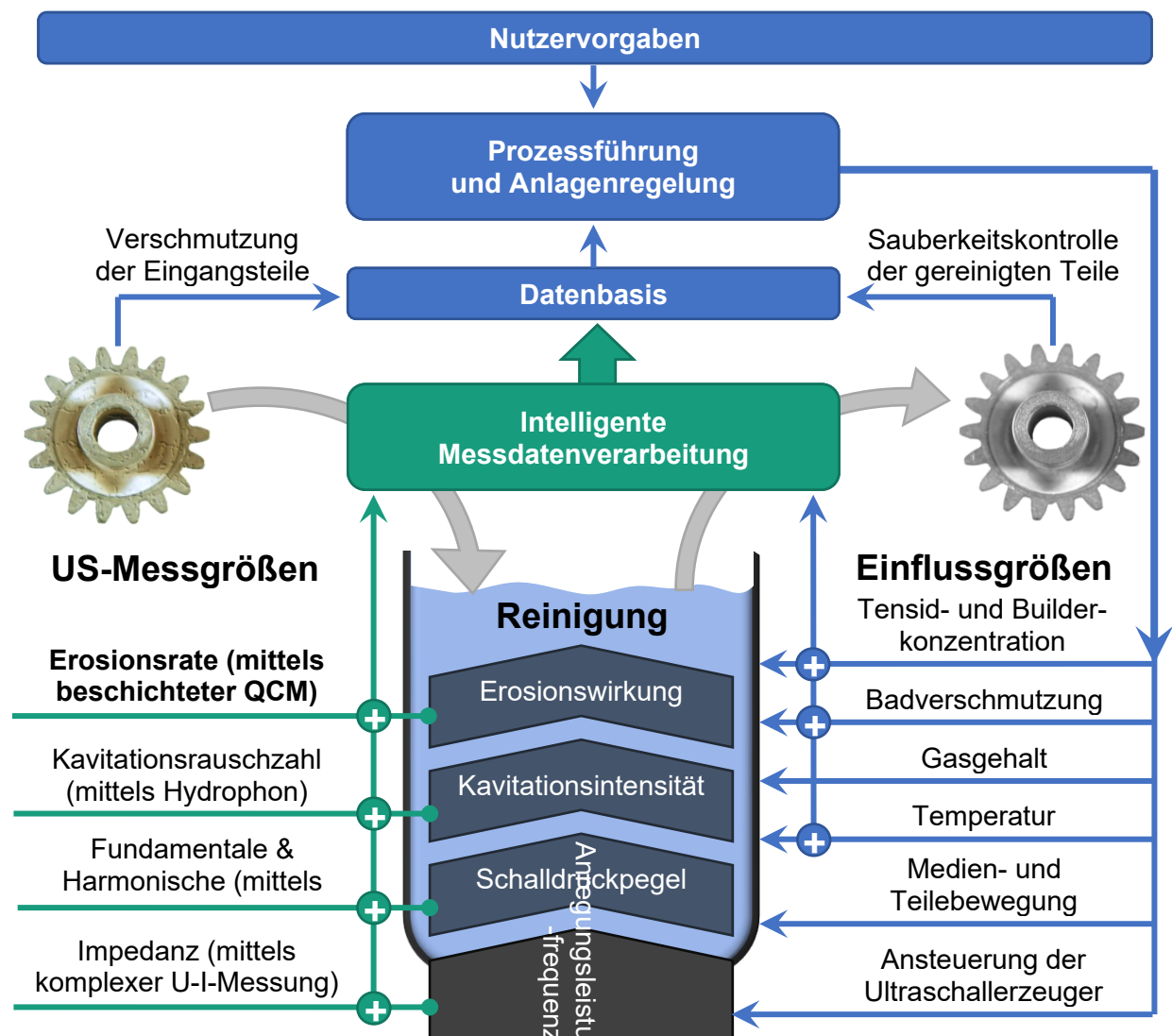


Abbildung 1: Wirkungskette, Einfluss- und Messgrößen in der Ultraschallreinigung

Kavitation entsteht bevorzugt an Grenzflächen, die eine unebene Oberfläche aufweisen. Verschmutzungen auf Bauteiloberflächen sind meist inhomogen strukturiert und bieten somit optimale Kavitationskeime. Da sich in Ultraschallbädern stehende Wellen mit lokalen

Druckbäuchen (hohe Wechseldrücke und Kavitation = hohe Reinigungswirkung) und Druckknoten (keine Wechseldrücke = kaum Reinigungswirkung) ausbilden, werden nur bestimmte Bereiche gereinigt. KAHLEN [4] beobachtete infolge dieses Effekts in zylindrischen Lumen ringförmige Restverschmutzungen. Neben dem Einfluss der Anlagengeometrie hat auch die Bauteilgeometrie entscheidenden Einfluss auf die lokale Schalldruckpegelverteilung. Beispielsweise können in Sacklochbohrungen oder an Hinterschneidungen Totbereiche entstehen, die in der Praxis durch meist empirisch festgelegte Bewegungen der Bauteile vermieden werden sollen [5].

Weitere Einflüsse resultieren aus der Wirkung der Medienparameter auf die Entstehung von Kavitation. Die Anzahl und Größe sowie die resultierende Erosionswirkung der bei einem bestimmten Schalldruckpegel entstehenden Kavitationsbläschen hängen unter anderem von der Temperatur, dem Gasgehalt und der Reinigerkonzentration (Tensid- und Builderkomponente) des Bades ab [4]. Ein zu hoher Gasgehalt verursacht zum Beispiel die sogenannte „weiche“ Kavitation, bei der ungelöste Gasblasen oszillieren. Hierbei bleiben die für die Reinigung notwendigen hohen Druckschwankungen und Flüssigkeitsjets aus. In der Praxis werden Ultraschallbäder deshalb zeitaufwändig entgast, um in allen zulässigen Prozesszuständen die notwendige „harte“ Kavitation sicherzustellen, bei der infolge lokal stark begrenzter Unterschreitungen des Dampfdruckes transiente Kavitationsblasen mit hoher Erosionswirkung entstehen.

Die vorgenannten komplexen Einflüsse entlang der Ultraschallwirkungskette wurden exemplarisch für definierte Versuchsanordnungen experimentell und theoretisch erforscht [6], [7]. Zum quantitativen Transfer der dadurch erzielten Ergebnisse auf reale Anlagen und Prozesse fehlen in der notwendigen Anwendungsbreite praktikabel nutzbare Methoden sowie theoretische Grundlagen. Deshalb wurden aus dem Stand der Forschung qualitative und semi-quantitative Richtlinien abgeleitet, die in Kombination mit empirischen Erkenntnissen die derzeitige Wissensbasis für die Anlagenentwicklung, Prozessgestaltung sowie -führung in der Ultraschallreinigung bilden.

Test- und Kontrollverfahren

In der Praxis sind der Aluminiumfolientest sowie Reinigungsversuche mit Test- oder Musterteilen als Verfahren zum Untersuchen und Kontrollieren der Ultraschallwirkung etabliert. Ihre wesentlichen Nachteile sind die aufwändige Durchführung und Auswertung, fehlende Möglichkeiten für Echtzeit-Untersuchungen in Anlagen (Inline-Fähigkeit) sowie der Mangel an Normalien und Standards.

Aluminiumfolie: Stand der Technik ist das Kontrollieren der Erosionswirkung des Ultraschalls mittels Aluminiumfolie [4]. Die Aluminiumfolie wird dafür in einen Rahmen gespannt und ins Bad eingebracht. Anhand der Erosionserscheinungen (Dellen und Löcher) wird die

Kavitationswirkung in einer Ebene des Bades dargestellt. Die flächenmittlere Erosionsrate (Materialabtrag pro Zeiteinheit) kann durch Auswiegen der Folie ermittelt werden.

Definiert verschmutzte Testteile: Zum Untersuchen spezieller Fragestellungen, beispielsweise zum Reinigungsverhalten bestimmter Geometrielemente (Sacklochbohrungen etc.), werden entsprechend gefertigte und definiert im Labor verschmutzte Testteile Reinigungsversuchen unterzogen. Anschließend wird die auf den relevanten Oberflächen verbleibende Restverschmutzung gemessen. Hauptvorteil dieses Vorgehens sind die wohldefinierten Ausgangsbedingungen, die eine gezielte Analyse einzelner Einflüsse ermöglichen. Beispielsweise lässt sich sowohl die Dicke der filmischen Verschmutzung als auch deren Zusammensetzung präzise einstellen. Außerdem können Fluoreszenzfarbstoffe (UV-Tracer) zugesetzt werden, die mittels kamerabasierter Messung der Fluoreszenzintensität eine einfache Erfassung und Auswertung der Restschmutzverteilung nach dem Reinigungsversuch ermöglichen [8]–[10].

Nachteil der Untersuchung definierter Testteile ist das teilweise Vernachlässigen realer Fertigungsbedingungen, wie beispielsweise thermischer Einwirkungen bei der spanenden Fertigung, die die Ausbildung und Haftung filmischer Verschmutzungen beeinflussen können und die aufwendigen Versuche insgesamt.

Musterteile aus der Fertigung: Eine zweite Vorgehensweise bei Reinigungsversuchen ist die Verwendung von Musterteilen aus der Fertigung. Hierbei gehen alle Einwirkungen der realen Fertigungsprozesse vollständig in den Versuch ein. Zum Quantifizieren der Reinigungswirkung muss die auf der Teileoberfläche befindliche filmische Verschmutzung im Vorfeld gemessen werden. Da die Art und Zusammensetzung der Verschmutzung durch den Fertigungsprozess vorgegeben ist (oftmals kein Zusatz von UV-Tracern möglich), müssen hinreichend sensitive Messverfahren eingesetzt werden. Kamerabasierte Systeme erfüllen diese Anforderungen meist nicht, so dass aufwändigere Verfahren, wie beispielsweise die laserinduzierte Fluoreszenzmessung (LIF) einzusetzen sind.

Sonstige Test- und Kontrollverfahren: Es existiert eine Vielzahl weiterer Testverfahren, wie beispielsweise Iod- und Fricke-Dosimetrie, Sonolumineszenz in Luminol, Polymerdegradation etc. Die meisten hiervon haben neben den Defiziten der vorgenannten Verfahren den zusätzlichen Nachteil, dass sie unterschiedliche chemische oder physikalische Sekundärwirkungen des Ultraschalls erfassen, deren Bezug zur Reinigungswirkung vielfach nicht genau bekannt ist. Derartige Verfahren sind oft nur geeignet, um qualitativ schnell Abweichungen eines bereits qualifizierten Prozesses von seinem Soll-Wert zu entdecken.

Messverfahren zum Überwachen der Ultraschallwirkungskette

Infolge des unzureichenden Wissensstandes zu den Abhängigkeiten entlang der

Ultraschallwirkungskette besteht der Wunsch, die qualitätsbestimmenden Ultraschallmessgrößen für die Regelung der Reinigungsprozesse sowie die Anlagenauslegung direkt zu messen. Hierzu existieren verschiedene Verfahren, von denen einige in kommerziell verfügbaren Geräten technisch umgesetzt wurden. Für die akustischen Messgrößen gibt es außerdem Primär- und Substitutions-Kalibrierverfahren, die prinzipiell eine Vergleichbarkeit verschiedener Messsysteme und das Definieren von Standards ermöglichen.

Bei der Anwendung im Ultraschallbad ist zu berücksichtigen, dass eine Rückwirkung ins Ultraschallbad eingebrachter Objekte auf das Schallfeld erfolgen kann. Zudem ist es erforderlich, dass die Sensoren an der gleichen Stelle messen bzw. durch das Aufspannen von dreidimensionalen Feldern über Regression die Werte an den gleichen Stellen berechnet werden können.

Impedanz der Schwinger: Das Messen der komplexen Strom-Spannungs-Verläufe an den Ultraschallschwingern ermöglicht (unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades) die Berechnung der insgesamt ins Bad abgegebenen Ultraschallleistung. Ferner lassen sich durch den Abgleich mit Sollwerten für bestimmte Prozesszustände (Temperatur, Medienzusammensetzung etc.) Änderungen der Betriebsparameter, beispielsweise infolge von Alterungserscheinungen, erkennen.

Schalldruckpegel: Durch die Schwinger wird ein Schallfeld ins Ultraschallbad induziert. Die dafür charakteristischen Parameter (Fundamentale, Harmonische) können mit einem Hydrophon gemessen werden. Hydrophone werden nach zwei physikalischen Prinzipien unterschieden. Zum einem wird der piezoelektrische Effekt genutzt, bei dem der mechanische Wechseldruck des Schallfeldes in eine äquivalente elektrische Wechselspannung umgewandelt wird. Zum Einsatz kommen häufig kompakte Nadelhydrophone mit einem Messkopfdurchmesser von einigen Millimetern [7], [11]. Membranhydrophone bestehen aus einer in einen Rahmen eingespannten piezoelektrischen Membran. Diese Bauform verursacht weniger Randbeugungseffekte, ist allerdings mechanisch deutlich empfindlicher und wird daher seltener eingesetzt. Eine weitere Möglichkeit ist die Anwendung faseroptischer Hydrophone, bei denen sich der Brechungsindex einer Faser mit dem Druck verändert. Der Vorteil dieser Sensoren liegt in ihrer geringen Größe. Wegen der materialbedingten Standfestigkeit von wenigen Tagen ist ihr Einsatz jedoch auf spezielle Anwendungen beschränkt.

Kavitationsrauschzahl: Beim Einsetzen der Kavitation verursachen Instabilitäten großer Blasen kurz vor ihrem Kollaps eine Erhöhung der ersten Subharmonischen. Dieses Phänomen lässt sich als Indikator für die Kavitationsschwelle (Schalldruckpegel, bei dem der Dampfdruck lokal unterschritten wird und Kavitation einsetzt) auswerten, ermöglicht jedoch keine Schlussfolgerungen zur Kavitationsintensität [4].

Oberhalb der Kavitationsschwelle erzeugen die kollabierenden Blasen ein hochfrequentes Rauschen (Kavitationsrauschen), dessen Pegel von der Kavitationsstärke (Anzahl der Blasen pro Zeit) abhängt. Diese akustischen Merkmale lassen sich mit konstruktiv auf die relevanten Frequenzbereiche ausgelegten Hydrophonen messen und mit den Gleichungen in die Kavitationsrauschzahl als Kenngröße umrechnen.

Erosionsrate: Die (materialspezifische) Erosionsrate beschreibt die rein mechanische Ultraschallwirkung (exklusive der bei der Reinigung wirksamen Prozesschemie und Prozesstemperatur), die als die abgetragene Schichtdicke eines bestimmten Materials pro Zeiteinheit definiert ist. Hierzu gibt es etablierte Testverfahren, wie beispielsweise den Aluminiumfolientest (siehe oben). Zur Echtzeit-Messung der Erosionsrate in Ultraschallreinigungsanlagen entwickelte die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) einen Forschungsdemonstrator für das in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellte Sensorprinzip der beschichteten Quarzkristallmikrowaage (QCM) [12]. Es basiert auf einem piezoelektrischen Schwingquarz mit einer einseitig aufgetragenen partikelgefüllten Lackschicht, die als Massebeladung wirkt. Durch die Erosionswirkung der Kavitation werden die Partikel aus der Lackschicht ausgetragen, sodass ihre Masse sinkt und die Resonanzfrequenz des Schwingungssystems aus Quarzscheibe und Lackschicht ansteigt. Die sehr geringe Menge freigesetzter Partikel mit kleinem Durchmesser ($\varnothing < 2 \mu\text{m}$) stellt für die meisten Prozesse keine qualitätsrelevante Kontamination dar. Mit Ausnahme vereinzelter extremer Anforderungen an Ultra-Feinstreinigungsprozesse enthalten Sauberkeitsspezifikationen in der Praxis für derart kleine Partikel keine Grenzwerte.

Da zum Messen der Erosionswirkung notwendigerweise Erosion stattfinden muss, wird das messgrößenempfindliche Element im Einsatz verbraucht und muss ausgetauscht werden, wenn alle Partikel ausgetragen sind. Signifikanter Forschungsbedarf besteht bezüglich einer praxistauglichen konstruktiven und reproduzierbaren verfahrenstechnischen Lösung für den Austausch und die wirtschaftliche Neubeschichtung der Sensorelemente.

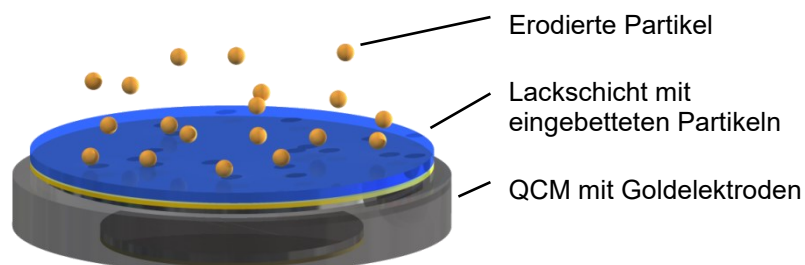


Abbildung 2: Schematische Darstellung der beschichteten QCM

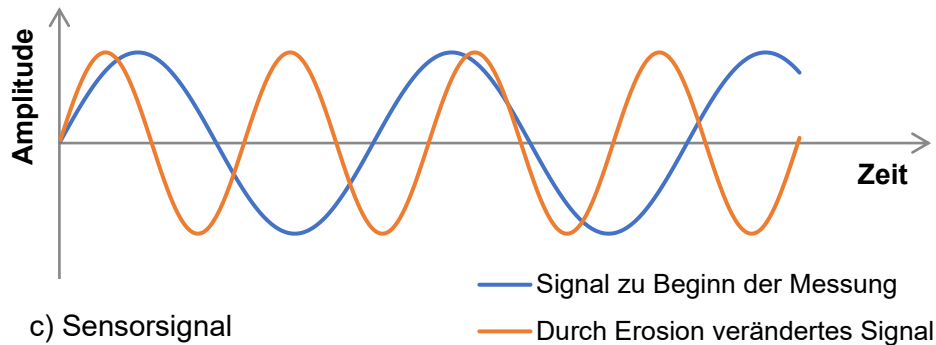


Abbildung 3: Sensorprinzip der beschichteten Quarzkristallmikrowaage (QCM)

Intelligente Messdatenverarbeitung

Der Stand der Forschung ermöglicht keine vollständige theoretische Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge entlang der Ultraschallwirkungskette hinsichtlich der Reinigungswirkung. Dieses Defizit soll im Forschungsprojekt durch die intelligente Kombination statistischer Verfahren mit einer bestehenden Wissensbasis zur Ultraschallreinigung, ergänzt durch maschinelle Lernverfahren, kompensiert werden.

Statistische Methoden: Die statistische Auswertung der mehrdimensionalen Daten des Multisensor-Systems ermöglicht das Erkennen von Wirkzusammenhängen im Prozess und das Identifizieren maßgeblicher Einflussparameter sowie Stellgrößen für die Prozessführung. In Forschungsarbeiten zur Ultraschallreinigung wurden hierzu beispielsweise die Methoden der Hauptkomponenten- und Clusteranalyse erfolgreich eingesetzt. Hierzu wurden in den letzten Jahren leistungsfähige maschinelle Verfahren entwickelt, die fortgeschrittene statistische Analysen einem breiten Anwenderkreis zugänglich machen [13] und teils als quelloffene Frameworks verfügbar sind (z. B. Modular toolkit for Data Processing MDP).

Künstliche neuronale Netze (KNN): KNN bilden die wichtigste Gruppe maschineller Lernverfahren. Ihr wesentlicher Vorteil ist die Fähigkeit, Daten ohne explizites Vorwissen zu klassifizieren. Hierzu ist im Vorfeld eine Lern- beziehungsweise Trainingsphase (beispielsweise überwachtes oder bestärkendes Lernen) des KNN notwendig, die zudem meist eine Ergebnissrückkopplung erfordert. Für den Anwendungskontext eines Multisensor-Systems bedeutet dies, dass das KNN mit den Ergebnissen aus der Ultraschallwirkungskette als Eingangsdaten und beispielsweise künstlich herbeigeführten Prozessstörungen (z. B. hoher Gasgehalt) oder den Sauberkeitsdaten gereinigter Teile als Rückkopplung trainiert wird. Anschließend können die erlernten Muster der Multisensordaten für eine Bewertung des Prozesszustandes genutzt und dadurch beispielsweise Störungen rechtzeitig als solche klassifiziert werden. Dies ermöglicht den Einsatz zur Überwachung, Qualitätssicherung und gegebenenfalls Regelung bereits eingefahrener Prozesse [14], [15]. Als Ausgangspunkt angepasster Lösungen sind quelloffene Frameworks, wie OpenNN oder Theano, verfügbar.

2.3 Arbeitshypothese

Die Grundhypothese (AH) des Vorhabens lautet:

Das vollständige Überwachen der Ultraschallwirkungskette in Reinigungsanlagen durch ein intelligentes Multisensor-System ermöglicht ein neues Niveau der Prozessdatenerfassung für:

- effizientere Methoden zur Entwicklung, Auslegung und Optimierung von Ultraschallreinigungsanlagen,
- effizientere Methoden für das Einfahren, den Transfer oder das Anpassen (beispielsweise an neue Teile oder Verschmutzungsarten) von Ultraschallreinigungsprozessen,
- die Integration der Ultraschallreinigung in die wissensbasiert und adaptiv gesteuerten Prozessketten der Industrie 4.0.

3 Forschungsziel

Das Hauptziel (HZ) des Projekts bestand darin, unter Nutzung des Standes der Technik zu Sensoren und Datenverarbeitungslösungen einen Forschungsdemonstrator eines Multisensor-Systems mit intelligenter Messdatenverarbeitung zum Überwachen der Ultraschallwirkungskette zu entwickeln und seine Eignung für den Anlageneinsatz exemplarisch zu eruieren. Hieraus resultierten folgende Unterzielsetzungen (UZ):

UZ 1 Entwicklung und Anlagenintegration des Multisensor-Systems unter metrologischen Aspekten

- Erarbeiten von Prinziplösungen zum Vermeiden oder Korrigieren der Rückwirkungen und Abstandseinflüsse eines Multisensor-Systems für das Erfassen der Ultraschallmessgrößen (beispielsweise Gesamtintegration in einen rotierenden Sensorkopf, automatisches sequentielles Einbringen geometrisch gleicher Einzelsensoren, modellgestützte Berichtigung im Rahmen der Messwertverarbeitung etc.)
- Analyse des Standes der Messtechnik unter dem Aspekt der Integrierbarkeit in die Prinziplösungen → Auswahl geeigneter Sensoren für die einzelnen Messgrößen
- konstruktive und technologische Anpassung der Laborlösung des Erosionssensors sowie, falls nötig, weiterer Sensoren zur Integration in das Multisensor-System
- Konstruktion, Fertigung und Integration des Multisensor-Systems in die bei FE 1 und FE 2 vorhandenen Ultraschallreinigungsanlagen

UZ 2 Entwicklung einer Systemlösung zur intelligenten Verarbeitung von Multisensor-Daten

- Auswahl und Analyse von Datenverarbeitungsmethoden und -algorithmen
- Integration der bestehenden Wissensbasis zur applikationsspezifischen Nutzung für die Messdatenverarbeitung

UZ 3 Exemplarische Eignungsanalysen im Anlageneinsatz

- Analyse des Zusammenhangs zwischen den mit statistischen Methoden sowie KNN verarbeiteten Multisensordaten und Ergebnissen der etablierten Testverfahren (Aluminiumfolie sowie Reinigung von Test- und Musterteilen)

Zusammenfassend war das Projektziel die Erforschung der Realisierbarkeit (AP 1 bis AP 4) und des potenziellen Anwendungsnutzens (AP 5) eines Multisensor-Systems mit intelligenter Messdatenverarbeitung zum Überwachen der Ultraschallwirkungskette in der industriellen Teilereinigung. Innovationsschwerpunkte waren die Systemintegration der Multisensorik und die intelligente Messdatenverarbeitung (AP 2, AP 3 und AP 4.2) sowie die exemplarische Eignungsanalyse im Anlageneinsatz (AP 5).

4 Ergebnisse der Forschungseinrichtungen

4.1 Vorbemerkungen

Die Covid 19 Pandemie ist erstmals im Frühjahr 2020 in Deutschland aufgetreten und hat zu weitreichenden Einschränkungen im beruflichen Alltag geführt. Der Lockdown und die folgenden Maßnahmen zur Vermeidung der Ausbreitung führte an den Forschungseinrichtungen zum teilweisen Stillstand aller Technikumstätigkeiten im Projekt. Hilfwissenschaftler, welche vordergründig für Versuche eingesetzt werden, war es zeitweise untersagt, dass Gebäude zu betreten. Einschränkungen bei der Personenanzahl in den Technika begrenzten zusätzlich für das wissenschaftliche Personal die Möglichkeit, weitreichende Versuche durchzuführen. Aus dem durch die jeweiligen Institutsleitungen verordneten HomeOffice heraus sind solche Arbeiten nicht möglich gewesen, weshalb deutliche Verzögerungen im Projektfortschritt auftraten, die auch nicht vollständig durch die Projektverlängerung abgefangen werden konnten. Zudem kam es besonders zu Beginn der Pandemie zu Schwierigkeiten beim Arbeiten von zu Hause, da die IT-Infrastruktur nicht auf die umfassende und plötzliche Veränderung der Arbeitswelt ausgelegt war. Lizenzprobleme bei der Software und Zugriffsprobleme auf Daten waren die Folge. Zusätzlich gab es große Schwierigkeiten bei den Geschäftspartnern, was deutlich verlängerte Lieferzeiten bei Versuchsstandkomponenten und –material sowie Ersatzteilen zur Folge hatte, genauso wie große Wartezeiten beim Einsatz von Service-Personal zur Reparatur von Anlagen. Arbeitstreffen vor Ort mit Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses waren ebenso nicht möglich.

Des Weiteren verhinderten technische Probleme bei den Industriereinigungsanlagen eine umfassende Erprobung der Multisensordlösung bei den Forschungseinrichtungen:

FE 1 (IVV):

- defekte Umwälzpumpe erforderte eine komplette Neubeschaffung und Integration, Anpassungen erforderlich, da identischer Modelltyp nicht für die weitere Verwendung in Reinigungsanlagen geeignet ist
- teilweise und sporadisch nicht vollfunktionsfähige Ultraschallschwinger, führten zu Fehlversuchen mit stark schwankenden Ergebnissen

FE 2 (IGCV):

- drei Ausfälle von Sensoren für die Positionierung des Reinigungskorbes an verschiedenen Stationen, ohne dessen Signal die Anlage die Reinigung nicht durchführt
- Ausfall mehrerer Gruppen von Piezo-Schwingerelementen
- drei Ausfälle aller 6 Ultraschallsignalgeneratoren wegen eines elektrischen Schadens an der Steuerplatine, vermutlich in Zusammenhang mit Schäden / Verschleiß der Schwingerelemente
- Abriss eines Motorsteuernkabels an der Reinigungskorbrotationseinheit
- Ausfall der Grundstellungssteuerung von 2 Bädern, ohne die die Reinigungskörbe nicht mehr aus der Anlage gehoben werden können
- zweifache Leckage einer Pumpe in der VE-Wasser-Versorgung
- Schaden mit Ausfall der Führungskassette des automatischen Transportsystems zur Versetzung der Reinigungskörbe
- verschleißbedingter Bruch einiger Führungen der Korbverriegelung in mehreren Stationen
- Ausfall der pH-Wert-Sonden

4.2 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

AP 1: Auswahl und Anpassung geeigneter Sensorelemente

Im ersten Arbeitspaket sollen zunächst marktverfügbare Messtechniklösungen und Verfahren ermittelt und auf Ihre grundsätzliche Eignung für den Einsatz im Projekt untersucht werden. Für die Auswahl der im Projekt eingesetzten Verfahren ist wesentlich die Erfahrung des PbA und der beiden FE ausschlaggebend. Anschließend sollen die Sensoren, falls erforderlich, technologisch und konstruktiv an die Messumgebung angepasst werden.

AP 1.1: Analyse/Auswahl kommerzieller Sensoren/ Messtechniklösungen

Marktüberblick über verfügbare und in Entwicklung befindliche Messverfahren

Durchgeführte Arbeiten:

Auf Basis der Befragung der Projektteilnehmer und Analyse vorhandener Reinigungsanlagen wurden relevante Parameterbereiche recherchiert und Anforderungen an das Multisensorsystem abgeleitet. Darauf basierend wurden Sensorsysteme unterschiedlichster Art recherchiert, die bei Ultraschallanwendungen zum Einsatz kommen können. Die Sensorsysteme wurden auf den potenziellen Einsatz in einem Multisensorsystem hin untersucht. Es konnte eine Vielzahl an Systemen ausgeschlossen werden, die für den Einsatz im Projekt ungeeignet sind. Zusätzlich wurden Messmethoden und dazugehörige Sensorsysteme zur umfassenden Überwachung des Badzustandes recherchiert und analysiert, die ggf. parallel zur Überwachung der Ultraschallfelder notwendig sind.

Erreichte Ergebnisse:

Die Anforderungen an die Multisensorentwicklung wurden in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss festgelegt. Hierdurch haben sich als potenziell nutzbar zum Einsatz in einem Multisensorsystem folgende Systeme gezeigt:

- Quarzkristallmikrowaage (Erosion)
- KaviMeter (Schalldruckpegel und Kavitationsrauschen) mittels Keramikhydrophon
- Temperatursensor (Flüssigkeitstemperatur)
- Oxymeter (Sauerstoffgehalt)
- Leitwertsensor (Flüssigkeitsleitwert)
- pH-Wert-Sensor (Flüssigkeits-pH-Wert)
- Ultraschalleistung mittels Impedanzmessung (Impedanz)

Als prinzipiell oder eher ungeeignet für die Anwendung zeigten sich:

- Trübungssensor (Schmutz- und/oder Reinigergehalt)
- Nadel- und Faserhydrophone
- Thermistorsonden
- Interferometrie
- Laservibrometrie
- Sonolumineszenz
- Kavitationsindikator chemisch
- Sarvazyn-Methode

Als bedingt geeignet infolge Offline-Messung bzw. langwierigen Tests gelten:

- Aluminiumfolientest
- Testverschmutzung

Vorversuche zu Überwachung des Ultraschallfeldes mittels Hydrophon

Durchgeführte Arbeiten:

Für die endgültige Auswahl einzelner Komponenten wurden Vorversuche zur Überwachung des Badzustandes mittels einem Hydrophon (KaviMeter) durchgeführt und ausgewertet.

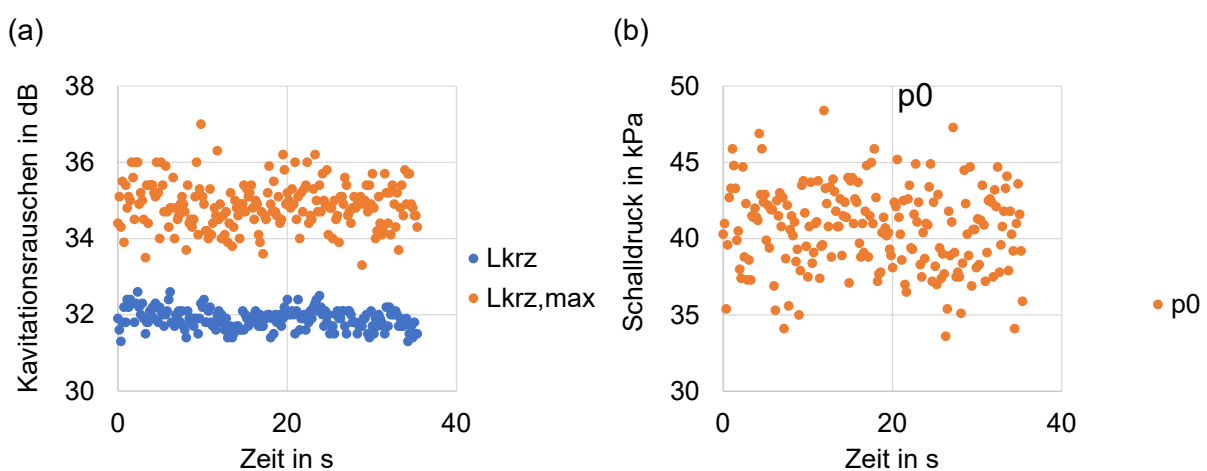


Abbildung 4: (a) Kavitationsrauschzahl, maximale Kavitationsrauschzahl und (b) Schalldruck

Erreichte Ergebnisse:

Bei den Testmessungen mit dem Hydrophon zeigte sich, dass die Kavitationsrauschzahl Lkrz (Abbildung 4 a) sehr konstant über die Zeit ist. Hingegen schwankt das maximale Kavitationsrauschen (L_{max}) und der Schalldruck der Fundamentalfrequenz (p_0 , Abbildung 4 b) im gleichen Zeitintervall stärker über die Zeit. Nach einer entsprechenden Mittelung der Messwerte lieferte das System valide Ergebnisse.

AP 1.2: Auswahl und Anpassung geeigneter Sensorelemente

Basierend auf der Marktanalyse wurden geeignete Sensoren ausgewählt. Anschließend erfolgten – sofern erforderlich – Anpassungen der Sensoren bzw. Neuentwicklungen, welche im Folgenden jeweils aufgeschlüsselt nach Sensortyp und Entwicklungsschritt beschrieben sind.

Übersicht der ausgewählten Sensorik

Durchgeführte Arbeiten:

Auf Basis eines Variantenvergleiches und einer gewichteten Punktebewertung, wie sie im konstruktiven Entwicklungsprozess angewandt wird, wurden die Vorzugsvarianten für die Einflussgrößen einer Ultraschallwirkungskette festgelegt.

Erzielte Ergebnisse:

Entsprechend der Vorauswahl an geeigneter Sensorik wurden folgende Systeme ausgewählt und – falls erforderlich bzw. möglich – beschafft:

- Quarzkristallmikrowaage: Eigenentwicklung
- Hydrophone: KaviMeter mittels Keramikhydrophon, Fa. Elma Schmidbauer GmbH
- Temperatursensor: Greisinger GMH 5630, Fa. GHM Messtechnik GmbH
- Oxyrometer: Greisinger GMH 5630, Fa. GHM Messtechnik GmbH
- Leitwertsensor: Jumo 2027/10/30/000, Fa. Jumo GmbH & Co. KG (manuelle Eingabe)
- pH-Wert-Sensor: SG2 51302520, Fa. GHM Messtechnik Mettler Toledo GmbH (manuelle Eingabe)
- Impedanz: Eigenentwicklung
- Badverschmutzung: LiquidSens inkl. Controller, Fa. Endress+Hauser Flow Deutschland AG (SensAction)

Impedanzmessung der Ultraschallschwinger

Durchgeführte Arbeiten:

Für die Inline-Überwachung der Impedanz konnte kein fertiges System recherchiert werden, weshalb abweichend zum Projektantrag zusätzlich eine Eigenentwicklung erforderlich wurde. Hierfür wurden Messschaltungen entwickelt, miteinander verglichen und für die Vorzugsvariante der Schaltplan abgeleitet (vgl. Abbildung 5).

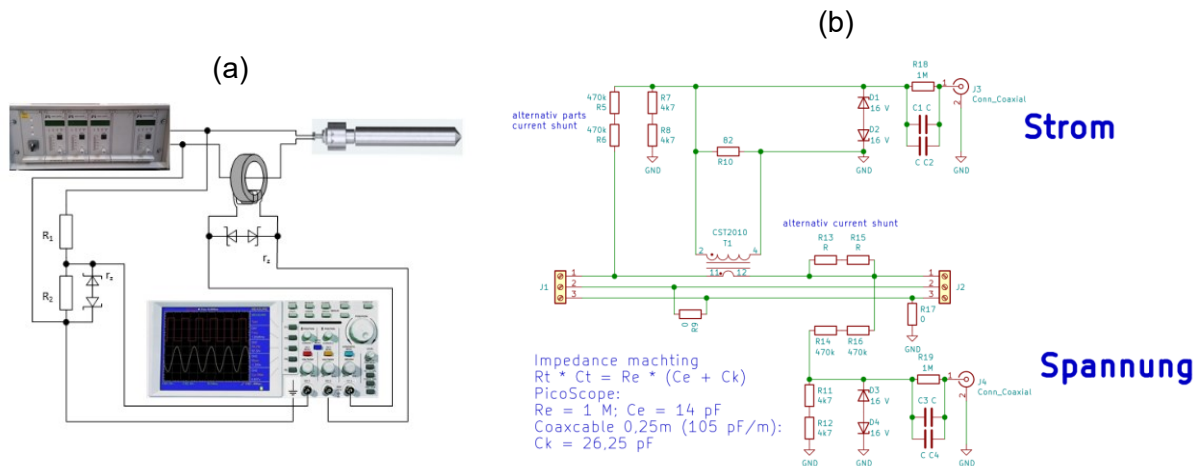


Abbildung 5: Messschaltungen für die Impedanz, (a) Anbindung an Oszilloskop, (b) Schaltplan

Erreichte Ergebnisse:

Innerhalb des Projektes wurde ein neues Messsystem für die automatische Erfassung der Impedanz eines Schwingers entwickelt, aufgebaut und erprobt. Die Auswertung erfolgt mit einem Python-basierten Algorithmus, deren Ergebnis im Anschluss mit Hilfe eines Datenerfassungssystems gespeichert werden kann.

Erosionssensor

Schritt 1: Entwicklung der Beschichtungsformel und des Auftragsverfahrens

Durchgeführte Arbeiten:

Für die Messung der Erosion wurde sich für die Anwendung des Messsystems auf Basis des Dickenschwingers, welcher nach dem Prinzip einer Mikroquarwaage arbeitet, entschieden. Eine Grundvoraussetzung ist eine hohe Reproduzierbarkeit der Beschichtung der Quarze, da diese sich bei der Anwendung verbrauchen und somit regelmäßig getauscht werden müssen. Die Veröffentlichung der PTB beinhaltet eine Rezeptur [16], deren Komponenten heutzutage jedoch nicht mehr beschaffbar sind. Zudem ist das genaue Vorgehen bei der Beschichtung nicht eindeutig beschrieben, weshalb gegenüber dem ursprünglichen Projektantrag zusätzlich die Entwicklung einer alternativen Rezeptur und der

dazugehörigen Herstellungs- und Beschichtungsmethoden erforderlich wurde.

Hierfür wurden im ersten Schritt Stoffe für eine reproduzierbare Verschmutzung zur Erosionsmessung recherchiert und in unterschiedlichen Zusammensetzungen erprobt. Als Trägermaterial waren dies:

- Nagellack
 - Catrice Cosmetics Power Gel 2 in 1 – Base & Top Coat
 - Essence shine last & go! – gel nail polish
- Klebstoffe
 - UHU Alleskleber
 - Pattex Kraftkleber Transparent
- Farblack
 - Remmers Langzeit Lasur UV
 - Alpina Weißlack für Heizkörper

Für die Auswahl der geeigneten Partikel, welche durch die Ultraschallwirkung entfernt werden sollen, wurden folgende erprobt:

- Kremer 59920 – Hohlglaskügelchen Scotchlite S22
- Kremer 59910 – Hohlglaskügelchen Scotchlite K
- StoreLite HS BL FFS-3 TS
- Honeywell Lumilux Green
- Micromod sicastar 43-00-103
- Micromod sicastar-redF 40-00-103

Zusätzlich wurden unterschiedliche Verfahren zur Herstellung reproduzierbarer Verschmutzungen mit flüchtigen Stoffen recherchiert und erprobt. Hierzu zählen Aufsprühen, DipCoating mit Hilfe eines Linearmotors und SpinCoating.

Anschließend wurde die Reproduzierbarkeit der Beschichtung inkl. Beschichtungsmethode und der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf das Messsignal erprobt.

Erreichte Ergebnisse:

Basierend auf der Erprobung wurde jeweils eine Kombination aus Trägerstoff und Partikel ausgewählt. Zur Mischung und zum Lagern wurden Vials mit durchstechbaren Kappen als geeignete Variante gewählt, weil anderenfalls das Lösungsmittel schnell verdampfen könnte. Als Lösungsmittel wurde 85 % Butyl Acetate mit dem Trägerstoff 15 % Nagellack (Essence

shine last & go! – gel nail polish) gemischt. Hiervon werden 10 Teile mit einem Teil Partikel (Micromod sicastar 43-00-103; \varnothing 1 μm) vermischt, wofür in beiden Fällen ein Vortexmischer genutzt wurde.

Für die Beschichtung wurde ein konventioneller SpinCoater eingesetzt, wofür je Probe 200 μl aus dem Vial mittels Spritze entnommen und in der Mitte des Quarzes appliziert wurde. Die Stufen für die Beschichtung mittels SpinCoater umfassten unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeiten bei der Verteilung:

- Step 1: 5 s – 1500 U/min
- Step 2: 30 s – 2500 U/min
- Step 3: 300 s – 3500 U/min

Als Quarze wurden in Rücksprache mit dem Hersteller Axtal der Typ AXQCM10-07-TiAu (10 MHz) ausgewählt. Das gesamte Verfahren zum Beschichten der Quarzoberflächen ist in Abbildung 6 zusammengefasst.

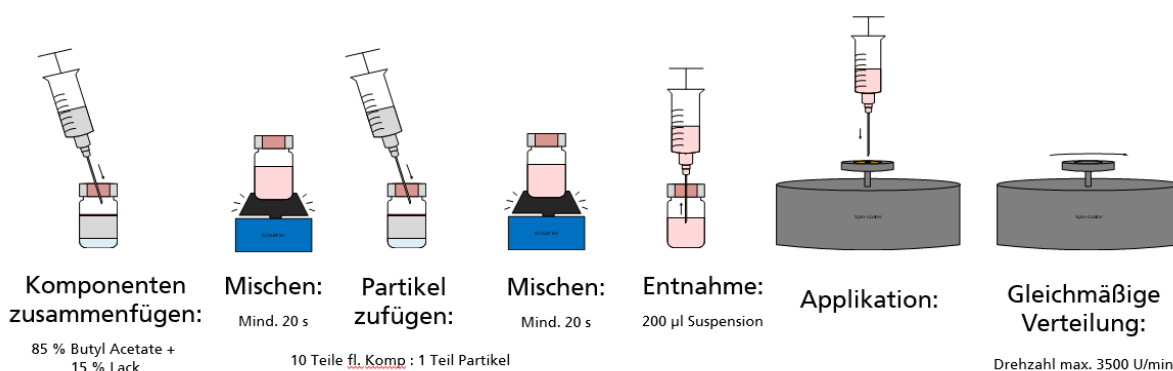


Abbildung 6: Verfahren zum reproduzierbaren Verschmutzungsauftrag

Die Überprüfung der Qualität der Beschichtung erfolgte mit Hilfe eines Mikroskops. Es zeigte sich, dass die Fliehkraftwirkung sichtbar ist. Ebenso trat teilweise eine Klumpenbildung auf, obwohl die Partikel ebenfalls in einem Lösemittel gelöst waren. Insgesamt konnte dennoch eine gute Gesamtverteilung und durch Überprüfung mehrere Proben auch eine gute Reproduzierbarkeit erreicht werden (vgl. Abbildung 7).

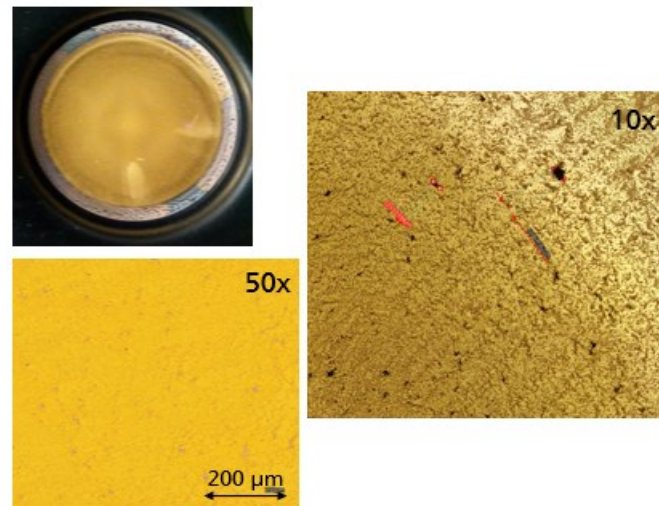


Abbildung 7: Mikroskopaufnahmen – Lack + Ethanol + weiße Partikel

Schritt 2: Anpassung der Sensorgeometrie

Durchgeführte Arbeiten:

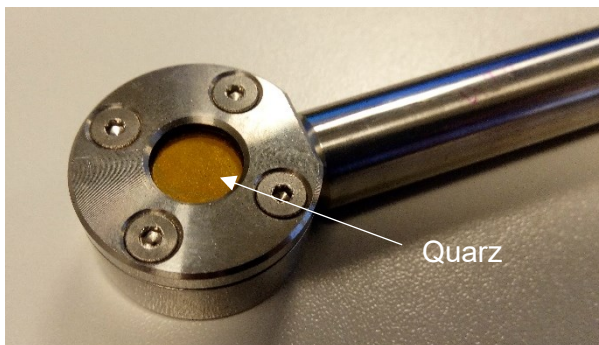
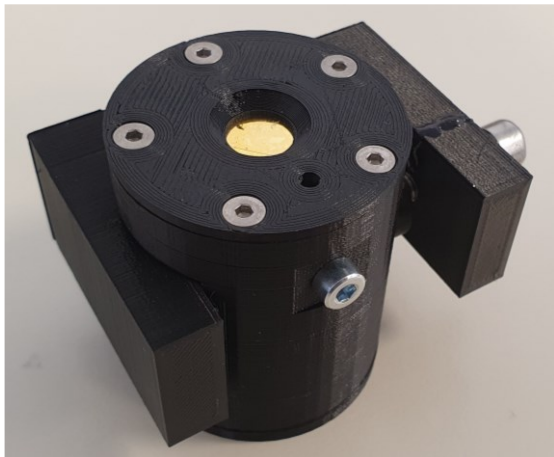


Abbildung 8: Erosionssensor-Prototyp 1

Auf Basis der durch das PTB veröffentlichten Beschreibungen[16] wurde ein erster Prototyp des Erosionssensors erprobt (Abbildung 8). Dadurch konnten mehrere Nachteile ermittelt werden, die im Rahmen einer umfassenden Überarbeitung beseitigt wurden. Die überarbeitete Version besitzt mehrere Weiterentwicklungen:

- Berücksichtigung einer Zentrierung für die Quarze beim Einlegen
- Eignung für hohen Druck durch beidseitige Druckbeaufschlagung des Quarzes
- Kurzschlussfreiheit
- einfacher Ausbau des Sensors durch wasserdichten Steckeranschluss
- einfacher Ausbau des Sensors durch Schnellklemmung



Dieser Prototyp wurde vor seiner Fertigung gedruckt (Abbildung 9) und bzgl. grundsätzlicher Eignung erprobt, so dass sich weitere Neuentwicklungen ergaben:

- Neuentwicklung Durchkontaktierung für einfachen Austausch der Quarze
- Neue Dichtungsgeometrie

Abbildung 9: Erosionssensor-Prototyp 2, 3D-Druck

Erzieltes Ergebnis:

Es konnte im Rahmen des Projektes ein neuer Prototyp des Erosionssensors entwickelt werden, der eine einfache Entnahme des Sensors aus dem Waschbad zum Wechsel des Quarzes ermöglicht (vgl.

Abbildung 10).

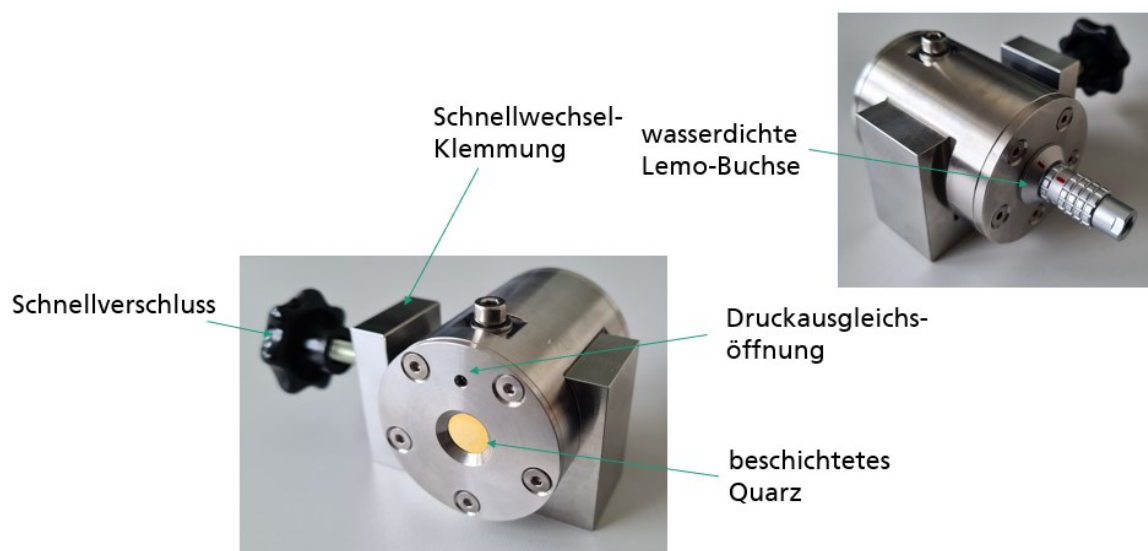


Abbildung 10: überarbeiteter Prototyp

Schritt 3: Ermittlung der Messeinflüsse

Durchgeführte Arbeiten:

Zusätzlich zur Entwicklung der Beschichtung inkl. Beschichtungsmethode und dem verbesserten Erosionssensor wurde der Einfluss der Quarze in Kombination mit dem Sensor in unterschiedlichen Konfigurationen ohne Beschichtung erprobt:

- Montage/ Demontage durch unterschiedliche Bediener
- Einfluss unterschiedlicher Quarze
- Temperatureinfluss

Erzielte Ergebnisse:

Einfluss unterschiedlicher Quarze, ohne Beschichtung, Montage/Demontage durch gleiche Person nach festgelegtem Muster

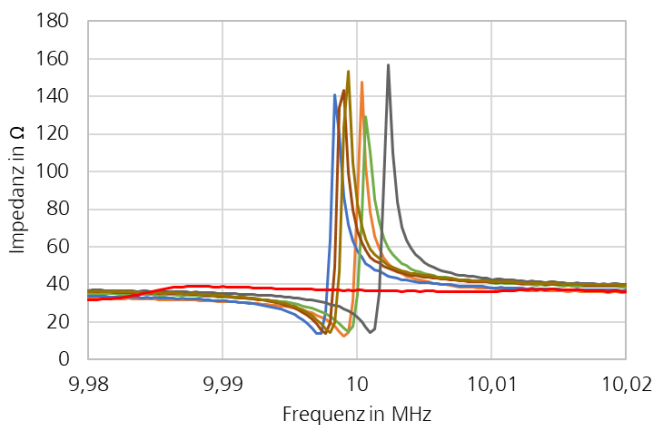


Abbildung 11: Einfluss unterschiedlicher Quarze auf die Impedanz, ohne Beschichtung

Die Quarze zeigen ein signifikant unterschiedliches Verhalten (Verschiebung der Eigenfrequenz, Abbildung 11) und eine Auswertung der maximalen Frequenz erscheint nicht zielführend. Unklar ist auf Basis dieses Tests, ob der Einfluss auf Grund der Quarze oder der Demontage/Montage auftritt.

Einfluss der Montage und Demontage des gleichen Quarzes durch die gleiche Person, nach festgelegtem Muster, ohne Beschichtung

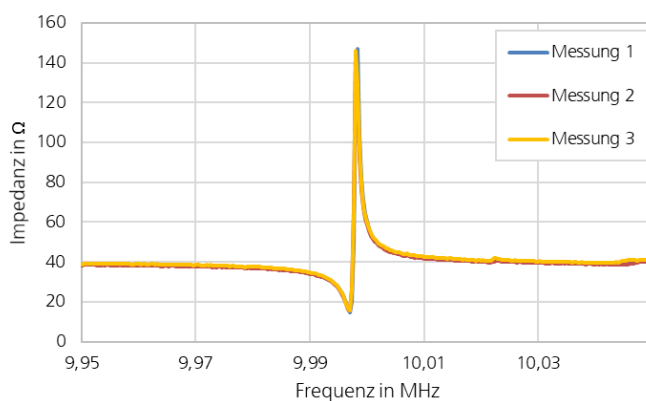


Abbildung 12: Einfluss Montage und Demontage durch gleiche Person, gleicher Quarz, ohne Beschichtung

Der Einfluss der Montage und Demontage auf das Messsignal ist bei exakt gleicher Anwendung vernachlässigbar gering (Abbildung 12). Umgekehrt konnte somit ermittelt werden, dass die Quarze für sich eine abweichende Kennlinie haben (Abbildung 11), weshalb die Auswertung von Absolutwerten nicht möglich ist.

Einfluss der Montage und Demontage des gleichen Quarzes durch unterschiedliche Personen, nach festgelegtem Muster, ohne Beschichtung

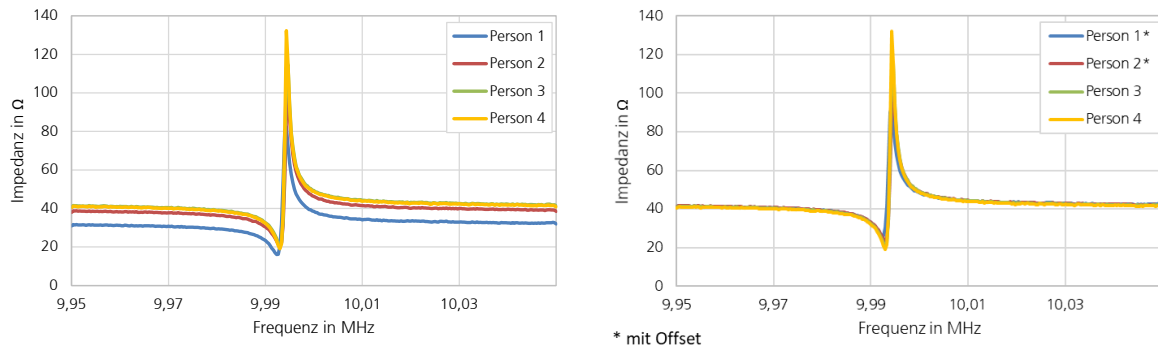
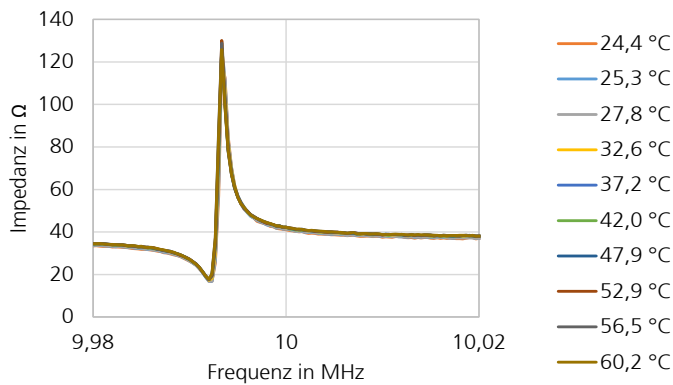


Abbildung 13: Einfluss Montage und Demontage durch unterschiedliche Personen, gleicher Quarz, ohne Beschichtung; links: Originalwerte; rechts: unter Berücksichtigung eines Offsets

Die Montage und Demontage des gleichen Quarzes durch unterschiedliche Personen führten auch bei gleicher Anleitung zu einer Abweichung, wobei insbesondere ein Offset der Impedanz zwischen den einzelnen Messungen auftritt. Das führt zu dem Schluss, dass die Absolutwerte für die Auswertung und Ableitung der Erosionsrate nicht angewandt werden sollten, sondern relative Werte zu berücksichtigen sind.

Temperatureinfluss



Der Einfluss der Fluid- und Quarztemperatur wurde für einzelne Quarze überprüft, die in einem sich erwärmenden Tauchbad mit Wasser eingetaucht waren. Die Temperatur und die Impedanz wurden zyklisch dokumentiert. Es zeigt sich, dass der Einfluss der Temperatur mit einer maximalen Abweichung der Impedanz in Höhe von 3,9...4,6 % gering ist (Abbildung 14). Dennoch

Abbildung 14: Abhängigkeit der Impedanz von der Fluid- und Quarztemperatur; gleiche Quarz, ohne Beschichtung

ist eine Berücksichtigung in Form von Korrekturen empfehlenswert.

AP 2: Erarbeiten einer konstruktiven Lösung zur Anlagenintegration

Innerhalb des AP 2 wurden die in AP 1 ausgewählten und angepassten Sensorelemente zur Erfassung der Ultraschall-Messgrößen Impedanz der Ultraschallschwinger, Fundamentale und Harmonische, Kavitationsrauschen sowie Erosionsrate in Form eines Multisensor-Systems zusammengeführt und hierfür eine Lösung für die Anlagenintegration entwickelt.

AP 2.1 Aufbereiten des Lösungsfeldes zur Integration des Multisensor-Systems

Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse:

Entsprechend des Münchner Vorgehensmodells wurden folgende Teilschritte zur Zielerreichung durchgeführt:

Ziel planen:

Wirkortnahe Messung aller relevanten Ultraschallgrößen, wobei die Größen an allen Orten im Ultraschallbad mess- oder berechenbar sind

Ziel strukturieren:

Gesamtsystem in handhabbare Teilsysteme untergliedern und alle Anforderung bzw. Randbedingungen ermitteln, wobei hier ein kurzer Auszug zusammengefasst ist. Zum Gesamtsystem Multisensorsystem gehören folgende Teilsysteme:

- Positioniersystem
- Multisensorsystem
- Einzelsensoren
- Datenerfassungs- und Datenvorverarbeitungssystem inkl. Speicher
- Datenauswertung unter Anwendung KI-gestützter Methoden
- Visualisierung

Ein Auszug aus den Anforderungen an das Messsystem lautet:

- Handhabung: einfache, schnelle Positionierung; einfacher Wechsel Erosionssensor
- Reproduzierbar: Genauigkeit Positionierung < 5 mm
- Medien: leichte Säuren und Laugen, VE-Wasser, Temperatur bis 60 °C
- Messgeschwindigkeit je Ort: < 1 min
- max. Fehler der einzelnen Messwerte: 5 %

AP 2.2 Variantenbewertung und Realisierung der Vorzugsvariante

Modularer Multisensorkopf

Durchgeführte Arbeiten:

Für die Aufnahme der Sensoren und die Messung im Flüssigkeitsbad wurden unterschiedliche Ansätze recherchiert, konzipiert und basierend auf 3D-gedruckten Teilen erprobt. Für die Vorzugsvariante wurden Zeichnungen erstellt und die Einzelteile gefertigt.

Erzielte Ergebnisse:

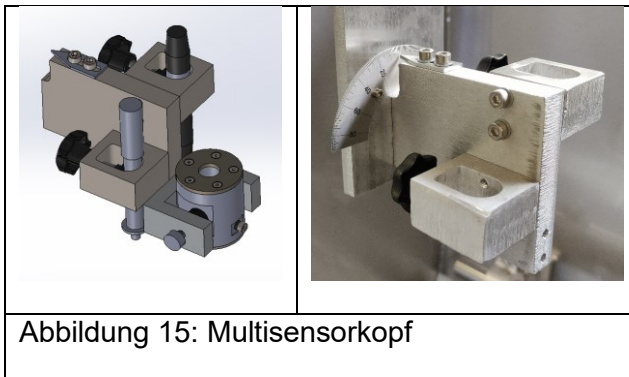


Abbildung 15: Multisensorkopf

Der Multisensorkopf wurde so gestaltet, dass eine einfache Positionierung mit Skala inkl. freier Rotation des Kopfes im Waschbad möglich ist (Abbildung 15). Die Messrichtung und die Messhöhe sind bei den Sensoren identisch. Der baulich bedingte Abstand (x-y-Versatz) wird bei der Auswertung und bei der Erstellung des

Parameterfeldes innerhalb des Flüssigkeitsbeckens berücksichtigt. Zusätzlich können die Sensoren schnell demontiert werden und besitzen Anschläge für eine reproduzierbare Positionierung.

Positioniersystem für Sensorköpfe im Reinigungsbad

Schritt 1: Manuelles Magnetmessstativ

Durchgeführte Arbeiten:

Für erste Versuche zur Integration des Multisensorkopfes wurde ein Magnetmessstativ (441150 600; Fa. Hoffmann) in der Anlage erprobt.

Erzieltes Ergebnis:

Die Anwendung eines Messstativs ist für einfache Anwendungen bei z. B. KMU grundsätzlich geeignet. Jedoch ergeben sich einige Nachteile:

- Schwierige Positionierung durch gleichzeitige Bewegung aller drei Richtungen; lange Dauer der Positionsänderung
- keine Anzeige der Position; Bestimmung der Position durch Ausmessen schwierig
- Wiederholgenauigkeit der Positionierung gering

Deshalb wurde sich in beiden Forschungseinrichtungen zur Neuentwicklung von reproduzierbaren Positioniersystemen entschieden. An der FE 1 (IVV) wurde ein separater x-y-z-Positioniertisch entwickelt bzw. ein Raumportal an FE 2 (IGCV) beschafft und in die Anlagen integriert. Auch hierfür waren umfassende Tätigkeiten erforderlich, die über den ursprünglichen Projektantrag hinausgingen.

Schritt 2: 3D-Positioniertisch

Durchgeführte Arbeiten:

Infolge der nur mäßigen Eignung des Magnetmessstatives für reproduzierbare Messungen wurde im Rahmen des Projektes an FE 1 (IVV) ein 3D-Positioniertisch entwickelt. Basierend auf einem konstruktiven Entwicklungsprozess, der Variantenbildung und der Auswahl einer Vorzugsvariante wurde ein fertiger Entwurf inkl. Fertigungszeichnungen erstellt. Dieser Tisch ist für eine manuelle Bedienung vorgesehen, beinhaltet jedoch genaue Anzeigen für alle drei Koordinatenrichtungen.

Erzieltes Ergebnis:

Es wurde eine Vorzugsvariante des 3D-Positioniertisch mit Einzelsensormontage bei variablem Sensorkopf ausgewählt, konstruiert und in die Reinigungsanlage integriert (Abbildung 16).

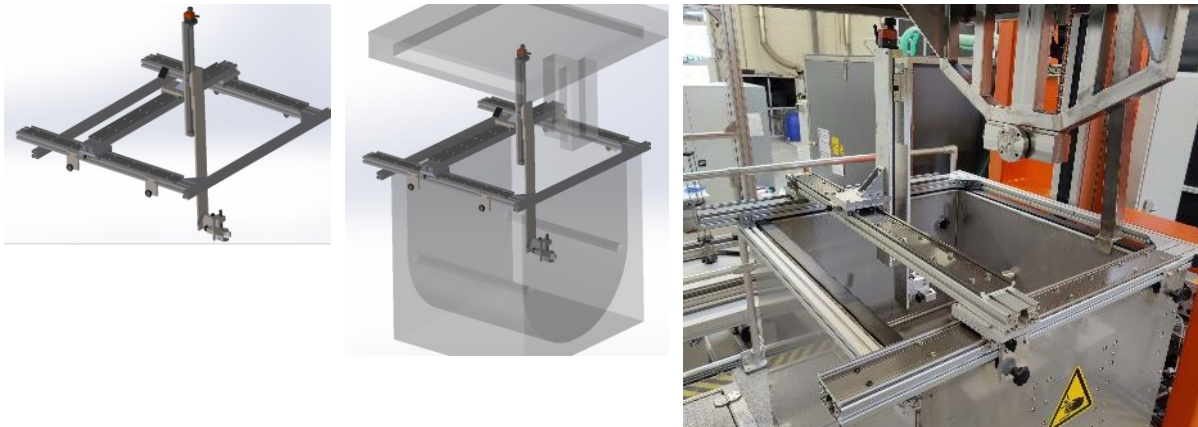


Abbildung 16: 3D-Positioniertisch

Schritt 3: Automatisiertes 3D-Portalroboter (Raumportal)

Durchgeführte Arbeiten:

In Rücksprache mit dem PbA, hier speziell Fa. Elma, wurde an FE 2 (IGCV) Fraunhofer-intern jenseits der Projektmittel ein 3D-Portalroboter angeschafft, was im ursprünglichen Projektplan nicht vorgesehen war. Grund hierfür war, dass für eine ausreichende Messgenauigkeit und

Wiederholbarkeit der Messungen mit dem KaviMeter kreisende Bewegungen um die eigentliche Messposition empfohlen werden. Des Weiteren erhöht ein derartiges Raumportal die Positioniergenauigkeit und Wiederholbarkeit der angefahrenen Messpositionen. Für den Kopf des Portals wurde mittels Kunststoff-3D-Druck eine Klemmhalterung hergestellt, mit der der Messkopf des KaviMeters am Roboter befestigt werden kann (Abbildung 17). Die Halterung verfügt außerdem über eine Adapterplatte für Schnellwechsel, mit der durch Lösen von 4 Schrauben der gesamte Messkopf incl. Adapterplatte ausgetauscht werden kann. So können verschiedene Sensorik an je einer individuellen Adapterplatte angebracht und zeitsparend verschiedene Messungen durchgeführt werden. Mit dem Portalroboter wird nun ein festgelegter Messplan im Becken abgefahren, wobei der Messkopf an jeder Messstelle kreisförmig um den Messpunkt nach Messvorgabe des Geräteherstellers Elma bewegt wird, um so eine ausreichende Mittelung des Kavitationsrauschwertes zu erreichen.

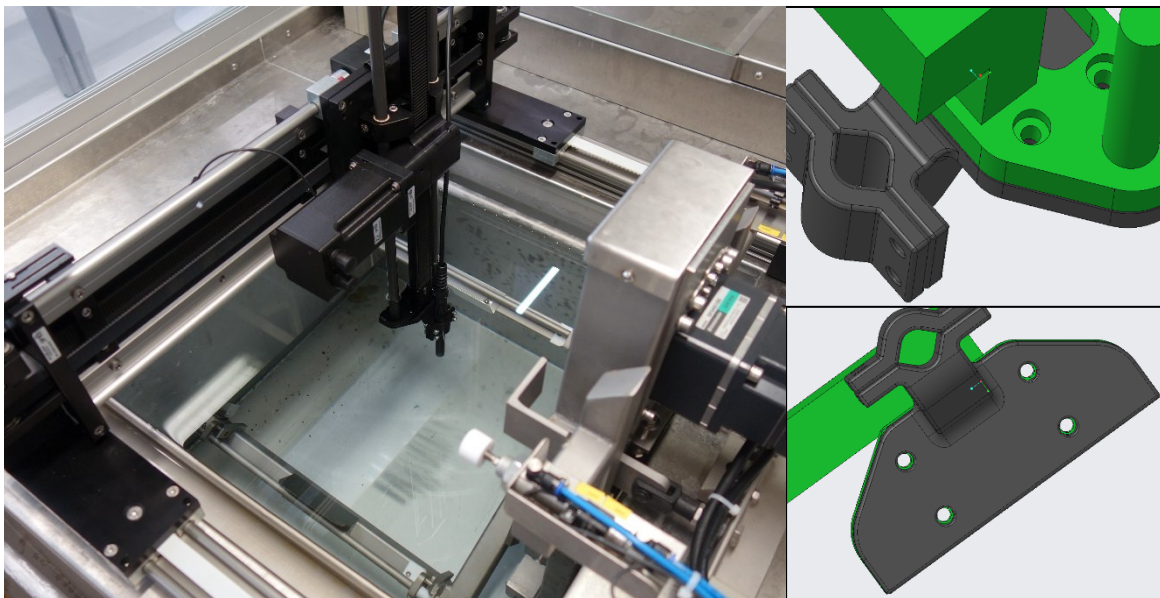


Abbildung 17: Portalrobotergestützter Einsatz des KaviMeters. Links: Realer Einsatz im Reinigungsbecken; rechts: CAD-Zeichnung der modularen Messgerätehalterung am Roboterkopf (Klemmhalterung für runde Messköpfe und Adapterplatte für Schnellwechsel)

Erzieltes Ergebnis:

Eine hohe Positioniergenauigkeit und Wiederholbarkeit der Messdaten konnte erreicht werden. Aufgrund der Modularität der Halterung für den Sensorkopf können für die Messroutine auch andere Sensoren eingesetzt werden, z. B. ein Oxymeter oder die Quarzkristallmikrowaage. Ebenso ist eine Integration des Multisensorkopfes (Abbildung 15) bei diesem System möglich.

Implementierung eines Sauerstoffsensors (Oxymeter)

Durchgeführte Arbeiten:

Die Integration des Sauerstoffsensors ist wegen der Empfindlichkeit der Messsonde im Ultraschallbad direkt nicht möglich. Außerdem ist es für zuverlässige Messergebnisse zwingend erforderlich, dass die Messsonde direkt mit einer vom Hersteller vorgegebenen Geschwindigkeit angeströmt wird. Daher wurde entschieden, den Sensor auf den Auslass des Ausgleichsbehälters zu montieren, sodass der Sauerstoffgehalt des vom Ausgleichsbehälter in das Ultraschallbecken strömenden Mediums gemessen wird. Hierzu wurde mittels Kunststoff-3D-Drucks ein entsprechender Krümmer erstellt, der auf die Fördermenge der Umwälzpumpe abgestimmt ist (Abbildung 18). Durch eine kegelförmige Anpassung im Bereich des Sensorkopfes wird der Rohrquerschnitt quasi über die gesamte Länge konstant gehalten.

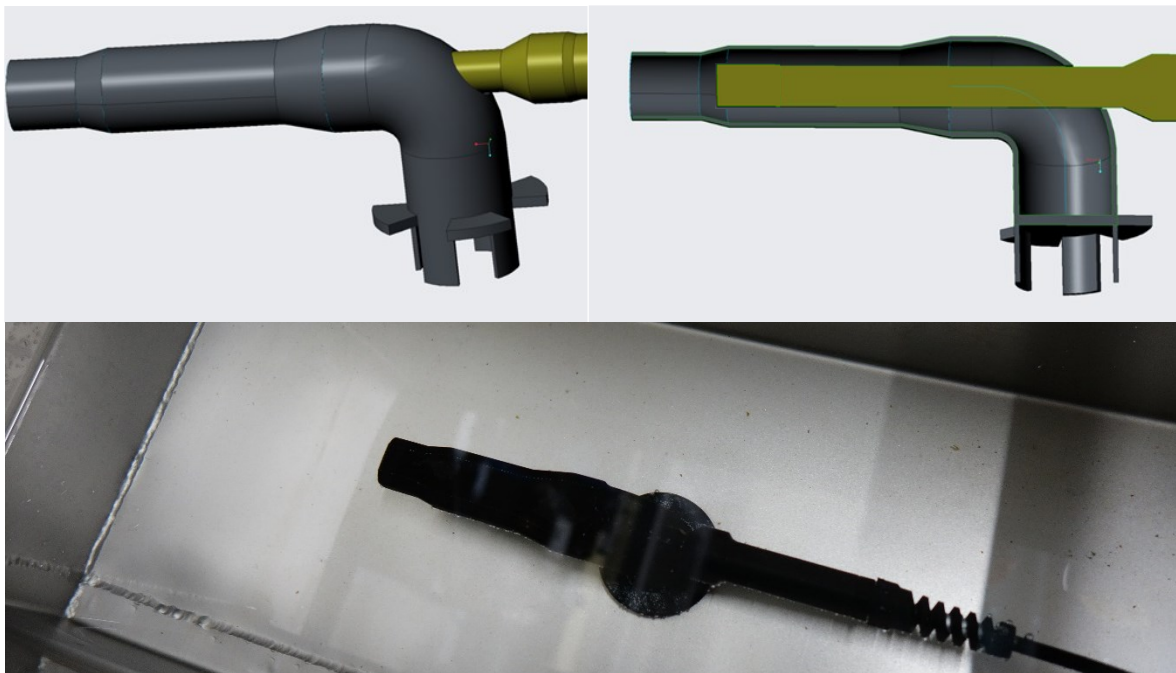


Abbildung 18: Implementierung des Sauerstoffsensors am Boden des Ausgleichsbehälters. Oben: CAD-Zeichnung mit Querschnitt, Unten: Realer Einsatz im Ausgleichsbehälter

Erzieltes Ergebnis:

Es zeigte sich, dass der Sauerstoffsensor konstante Ergebnisse lieferte. Die Messergebnisse zur Korrelation der Sauerstoffwerte mit den Werten im Ausgleichsbehälter konnten bis Projektende nicht sinnvoll ausgewertet werden, da die Ultraschallschwinger wegen der letzten Ausfälle nicht mehr genügend Leistung lieferten, um transiente Kavitation zu erreichen und somit das Bad zuverlässig zu entgasen. Es ist davon auszugehen, dass sich nach der Reparatur der Anlage im Betrieb ein Gleichgewicht zwischen dem Sauerstoffgehalt des Ultraschallbeckens und des Ausgleichsbehälters einstellt.

AP 3: Aufbau und Inbetriebnahme des Forschungsdemonstrators eines Multisensor-Systems

Im AP 3 wurde eine Lösung für die Anlagenintegration entwickelt, Mess- und Kalibrierverfahren für die Einzelsensoren entwickelt und diese bezüglich der Eignung für den Einsatz verifiziert.

AP 3.1: Gesamtintegration des Multisensor-Systems

Durchgeführte Arbeiten:

Die gezielte Auswertung von Zusammenhängen innerhalb der Ultraschallwirkungskette setzt das Vorhandensein aller relevanten Messgrößen voraus. Soweit möglich, sollten diese möglichst Inline und wirkortnah während des Reinigungsprozesses erfasst werden. Im Falle des Multisensorkopfes ist dies nicht möglich. Dennoch ist eine regelmäßige Prüfung und Dokumentation der relevanten Parameter direkt vor und/oder nach den Reinigungsprozessen sinnvoll. Um die Zuordnung der Daten zu den Reinigungsprozessen zu vereinfachen, Korrelationen zu ermöglichen und Störeinflüsse einfach zu ermitteln, ist die Erfassung und zusammenfassende Speicherung aller Daten erforderlich. Deshalb wurde an der FE 1 – zusätzlich zu den im Antrag vorgesehenen Arbeitsschritten – die Demonstratoranlage inkl. dem Multisensorsystem und weiteren, neu integrierten Sensoren mit einem zentralen Datenerfassungssystem verbunden.

Dieses System besteht aus einfachen RaspberryPi Datenerfassungsmodulen, die die Sensordaten aufnehmen und über einen Broker NATS an eine Datenbank senden. Als Datenbank wurde MariaDB genutzt. Hierfür wurde ein Entity-Relationship-Diagramm erarbeitet, welches die Beziehungen der einzelnen Tabellen darstellt und die Basis für ein effizientes, wissensbasiertes Datenmanagement ist. Die Umsetzung der Programmbestandteile sowohl für die Einzelsensoren als auch für das Multisensorsystem erfolgte mit der Programmiersprache Python.

Erreichte Ergebnisse:

Zur automatischen Erfassung der Daten wurde ein Datenerfassungssystem auf Basis eines RaspberryPi integriert und dieses an eine zentrale Datenbank angebunden. Somit werden die automatisch erfassbaren Daten direkt in die Datenbank abgelegt (Abbildung 19). Zur manuellen Eingabe der Daten wurde eine im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelte Datenerfassungsplattform erweitert und integriert, welche durch den Bediener eingegebene Daten ebenfalls im System mit Bezug zur jeweiligen Messung ablegt.

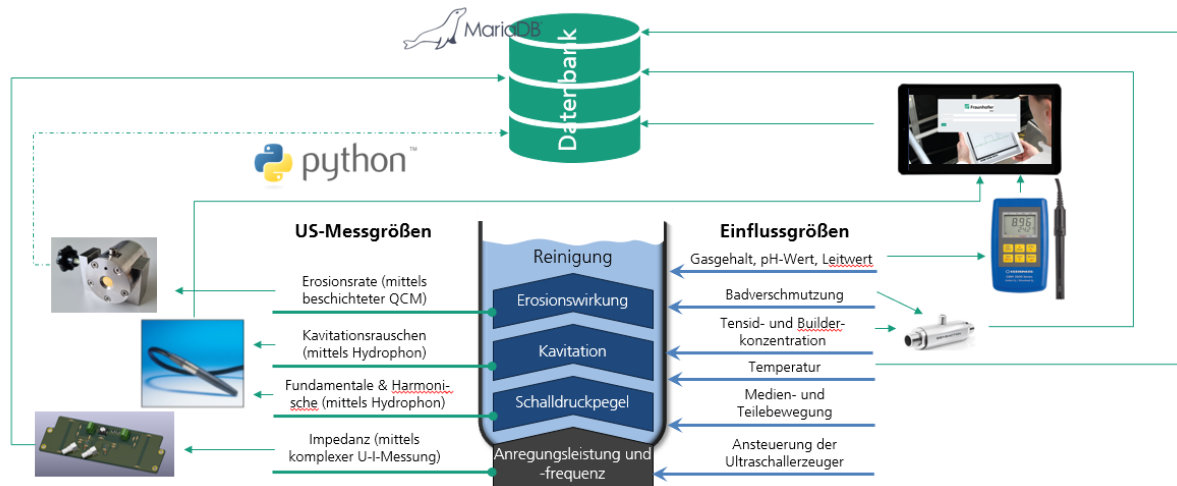


Abbildung 19: Darstellung der erfassten Daten

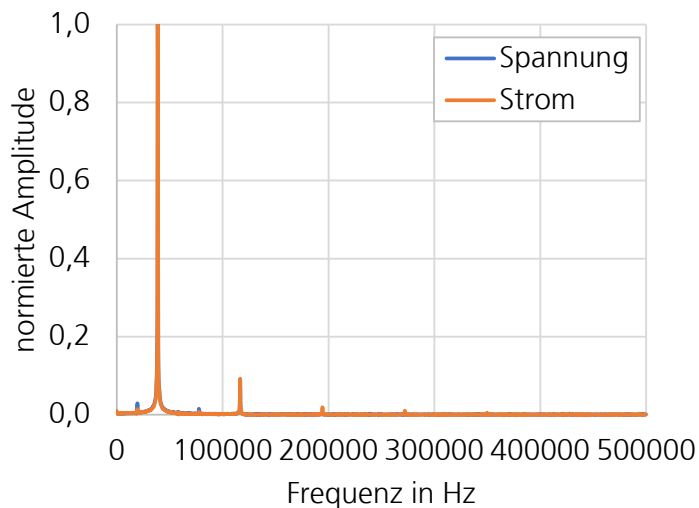
AP 3.2: Anpassung der Mess- und Kalibrierverfahren für die Einzelsensoren

Impedanzmessung der Ultraschallschwinger

Durchgeführte Arbeiten:

Für die zyklische Messung der Impedanz wurde eine Python-basierte Auswertung entwickelt, deren Ergebnis zusätzlich zu den Rohdaten in der Datenbank abgelegt wird.

Erreichte Ergebnisse:



Die Auswertung beinhaltet die Bestimmung des komplexen Widerstandes, die Phasenverschiebungswinkel und der Wirk- bzw. Blindwiderstand. Zusätzlich erfolgt eine Frequenzanalyse (Fast-Fourier-Transformation, FFT), so dass die Hauptfrequenz und Harmonische Schwingungen ermittelt werden (Abbildung 20).

Abbildung 20: beispielhaftes Frequenzspektrum (Schwinger 4 bei 100 % Leistung)

Aufbau des Messsystems für den Erosionssensor

Schritt 1: Design und Aufbau eines Anpassnetzwerkes zur Messung der Impedanz

Durchgeführte Arbeiten:

Kapazitäten und Induktivitäten führen bei der Messung zu einem zeitabhängigen Verhalten des komplexen Widerstandes (Impedanz). Daran angeschlossene Messgeräte verfälschen die eigentliche Impedanz des Erosionssensors. Deshalb ist die Integration eines Anpassnetzwerkes erforderlich, so dass die Quelle und die Senke zeitlich ähnliche Impedanzen haben.

Erreichte Ergebnisse:

Es wurde eine Schaltung für ein Anpassnetzwerk nach IEC 444 entworfen und gefertigt (Abbildung 21), welches zwischen dem Erosionssensor und dem Netzwerkanalysator geschaltet wird.

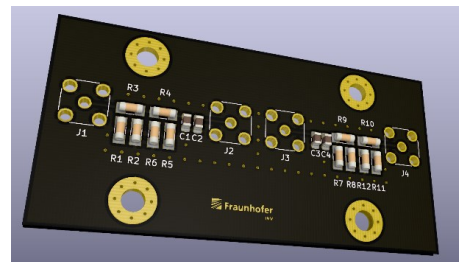
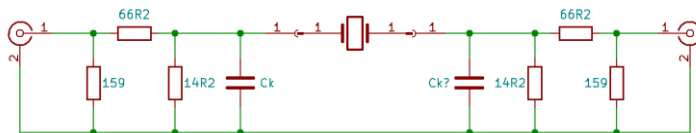


Abbildung 21: Schaltung und 3D-Modell des Anpassnetzwerkes

Zum Nachweis der Funktion wurden Messungen ohne und mit Anpassnetzwerk bei angeschlossenem Erosionssensor (in Luftumgebung) durchgeführt. Es zeigt sich, dass durch Integration des Anpassnetzwerkes eine deutliche Verbesserung der Impedanz-Anpassung ermöglicht wurde (Abbildung 22).

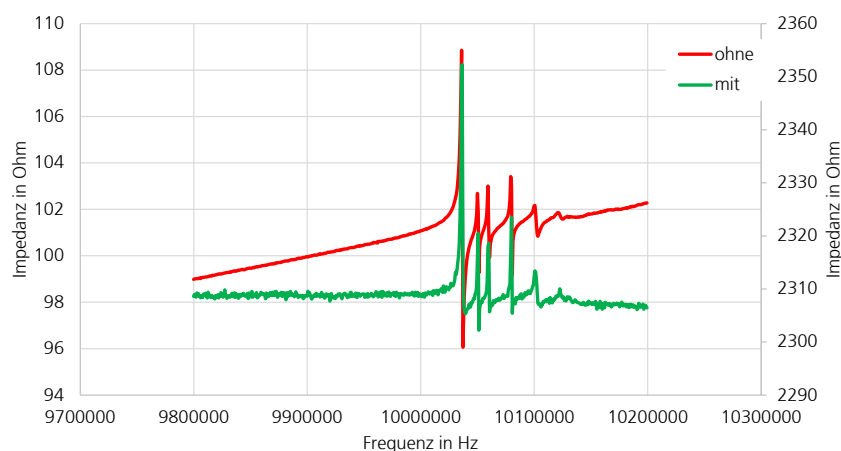


Abbildung 22: Verläufe der Impedanz ohne und mit Anpassnetzwerk

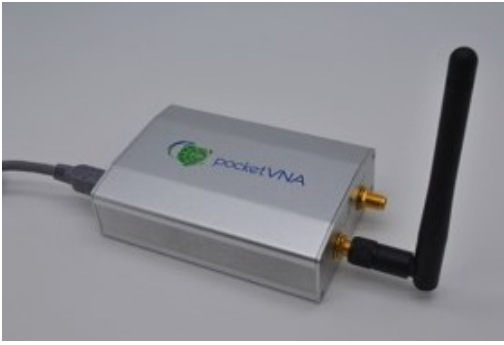
Somit konnte die Funktion des Anpassnetzwerkes nachgewiesen werden. Alle nachfolgenden

Messungen wurden mit dem Anpassnetzwerk zwischen dem Erosionssensor und dem Messgerät durchgeführt.

Schritt 2: Umsetzung des Netzwerkes von Vektornetzwerkanalysator auf Pocket-VNA

Durchgeführte Arbeiten:

Tabelle 1: Vergleich Labornetzwerkanalysator und kompakter Vector Analysator

	
<p>Vorteile: geringes Rauschen, hohe Messfrequenz</p> <p>Nachteile: viel Bauraum, Steuerung und Auslesen nur über spezielles Programm, komplexe Bedienung keine adaptive Parameteranpassung, teuer</p>	<p>Vorteile: kostengünstig, kompakt, Steuerung per externem Programmzugriff</p> <p>Nachteile: höheres Rauschen, geringere Messgenauigkeit, geringere Messfrequenz</p>

Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung der Sensoren sind hinreichend genaue Messwerte der Einzelsensoren bei gleichzeitig für KMU bezahlbaren Systemen. Aus diesem Grund ist die Anwendung eines Labor-Netzwerkanalysators nur bedingt zu empfehlen (vgl. Tabelle 1). Deshalb wurde ein kompakter Vector Analysator erprobt (pocketVNA), welcher über Python gesteuert werden kann und dessen Kosten im Vergleich zum Labormessgerät gering sind (< 1.000 €).

Erreichte Ergebnisse:

Sowohl das Labormessgerät als auch der pocketVNA zeigen einen ähnlichen Verlauf der Impedanz, wobei ein Offset infolge der unterschiedlichen Eingangsimpedanzen auftritt (Abbildung 23). Es zeigt sich, dass der pocketVNA gegenüber dem deutlich teureren Labormessgerät ein höheres Rauschen besitzt. Jedoch ist das Signal-Rausch-Verhältnis trotzdem hoch, weshalb eine Anwendung des pocketVNA und eine Integration in das System möglich ist.

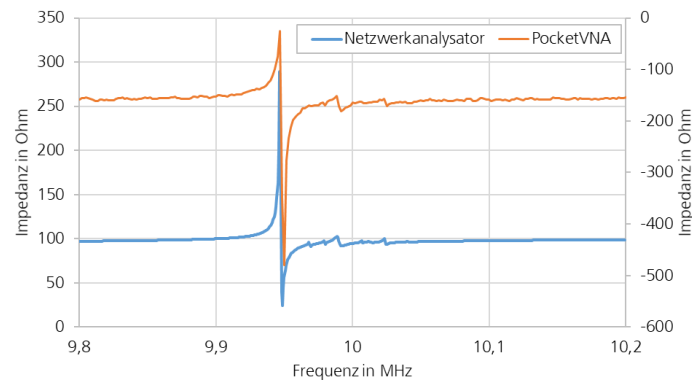


Abbildung 23: Vergleich der Impedanzen zwischen Labormessgerät und pocketVNA

Schritt 3: Entwicklung der Auswertelgorithmen für die Impedanzmessung

Durchgeführte Arbeiten:

Im nächsten Schritt wurden die Auswertemethode und -algorithmen zur Bestimmung der Erosionswirkung ermittelt. Hierfür wurden Labormessungen mit beschichteten Schwingquarzen in einem Laborultraschallbecken durchgeführt.

Erreichte Ergebnisse:

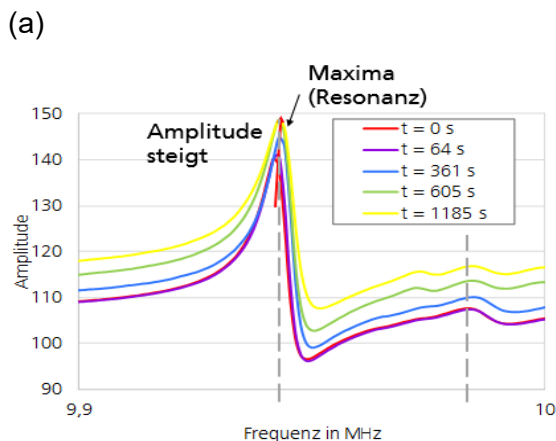


Abbildung 24: Amplitude in Abhängigkeit von der Frequenz für unterschiedliche Zeitpunkte

Es wurden mehrere erfolgsversprechende Auswertemöglichkeiten erprobt. Es kann das Maximum im Bereich der Eigenfrequenz zur Auswertung der Erosionsrate genutzt werden (Abbildung 24). Dies führt jedoch dazu, dass geringe Abweichungen oder auch eine zu geringe Abtastfrequenz zu einer deutlichen Verschiebung führt, weshalb diese Auswertemethode nicht bevorzugt wurde. Alternativ ist die Bestimmung der Frequenzverschiebung im Schnittpunkt mit der X-Achse möglich (Abbildung 25). Diese Variante entspricht dem Vorgehen in der

Literatur. Problematisch ist hierbei, dass die Impedanz, wie in vorhergehenden Messungen gezeigt, durch den Einbau und die verwendeten Quarze variiert. Die „Neigung“ der Kurve und der unterschiedliche Abstand würden zu verschiedenen Frequenzverschiebungen und somit Erosionsraten führen, obwohl die gleiche Menge des Schmutzes infolge Erosion abgetragen wurde. Im Vorhaben wurde sich deshalb für die Auswertung des Wendepunktes entschieden.

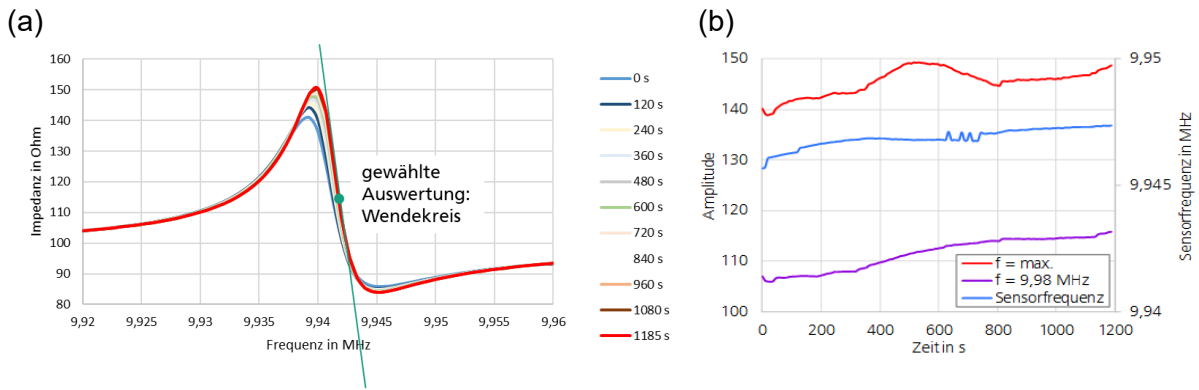


Abbildung 25: Erosionssensor – (a) Auswertung des Wendepunktes; (b) Vergleich Auswertung maximale Frequenz, feste Frequenz und Sensorfrequenz im Wendepunkt

AP 3.3: Funktionsnachweis unter Prozessbedingungen

Die Frequenzverschiebung und Erosion der Partikel auf dem Quarz des Erosionssensors ist von der Zeit abhängig. Es zeigt sich jedoch, dass die Frequenzverschiebung gut mit der Abnahme des Verschmutzungsgewichtes des Sensors korreliert (Abbildung 26). Für eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messpunkte wird eine maximale Verwendung des Sensors von < 600 s empfohlen, in welchem die Abhängigkeit zwischen Verschmutzungsgewicht und Frequenzverschiebung mit einem linearen Ansatz beschrieben werden kann.

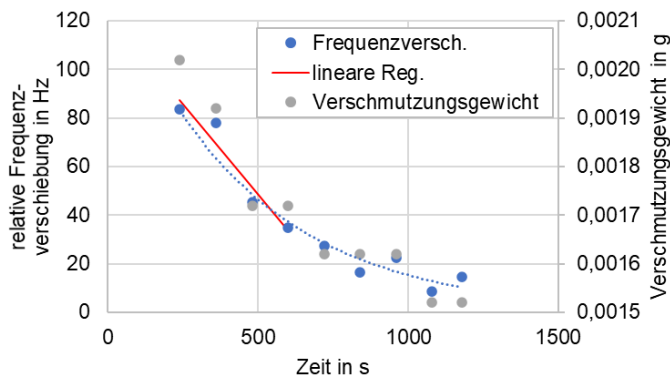


Abbildung 26: Frequenzverschiebung im Vergleich zur Änderung des Verschmutzungsgewichts in Abhängigkeit der Zeit

Durch Gegenüberstellung der Frequenzverschiebung Δf und der Änderung des Verschmutzungsgewichtes Δm kann eine Gleichung ermittelt werden, die durch Berücksichtigung des Zeitabschnittes Δt für die Bestimmung der Erosionsrate erforderlich ist:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{(0,0000022 \cdot \Delta f + 0,0000016) \text{ g}}{\Delta t}$$

AP 4: Entwicklung einer Systemlösung zur intelligenten Messdatenverarbeitung

Im Rahmen des AP 4 soll eine auf das Multisensorsystem zugeschnittene Lösung zur Verarbeitung und Bewertung der Ergebnisse für die Applikation der Ultraschallreinigung entwickelt.

AP 4.1: Analyse, Auswahl und Anpassung verfügbarer Softwarelösungen

Auswahl der KI-Verfahren

Durchgeführte Arbeiten:

Für die Auswahl eines geeigneten Algorithmus auf Basis von Künstlicher Intelligenz (KI) für die Datenanalyse wurde verschiedene Möglichkeiten recherchiert und deren Vor- und Nachteile zusammengefasst (Tabelle 2).

Erreichte Ergebnisse:

Tabelle 2: Gegenüberstellung unterschiedlicher KI-Algorithmen

	Entscheidungsbaum	Neuronale Netze	nächste Nachbarn Verfahren	Bayes Klassifikation
Vorteil	<ul style="list-style-type: none"> – einfach zu interpretierende Wenn-Dann Regeln – Priorisierung von Regeln möglich 	<ul style="list-style-type: none"> – gutes Handling von Ausreißern – hohe Klassifikationsgüte bei Klassen, die nicht in der Trainingsmenge vorkommen – metrischer Zielvariable anwendbar – Keine Linearität notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> – Für metrische und kategoriale Merkmale anwendbar 	<ul style="list-style-type: none"> – Hohe Genauigkeit auch bei großen Datenmengen
Nachteil	<ul style="list-style-type: none"> – unübersichtlich bei vielen Variablen – bei Verzweigungen werden metrische Variablen kategorisiert 	<ul style="list-style-type: none"> – Berechnungen schwer nachvollziehbar (Blackbox) – Sehr hoher Rechenaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> – Trainingsdaten für die Klassifizierung notwendig – hoher Rechenaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> – Falsche Annahmen - ungültige Klassifizierungen

Als am wahrscheinlichsten geeignete Lösung erscheint der Einsatz der Bayes-Klassifikation. Als treibender Faktor für die Entscheidung steht vor allem die zu erzeugende Datenmenge im Vordergrund. Da Reinigungsuntersuchungen vergleichsweise aufwändig sind (ca. 8 bis 10 Proben je Arbeitstag unter optimalen Bedingungen), war nicht davon auszugehen, dass mehrere Tausend Datensätze generiert werden können, die für andere KI-Methodiken wie neuronale Netze erforderlich wären. Entscheidungsbäume schieden aufgrund der Komplexität des Sachverhalts aus.

Implementierung der KI-Umgebung

Durchgeführte Arbeiten:

Für die Implementierung mittels Python wurden folgende Schritte vorgenommen:

- Es wurde eine definierte Ordnerstruktur zur Ablage von Messdaten und Informationen zu den verwendeten Versuchsparametern festgelegt.
- Es wurde Code zum Auslesen der Messdaten und Versuchsparametern aus der vorher vordefinierten Ordnerstruktur erzeugt.
- Eine grundsätzliche Basisstruktur einer Bayes-Klassifikation wurde erstellt.

Erreichte Ergebnisse:

Wegen der bereits in Abschnitt 4.1 (Vorbemerkungen) genannten Schwierigkeiten und Ausfälle von Teilen der Ultraschallreinigungsanlage am Fraunhofer IGCV konnten bei weitem nicht genügend Messdaten erzeugt werden, um selbst bei einem datensparsamen Algorithmus wie der Bayes-Klassifikation konsistente Ergebnisse zu erreichen. Insbesondere die Ausfälle der Piezo-Ultraschallschwinger und der Generatoren führten dazu, dass in vielen Fällen ein undefinierter Badzustand auftrat. Da die Anlage bis dato selbst keine integrierte Sensorik hat, die den tatsächlichen Zustand des Ultraschallbades in Echtzeit erfasst und eine Rückmeldung an den Bediener gibt, ist es oft schwierig, den exakten Zeitpunkt des Ausfalls prozessrelevanter Baugruppen der Anlage zu bestimmen. Dadurch verursacht waren viele der erzeugten Messergebnisse unbrauchbar, da die betreffenden Reinigungsergebnisse unter Parametern entstanden sind, die nicht mit den eingestellten Parametern übereinstimmten. Es war nicht möglich, korrekte von inkorrekten Parametersätzen zweifelsfrei zu unterscheiden, sodass alle unter diesen Bedingungen entstandenen Datensätze als fehlerhaft angesehen und entsprechend verworfen werden mussten. Dies unterstreicht an dieser Stelle nochmals die Wichtigkeit und Relevanz einer zukünftigen Implementierung geeigneter Sensorik (z. B. KaviMeter) in Ultraschallreinigungsanlagen, um derartige Ausfälle oder Änderungen des Badzustandes schnell und rechtzeitig zu erkennen.

AP 4.2: Integration bestehender Wissensbasis in Datenverarbeitung

Da AP 4.1 wegen der dort angesprochenen technischen Schwierigkeiten mit und Ausfälle der Ultraschallreinigungsanlage nicht in vollem Umfang abgeschlossen werden konnte, konnte AP 4.2 nicht sinnvoll bearbeitet werden, da wesentliche Grundlagen aus AP 4.1 fehlten. Die Wissensbasis wird in Form des sogenannten Priors (A-priori-Wahrscheinlichkeit) in der Bayes-Klassifikation eingesetzt. Im Laufe des Trainings ergäbe sich mit dem Trainingsdatensatz aus dem Prior der Posterior (A-posteriori-Wahrscheinlichkeit), dieser wiederum würde dann im nächsten Trainingsdurchlauf zum neuen Prior. Für eine umfassende Integration der Wissensbasis sind somit entsprechend gute Messdaten erforderlich, um später sinnvolle Ergebnisse erhalten zu können.

AP 5 Exemplarische Eignungsanalysen im Anlageneinsatz

Im AP 5 wurde der Forschungsdemonstrator des Multisensorsystems bzgl. dessen Eignung zur Messung von reinigungsrelevanten Parametern für die Ultraschallanwendung erprobt. Hierfür wurden Ersatzversuche für Reinigungsprozesse durchgeführt und diese mit den Parametern verglichen.

Design eines Modellversuchs zur Erzeugung von Trainingsdaten für eine KI

Durchgeführte Arbeiten:

Bevor eine Künstliche Intelligenz (KI) oder ein intelligenter Datenauswertalgorithmus genutzt werden kann, müssen zunächst Trainingsdaten generiert werden, in denen die anzulernenden Effekte oder Features deutlich sichtbar sind, sowie mit erwartbaren Ergebnissen übereinstimmen. Im Projekt wurden deshalb aus dem Projekt WAPnaRa bekannte Öle und Fette zum Verunreinigen einer einfachen metallischen Testgeometrie (nichtrostende Stahlplättchen, 50 mm x 100 mm) verwendet. Die Liste umfasste folgende Öle und Fette:

- App. 1: Liqui Moly 15W-40 Formula Super
- App. 2: Mobilube FE Plus 75 W-85
- App. 3: Wicocut F2-S4
- App. 4: Wicoil 754
- App. 5: Lux Mehrzweckfett NLGI2
- App. 6: Castrol Tribol GR 100-OPD

Aus dieser Liste wurde das Öl App 2 gewählt, weil es als einziges aus der Liste die folgenden Bedingungen erfüllte:

- nicht mit dem eingesetzten Reiniger (OQEMA: Curatech SP 6644) vollständig ablösbar, da sonst kein Ultraschalleffekt nachweisbar ist
- Abreinigungsverhalten entspricht näherungsweise dem in der Literatur beschriebenen Verhalten unter Berücksichtigung der Einflüsse nach dem Sinner'schen Kreis [17], d. h. Reinigung wird konsistent besser mit höherer Temperatur, Ultraschallleistung und Reinigungszeit.

Zur Analyse wurde ein Laserfluoreszenzverfahren verwendet (Fraunhofer IPM F-Scanner), bei dem die Verunreinigung unter Einsatz eines Ultraviolett-Lasers ($\lambda = 405 \text{ nm}$) zum Leuchten angeregt und anschließend detektiert wurde.

Für die Messung wurden die Stahlplättchen in einen 3D-gedruckten Rahmen aus ABS bzw. später aus PC-ABS, da PC-ABS thermisch und mechanisch belastbarer ist, gespannt (siehe

Abbildung 27). Für vergleichende Messungen und Prototypen der Halterungen wurde aufgrund der geringen Fertigungskosten und sehr schnellen Herstellung Kunststoff gewählt. In Zukunft sollen die Kunststoffhalterungen dann durch eine ähnliche, jedoch filigranere 3D-gedruckte metallische Halterung ersetzt werden, da Metalle grundsätzlich weniger Ultraschalleistung absorbieren und daher die Einflüsse auf das Reinigungsergebnis minimiert werden können.

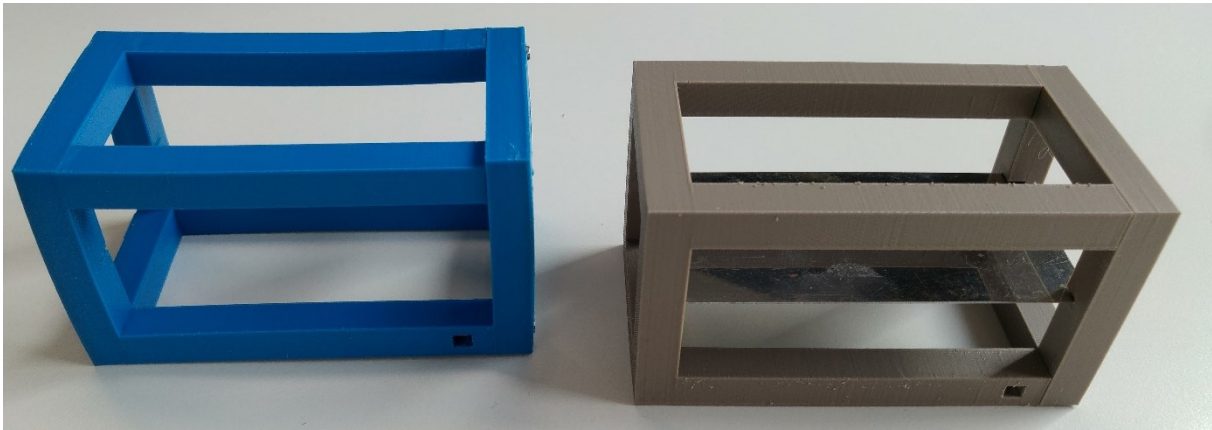


Abbildung 27: 3D-gedruckte Halterungen für die Metallplättchen (links: ABS, rechts PC-ABS incl. Metallplättchen)

Für die Messreihe wurde eine fixe Reinigungskette festgelegt, bei der nur jeweils der erste Reinigungsschritt (Ultraschallreinigung) verändert wurde. Alle Spülschritte sowie die Trocknung erfolgten jeweils identisch. Die Probenhalter wurden wie oben (Abbildung 27) gezeigt eingesetzt, wobei dann nur die obere Seite des Metallplättchens zu etwa 2/3 mit einer 10 µm dicken Ölschicht beaufschlagt wurde.

Erreichte Ergebnisse:

Erste Datensätze lieferten konsistente Ergebnisse. Eine Erhöhung der Ultraschalleistung in VE-Wasser bewirkt einen stärkeren Abtrag der Modellverschmutzung, d. h. eine Reduktion (Red.) der Verschmutzung mittels Ultraschall wird erreicht (Abbildung 28). Die Reduktion der Verschmutzung bemisst sich durch die Reduktion des Integrals des Anfangswerts der Fluoreszenz.

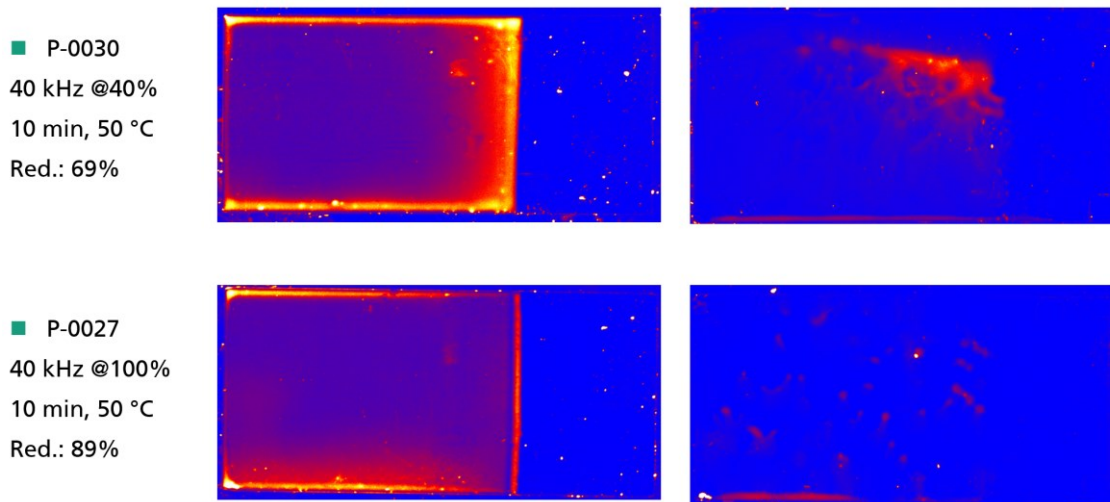


Abbildung 28: Einfluss der Ultraschalleistung, 40 kHz

Andere Versuche führten zu Inkonsistenzen, wo der Zusammenhang – mehr Leistung = mehr Abtrag – nicht gegeben war. Eine geringere Leistung führte zu einem geringerem Schmutzabtrag (Abbildung 29).

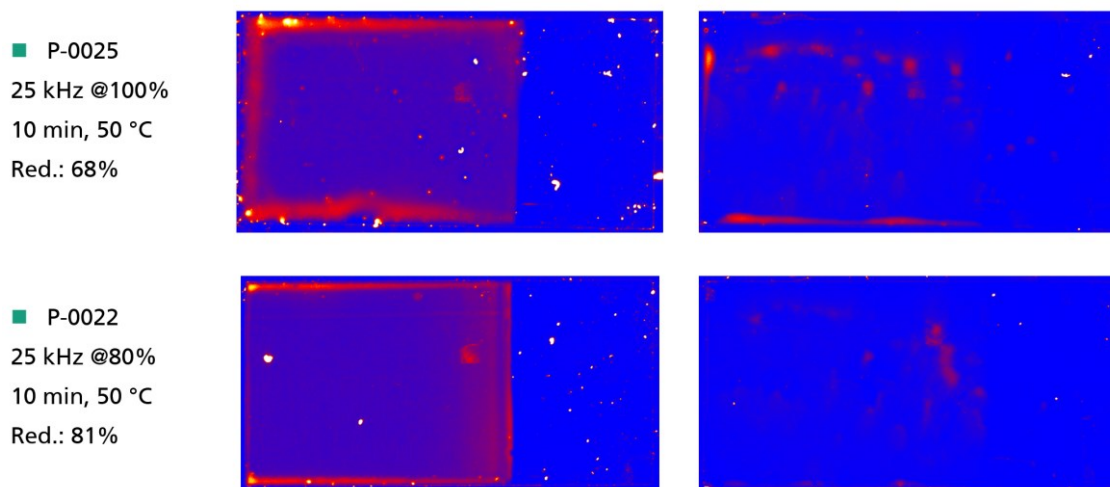


Abbildung 29: Einfluss der Ultraschalleistung, 25 kHz

Deshalb wurden Blindtests mit ausgeschaltetem Ultraschall durchgeführt. Diese zeigten, dass die Ultraschallwirkung in einigen Fällen keinen signifikanten Beitrag zum Sauberkeitsergebnis leistet, teilweise sogar der Blindtest besser reinigte als unter dem Einsatz von Ultraschall.

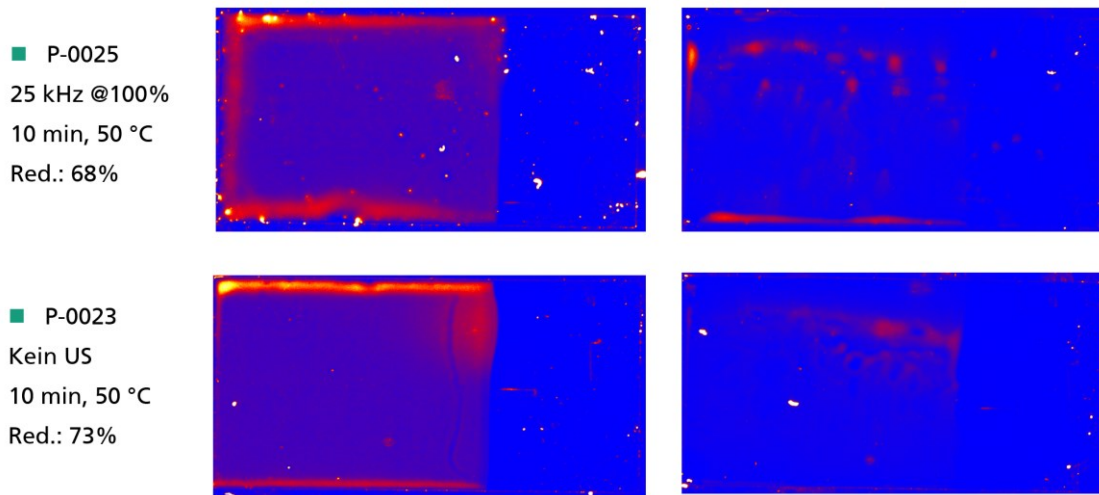


Abbildung 30: Tauchreinigung ohne Ultraschall

Die Ursache für die Inkonsistenz ist höchstwahrscheinlich in der stark reduzierten Kavitation innerhalb des Probenkorbes zu sehen, sofern dieser rotiert. Zur Bewertung in weiteren Messreihen wurde daher die Rotation der Körbe während des Einsatzes von Ultraschall vermieden, um die Effekte des Ultraschalls von Spüleeffekten unterscheiden zu können.

Für die Versuche wurde im nächsten Schritt der Reiniger OQEMA: Curatech SP 6644 zugesetzt, wodurch eine gute Sauberkeit bei verringertem Leistungseinsatz erzielt wurde (Abbildung 31). Bei gleicher Reinigungszeit wie zuvor konnte die Sauberkeit auf 98% gesteigert werden. Bei einer Reduktion der Leistung auf einen Restwert von 20% sowie einer Halbierung der Reinigungszeit wurden bereits 90% Sauberkeit erreicht.

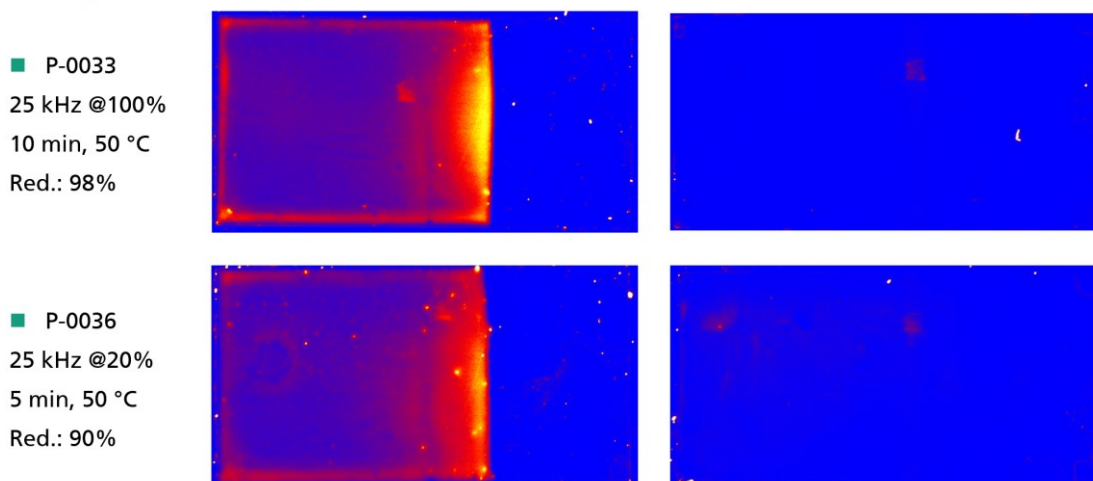


Abbildung 31: Ultraschallreinigung mit chem. Reiniger

Bei Testmessungen an der Ultraschallanlage am Fraunhofer IGCV zeigte sich ein signifikanter Einbruch des Kavitationsrauschens und des Schalldrucks im Becken beim Einsatz des rotierenden Probenträgers bei einer Frequenz von $f = 25$ kHz (Abbildung 32). Das Medium im Becken erreicht bei gleichzeitiger Rotation (2 Umdrehungen pro Minute) des Probenträgers keinen transienten Kavitationszustand mehr. Es ist ein Abfall von ca. 15 dB im Kavitationsrauschen zu beobachten. Ein Wert von etwa 27 - 28 dB müsste für transiente Kavitation überschritten werden.

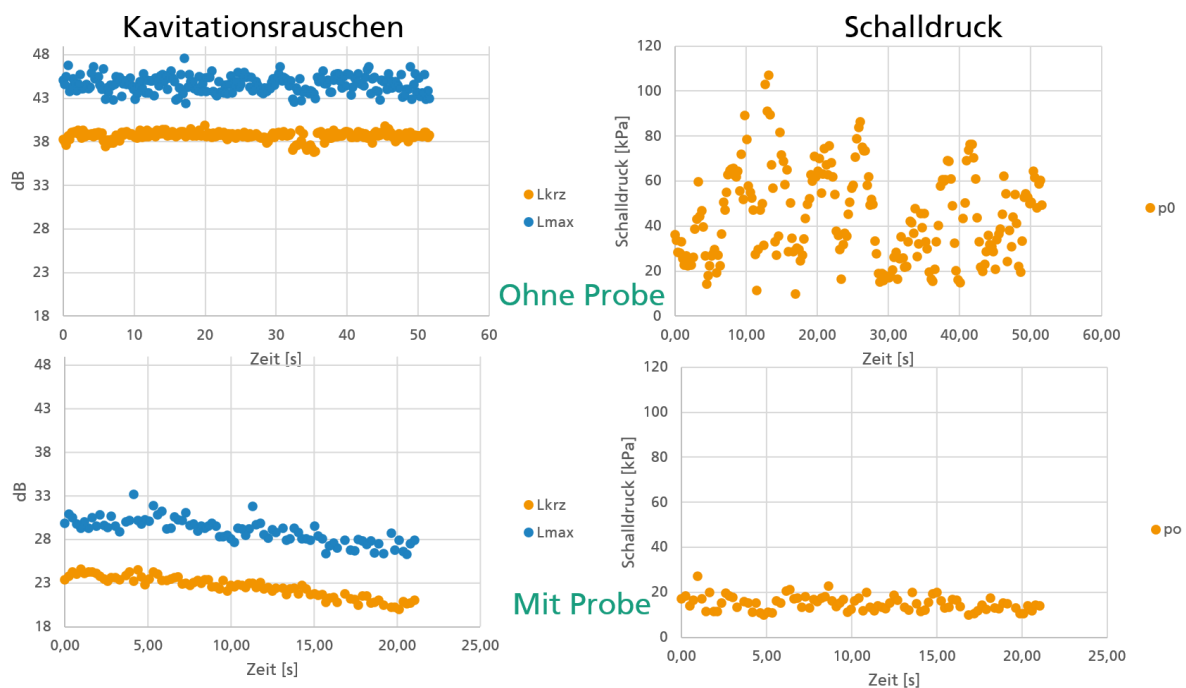


Abbildung 32: Kavitationsrauschen und Schalldruck mit und ohne Probe, 25 kHz

Ebenso zeigt sich bei einer Frequenz von $f = 40$ kHz ein ähnlich hoher Verlust von ca. 15 dB bei der Kavitationsrauschzahl und somit Verlust der transienten Kavitation, sowie ein massiver Einbruch des Schalldrucks im Becken beim Einsatz des rotierenden Probenträgers (Abbildung 33). Daher muss für Versuche die Rotation der Probenträger deaktiviert werden, um zu gewährleisten, dass transiente Kavitation vorliegt.

Bei weiteren Messungen zeigte sich, dass in der Anlage beim IGCV in Augsburg in unregelmäßigen Abständen massive Einbrüche der Kavitationsrauschzahl zu beobachten waren. Diese nahmen im Projektverlauf zu. Zusammen mit dem Anlagenhersteller wurden die Ultraschallgeneratoren zunächst mehrfach repariert und schließlich getauscht, was jedoch das Problem nicht beheben konnte. Es zeigte sich im Nachgang des Projekts (April 2022), dass eine Vielzahl der Piezo-Schwingerelemente ungewöhnlich hohe Verschleißerscheinungen

aufwiesen, sodass ein vollständiger Tausch der Becken initiiert werden musste. Aufgrund der sich häufenden Ausfälle wurde daher zur Qualifizierung der Kavitationsmessung bevorzugt die Ultraschallreinigungsanlage am IVV in Dresden verwendet.

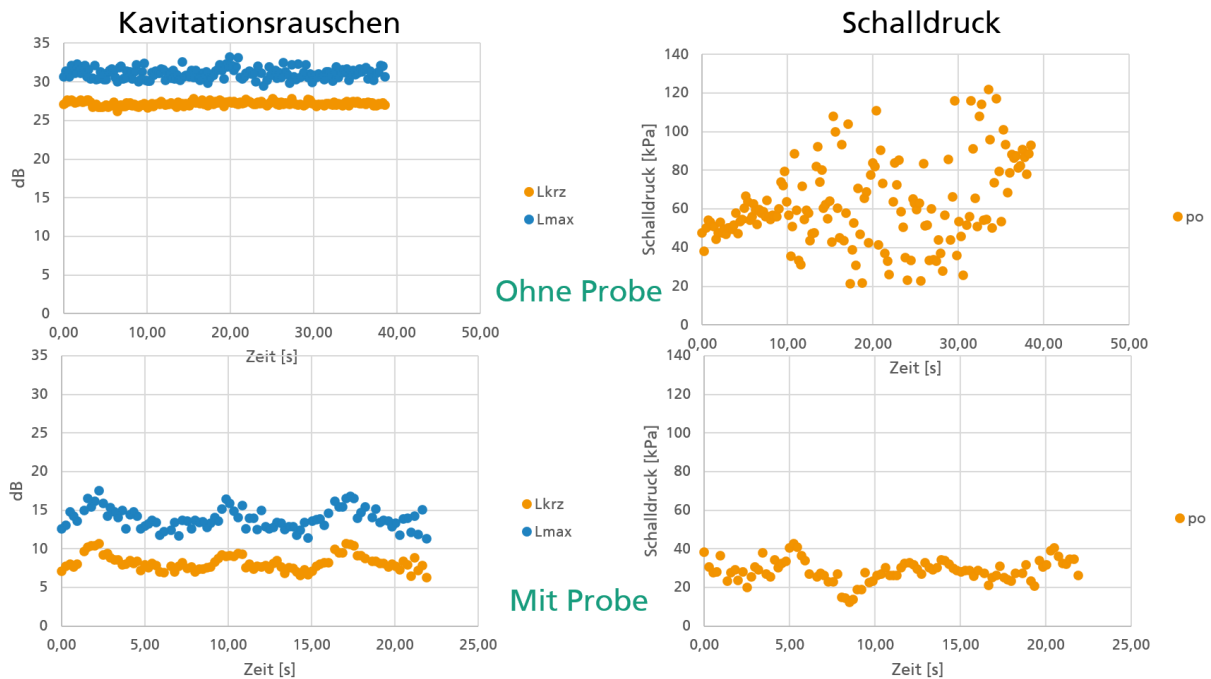


Abbildung 33: Kavitationsrauschen und Schalldruck mit und ohne Probe, 40 kHz

Qualifizierung der Kavitationsmesstechnik (KaviMeter) zusammen mit dem Erosionssensor in einem Labor-Ultraschallbecken

Durchgeführte Arbeiten:

Die einzelnen Sensorkomponenten des Multisensorsystems wurden im Anlageneinsatz in einem Labor-Ultraschallbecken (Elma S60 H) erprobt.

Erzielte Ergebnisse:

Die Ergebnisse mit den Messungen mittels Hydrophon (Elma KaviMeter) zeigen eine deutliche örtliche Abhängigkeit des Schalldruckes:

- höhere Abhängigkeit bei geringer Eintauchtiefe
- gleichmäßiger bei größerer Eintauchtiefe

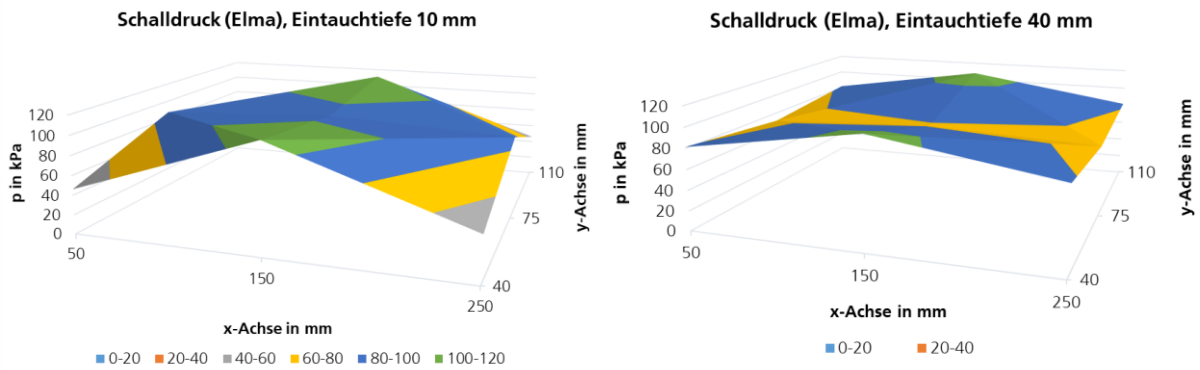


Abbildung 34: Schalldruckverteilung in einem Labor-Ultraschallbecken Leistung = 100 %, VE-Wasser, 10 min entgast

Demgegenüber zeigte ein Labor-Ultraschallbecken eine gleichmäßigere örtliche Verteilung, wobei ein geringfügiger Einfluss der Eintauchtiefe existiert (Abbildung 35).

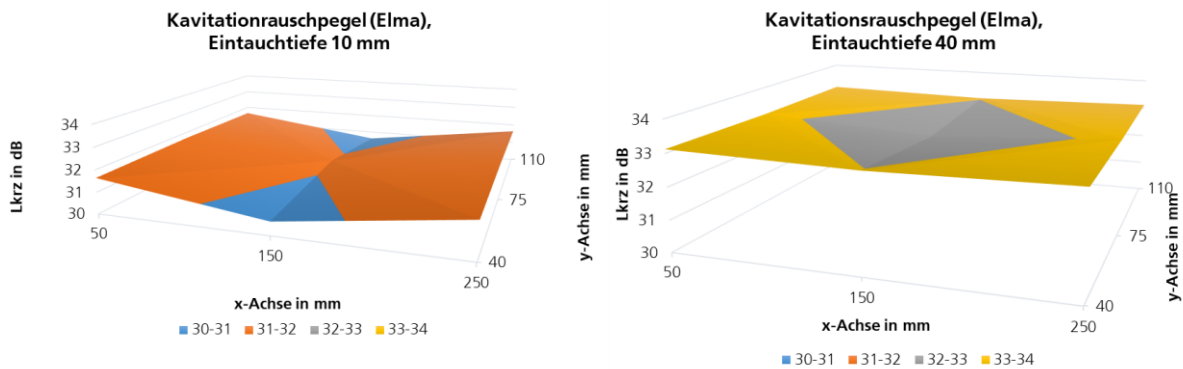


Abbildung 35: Verteilung des Kavitationsrauschpegels in einem Labor-Ultraschallbecken, Leistung = 100 %, VE-Wasser, 10 min entgast

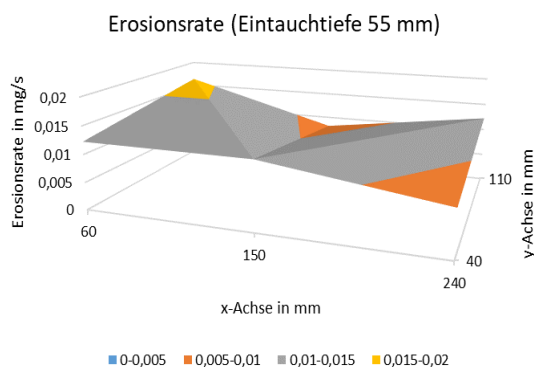


Abbildung 36: Verteilung der Erosionsrate in einem Labor-Ultraschallbecken, Leistung = 100 %, VE-Wasser, 10 min entgast

Die mittlere Erosionsrate zeigt ebenfalls eine geringe Abweichung über die Fläche. Die erzielte räumliche Verteilung entspricht in etwa der Verteilung des Kavitationsrauschens, jedoch nur bedingt des Schalldrucks. Damit liegt der Schluss nahe, dass Kavitationsrauschen und Erosionsrate eng miteinander verknüpft sein könnten. Um hier eine Kausalität statistisch sicher nachzuweisen, sind in Zukunft auf diesem Gebiet weitere Messungen erforderlich.

Qualifizierung der Kavitationsmesstechnik (KaviMeter) in einer Ultraschallanlage in industrielle Größe

Durchgeführte Arbeiten:

Im nächsten Schritt wurde das Multisensorsystem in einer Ultraschall-Industrieanlage am Fraunhofer IVV erprobt (Abbildung 37). Die Anlage kann mit zwei unterschiedlichen Frequenzen betrieben werden, was zu unterschiedlichen Leistungen bzw. Leistungsdichten führt (Tabelle 3).

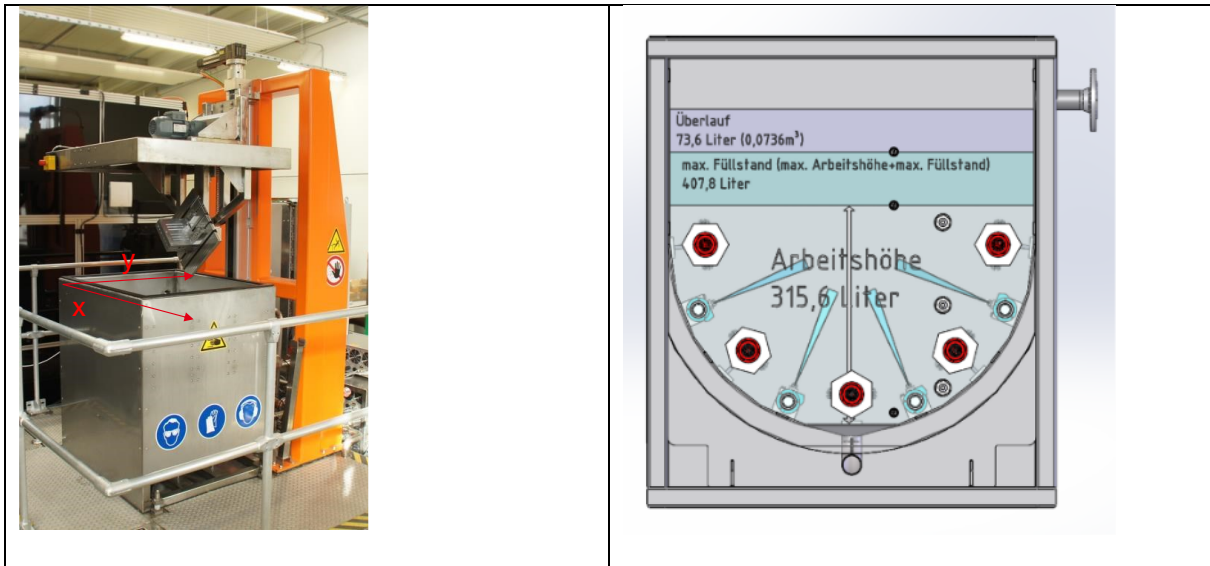


Abbildung 37: Ultraschall-Reinigungsanlage am Fraunhofer IVV

Tabelle 3: Konfigurationen der Ultraschall-Reinigungsanlage

Ultraschallschwinger	Stab-Sonotroden	
Ultraschallfrequenz	25 kHz	40 kHz
Anzahl Sonotroden	4	5
Max. Ultraschalleistung	6000 W	5000 W
Max. Leistungsdichte	19 W/l	15,8 W/l

Erzielte Ergebnisse:

Die Untersuchung des Schalldruckes und des Kavitationsrauschpegels zeigen, dass eine sehr ungleichmäßige Ultraschallwirkung zu erwarten ist. Besonders im mittleren Bereich, wo das Bauteil zur Reinigung angeordnet ist, ist eine deutliche Abnahme des Schalldruckes (Abbildung 38) und des Kavitationsrauschens (Abbildung 39) erkennbar.

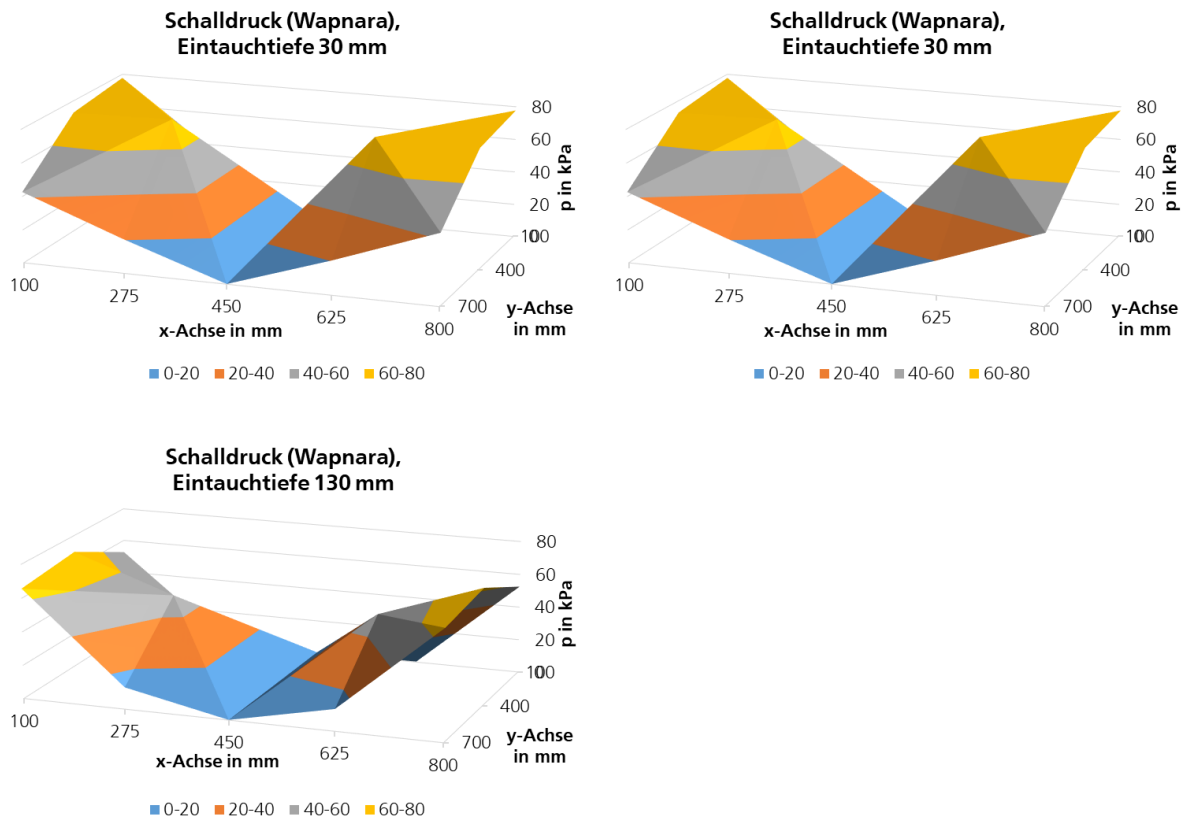


Abbildung 38: Verteilung des Schalldruckes für unterschiedliche Eintauchtiefen, Leistung = 100 %; Frequenz = 40 kHz

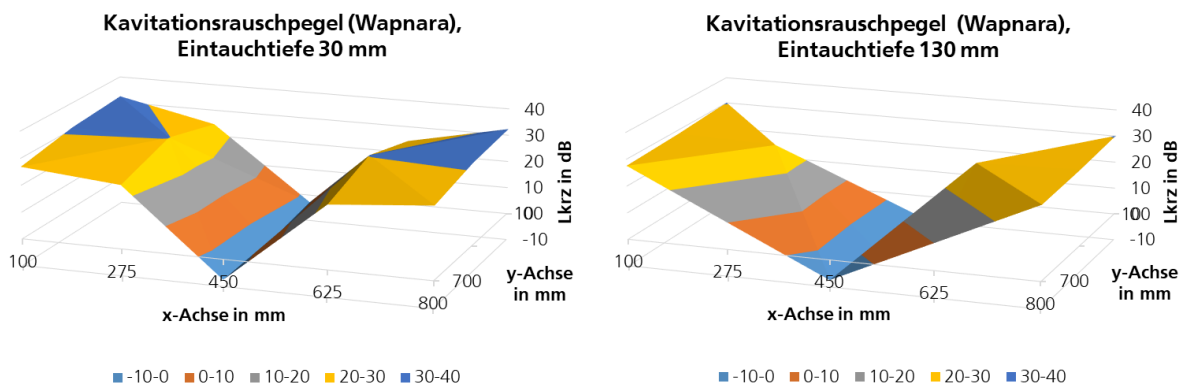
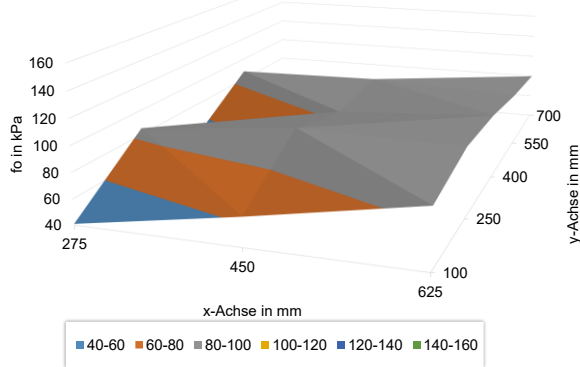


Abbildung 39: Verteilung des Kavitationsrauschpegels für unterschiedliche Eintauchtiefen, Leistung = 100 %; Frequenz = 40 kHz

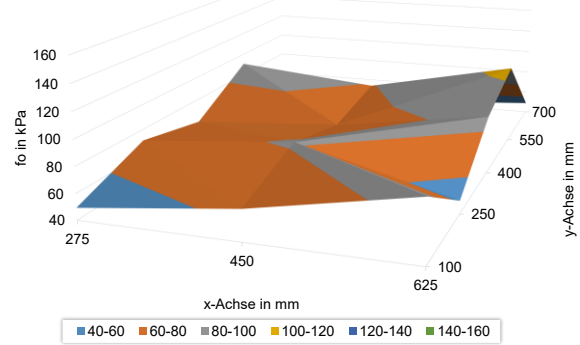
Während der Messungen wurde beobachtet, dass das Signal des mittleren Schwingers sporadisch zusammenbrach und keine Leistung abgegeben wurde. Eine Ursache für dieses Verhalten konnte auch nach eingehender Prüfung, auch in Rücksprache mit dem Hersteller der Ultraschallschwinger, nicht gefunden werden. Deshalb wurde im Rahmen der Wiederholungsmessungen darauf geachtet, dass der mittlere Schwinger Leistung abgegeben hat. Um diesen Zustand erreichen zu können, musste die Leistung reduziert werden. Bei 50 % Leistung konnte über einen längeren Zeitraum die Funktion sichergestellt werden, wohingegen

100 % nur sporadisch gemessen werden konnte. Der mittlere Schwinger konnte diese Einstellung meist nur für einen kurzen Zeitraum aufrechterhalten, was für die Messungen mit dem Multisensorsystem ausreichend war. Ebenso hatte der äußere Schwinger 1 sporadisch Fehlerzustände und Leistungseinbrüche. Stabile Reinigungsversuche über einen längeren Zeitraum waren damit jedoch nicht möglich.

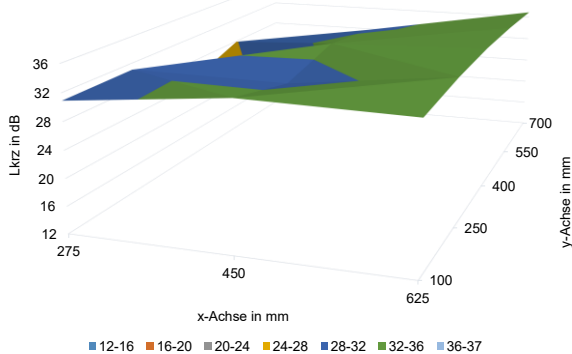
Schalldruck f_0 (Wapnara) Eintauchtiefe 200 mm, 50 % Leistung



Schalldruck f_0 (Wapnara) Eintauchtiefe 200 mm, 100 % Leistung



Kavitationsrauschpegel Lkrz (Wapnara), Eintauchtiefe 200 mm, 50 % Leistung



Kavitationsrauschpegel Lkrz (Wapnara), Eintauchtiefe 200 mm, 100 % Leistung

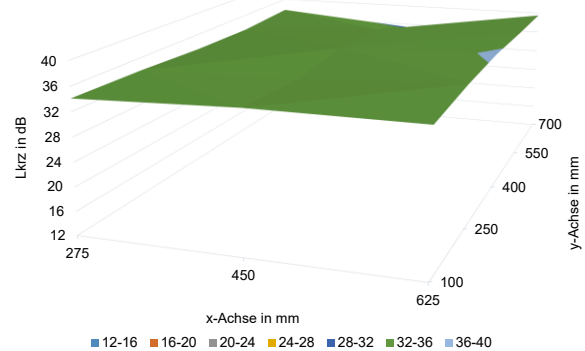


Abbildung 40: Verteilung des Schalldruckes und des Kavitationsrauschpegels, Wiederholungsmessung, Frequenz = 40 kHz

Die Wiederholungsmessung zeigt (Abbildung 40), dass das Schallfeld eine geringe Abhängigkeit von der Position besitzt. Zudem ist ersichtlich, dass die Schwelle für die Wirkung der Kavitation überschritten ist. Somit kann von einer gleichmäßigen Wirkung der Kavitation bei einer stabilen Leistung > 75 % innerhalb des Tauchbades ausgegangen werden (> 29 dB, Aussage Elma, vgl. Vortrag PTT 10/2020; [17]). Basierend auf den Messungen kann geschlussfolgert werden, dass die Überprüfung des Ultraschallfeldes mittels Hydrophon eine sinnvolle Möglichkeit zur Bestimmung von Störungen und Schallfeldunterschieden darstellt. Infolge des sporadischen Zusammenbrechens der Leistung insbesondere des mittleren Schwingers, wodurch die Leistung < 75 % wurde, können keine langwierigen Reinigungsversuche im Bereich von 20 – 30 min je Versuch, wie sie in der Industrie Standard sind, in der Ultraschallreinigungsanlage durchgeführt werden.

Vergleich der Kavitationsmesstechnik mit dem Aluminiumfolientest

Durchgeführte Arbeiten:

Zum Nachweis der Funktion des Multisensorsystems im Anlageneinsatz und dem Vergleich mit Prozessgrößen der Ultraschallreinigung wurden zusätzlich Erosionsversuche – als Ersatz für die Reinigungsversuche mit Testbauteilen – mit Aluminiumfolie durchgeführt. Hierzu wurde eine Folienaufnahme entwickelt, die eine definierte Spannung der Folie ermöglichte und diese innerhalb der Reinigungsanlage mittig positioniert (Abbildung 41).

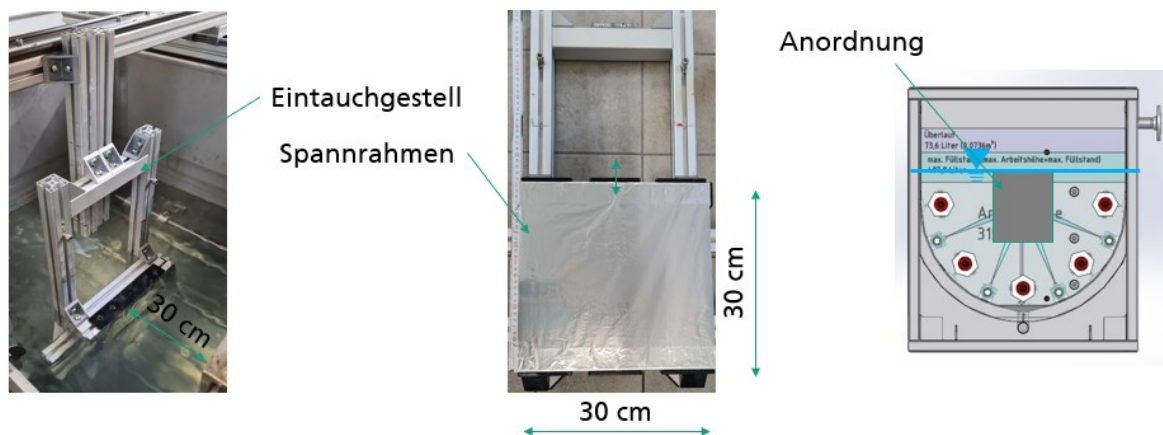







Abbildung 41: Versuchsaufbau Aluminiumfolientest

Erzielte Ergebnisse:

Tabelle 4: Aluminiumfolientest, Frequenz = 40 kHz; *Erosionsrate \bar{E}_r bezogen auf 600 s

P in %	100	100	100	70	50
t in min	15	13	10	13	13
					
Beschr.	zerstört, viele Löcher	Beginn Zerstörung, einzelne Löcher	Beginn Oberflächenveränderung, leichte Strukturänderung	geringste Oberflächenveränderung	keine Oberflächenveränderung
Δf in Hz	604 ± 154	604 ± 154	604 ± 154	566 ± 181	412 ± 138
\bar{E}_r in mg/s*	$0,00222 \pm 0,00057$	$0,00222 \pm 0,00057$	$0,00222 \pm 0,00057$	$0,00208 \pm 0,00067$	$0,00151 \pm 0,00051$
f_0 in kPa	86,6	86,6	86,6	86,9	84,4
L_{krz} in dB	35,3	35,3	35,3	34,4	32,9

Mit dem Aluminiumfolientest konnten gezeigt werden, dass mit Hilfe des Multisensorsystems eine gute Überprüfung des Schallfeldes möglich ist. Dennoch zeigt es auch, dass besonders

der Faktor Zeit nicht mit dem System erfasst werden kann. Obwohl alle Ultraschallgrößen konstant waren, wurde unter Variation der Zeit unterschiedliche Ergebnisse erreicht. Deshalb ist es trotz Überwachung des Ultraschallfeldes erforderlich, Reinigungsuntersuchungen oder Versuche mit Ersatzversuchen zur Auslegung der Reinigungsprozesse durchzuführen.

Überwachung der Impedanz zur Bestimmung der ins Bad abgegebenen Leistung Durchgeführte Arbeiten:

Parallel zu den Reinigungsversuchen am IVV wurde – neben den weiteren Parametern – die Inlineimpedanz der Ultraschallschwinger überwacht. Ausgewertet wurde insbesondere das Verhalten der Schwinger im Fehlerfall.

Erzielte Ergebnisse:

Die folgende Abbildung zeigt den äußeren Schwinger 1 für unterschiedliche Leistungsstufen. zeitlicher Verlauf von Strom und Spannung (am Beispiel Schwinger 1). Hierin ist erkennbar, dass der Schwinger keine gleichmäßige, periodische Schwingung erzeugt, sondern schwankende Spannung-Strom-Verläufe aufweist.

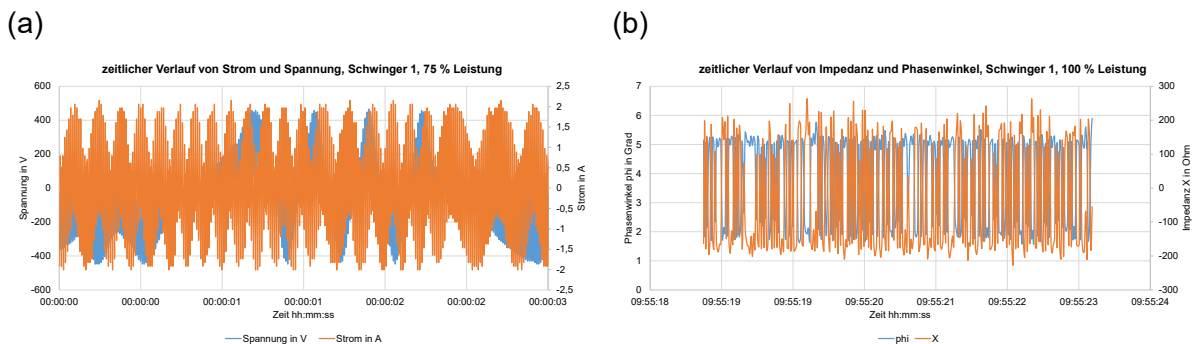


Abbildung 42: (a) Strom und Spannungsverlauf und (b) Impedanz und Phasenwinkel von Schwinger 1, beispielhafter Zusammenbruch während der Messung

Die Messung zeigt, dass eine Überwachung der Ultraschallschwinger durch Inlinemessung des komplexen Spannung-Strom-Verlaufes sinnvoll ist. Hierdurch können Fehlerzustände auch während der Reinigung ermittelt und später rückverfolgt werden. Die Auswirkungen auf das Schallfeld konnten beispielsweise bei den Schallfeldmessungen gezeigt werden (z. B. Abbildung 38).

Zusammenfassung der erreichten Ergebnisse im Projekt:

Die Abbildung 43 illustriert die Projektergebnisse zusammenfassend. Insgesamt konnte im Projekt ein Forschungsdemonstrator eines Multisensorsystems für die Ultraschallreinigung entwickelt und mit Hilfe von Ersatzversuchen verifiziert werden. Wie bereits beschrieben, führten Probleme bei der Projektbearbeitung und technische Probleme dazu, dass die

geplanten, umfangreichen Reinigungsversuche nur in Teilen durchgeführt werden konnten und einige der erzeugten Messergebnisse nicht oder nur teilweise verwertbar waren. Das Projektziel konnte dennoch erreicht werden, indem an verschiedenen Stellen über den Projektantrag hinausgehende Arbeiten und Entwicklungen zur Sicherstellung eines erfolgreichen Projektergebnisses in Form eines Multisensorsystems durchgeführt wurden.

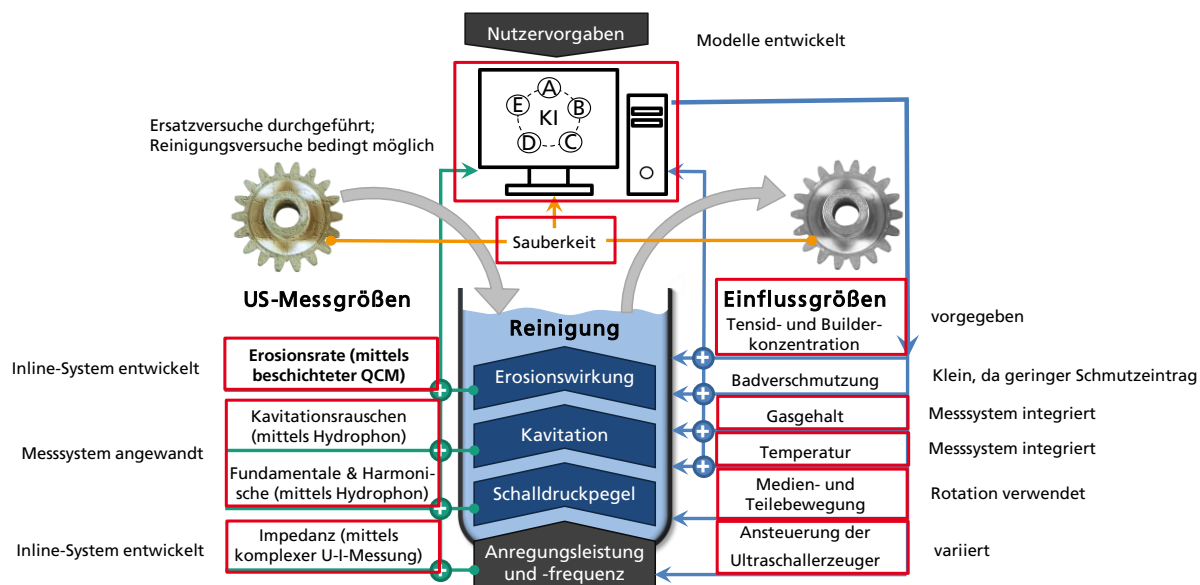


Abbildung 43: erreichte Ziele im Projekt

5 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielstellungen des Antrages und Angaben zur Mittelverwendung

Arbeitspaketziele	erreichte Ergebnisse
AP 1: Auswahl und Anpassung geeigneter Sensorelemente	Die Sensorelemente wurden ausgewählt. Konstruktive Lösungen für die Aufnahme und Integration als Multisensor wurden erprobt und die Vorzugsvariante wurde gefertigt. Zusätzlich wurde der Erosionssensor umfangreich überarbeitet und spanend aus Metall gefertigt. Entgegen der Beschreibung im Antrag waren umfangreiche Arbeiten bei der Erarbeitung der Verschmutzungsmethodik der Quarze erforderlich.
AP 2: Erarbeiten einer konstruktiven Lösung zur Anlagenintegration	Ziele und Anforderungen wurden nach dem Münchner Vorgehensmodell festgelegt. Es wurde eine Lösung für das Multisensorsystem entwickelt. Über den Antrag hinausgehend wurden zur Anlagenintegration in Form

	<p>von 3D-Positioniertischen entwickelt und erprobt. Das automatische 3D-Raumportal, welches an FE 2 eingesetzt wurde, erfüllt die Anforderungen an das KaviMeter-Messsystem entsprechend der Herstellervorgabe. Es wurde außerdem in diesem Zuge eine modulare Halterung für das KaviMeter (und weitere Sensorik) entworfen, sowie ein Krümmer zum Einsatz des Oxymeters (Sauerstoffsensors), um die erforderliche Anströmgeschwindigkeit zu erreichen. Die Halterungen wurden mit modernen Fertigungsverfahren wie Kunststoff-3D-Druck gefertigt.</p>
<p>AP 3: Aufbau und Inbetriebnahme des Forschungsdemonstrators eines Multisensor-Systems</p>	<p>Die Messtechnik zur Signalerfassung, -verarbeitung und -auswertung der Sensorelemente wurde angepasst. Zusätzlich wurde ein zentrales Datenerfassungssystem – ebenfalls als Erweiterung zum Antrag – realisiert. Es wurden Mess- und Kalibrierverfahren für die Einzelsensoren – sofern erforderlich – entwickelt. Messfehler und Einflussgrößen insbesondere für den Erosionssensor wurden im Rahmen der Entwicklung (AP 1) ermittelt. Der Funktionsnachweis für den Erosionssensor konnte erbracht werden. Der Einsatz des KaviMeters wurde erfolgreich durchgeführt. Der Portalroboter kann den Badzustand vermessen. Eine reinigungsparallele Messung erscheint nur bedingt zielführend, da nur eine Einzelstelle vermessen werden kann, wird jedoch zur Leistungsüberwachung eingesetzt. Der aktuell eingesetzte Sauerstoffsensor wurde an beiden FE integriert, ist aber an FE 2 als Standalone-System aktuell nur bedingt in die automatische Datenerfassung integrierbar. Die Datenübertragung erfolgt hier manuell. Die Erprobung des Gesamtsystems erfolgt im Rahmen des AP 5.</p>

Meilenstein 1: Forschungsdemonstrator des Multisensor-Systems fertiggestellt: wurde erreicht	
AP 4: Entwicklung einer Systemlösung zur intelligenten Messdatenverarbeitung	Die Datenverarbeitungsalgorithmen wurden ausgewählt sowie eine automatisierte Einleseroutine programmiert. Ein erster Ansatz einer Bayes-Klassifikation ist erfolgt. Die finale Umsetzung der KI mit umfangreichem Training war aufgrund der nur eingeschränkt verfügbaren Daten nicht wie geplant durchführbar.
Meilenstein 2: Modulare Softwarelösung zur intelligenten Messdatenverarbeitung und Integration der bestehenden Wissensbasis zur Ultraschallreinigung vorhanden: wurde teilweise erreicht	
AP 5: Exemplarische Eignungsanalysen im Anlageneinsatz	Es wurden vielfältige Versuche zur Bestimmung der Ultraschallparameter in einem Ultraschallbad und in einer industriellen Reinigungsanlage durchgeführt. Aufgrund coronabedingter Probleme und technischer Schwierigkeiten beim Betrieb der Anlagen konnten die Versuche zur Bestimmung des Einflusses auf die Reinigung nicht in vollen Umfang durchgeführt werden. Es konnte ermittelt werden, dass die Rotation der Probenkörbe bereits bei recht geringen Rotationsgeschwindigkeiten von 2 Umdrehungen pro Minute signifikanten Einfluss auf das Kavitationsrauschen im Bad hat. Erste Parallelmessungen von Erosionssensor und KaviMeter legen den Schluss nahe, dass beide Messgeräte miteinander zusammenhängende Effekte beschreiben. Eine statistische Absicherung konnte noch nicht erfolgen. Es wurden außerdem mehrere Aluminiumfolientests durchgeführt und diese mit den Ultraschall-Parametern verglichen. Die entwickelte Impedanzmessung wurde insbesondere dafür verwendet, Fehler bei der Leistungsabgabe der Schwinger zu erkennen. Auch der Einsatz des KaviMeters wäre hierfür eine (teurere) Alternative.

AP 6: Dokumentation und Berichterstattung	Die Ergebnisse des Berichtes wurden dokumentiert und in einem Bericht zusammengefasst. Im Rahmen diverser Veranstaltungen wie Projekttreffen oder bilateraler Absprachen und Artikel in Zeitschriften wurden das Projektvorhaben und Ergebnisse angemessen entsprechend des Rahmens der jeweiligen Veröffentlichung kommuniziert.
---	---

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises:

Im Berichtszeitraum (01.04.2019 - 31.12.2021) wurden im Forschungsvorhaben (20669BG) folgende **wissenschaftlich-technische Mitarbeiter** eingesetzt:

Fraunhofer IVV

A.1	Gem. Einzelfinanzierungsplan	Bisher abgerechnet	2021	kumuliert
HPA A	23,5	20,36	1,66	22,02
HPA C/D	8	6,28	1,31	7,59

Fraunhofer IGCV

A.1	Gem. Einzelfinanzierungsplan	Bisher abgerechnet	2021	kumuliert
HPA A	25,5	12,7	9,9	22,6
HPA C/D	0	0	0	0

Das Forschungsvorhaben wurde von wissenschaftlichen Mitarbeitern bearbeitet, die in EG 13 eingruppiert sind. Für dieses Projekt wurden seitens der Forschungseinrichtung im Berichtszeitraum keine **Geräte** aus Projektmitteln angeschafft. Es wurden ebenso im Projektzeitraum keine **Leistungen Dritter** aus den Projektmitteln in Anspruch genommen. Jedoch wurden seitens Fraunhofer mittels Grundfinanzierung zusätzliche Gerätschaften gekauft, die im Projekt eingesetzt wurden (z. B. 3D-Raumportal, Oxymeter, Pocket-VNA, etc.), sowie diverse Reparaturen an der Anlagentechnik vorgenommen. Die geleistete Arbeit entspricht unter Berücksichtigung notwendiger, nicht beeinflussbarer Abweichungen dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen. Die Fördermittel und das Personal wurden zielorientiert und den Aufgaben angemessen eingesetzt.

6 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse des Forschungsvorhabens für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)

Die Perspektiven für die Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse im wirtschaftlichen Kontext fallen für die verschiedenen Wertschöpfungsbereiche in der industriellen Reinigungstechnik unterschiedlich aus, weshalb diese im Folgenden bezogen auf die jeweilige Anwendersicht erläutert werden.

Hersteller von Ultraschallreinigungsanlagen

Durch ein effizientes, systematisches Vorgehen bei der Anlagenkonzipierung und -auslegung kann ein Innovationsvorsprung vor den Wettbewerbern, insbesondere gegenüber ausländischen Unternehmen, erreicht werden. Konstrukteure verfügen mit dem Multisensor-System erstmals über ein Werkzeug zum Erfassen von Echtzeit-Daten zu den Messgrößen der bisher weitgehend als Blackbox behandelten Ultraschallwirkungskette. Der Einsatz in Versuchsanlagen lässt eine erhebliche Zeitersparnis bei Versuchsreihen (im Vergleich zu Reinigungsuntersuchungen mit Testteilen) sowie neue Erkenntnisse zu den Wirkzusammenhängen in der Ultraschallreinigung als wichtigen Innovationsbeitrag zur bestehenden Wissensbasis erwarten. Nach der Durchführung weiterer Untersuchungen können die Auswirkungen unterschiedlicher Anordnungen von Schwingern, Teilen oder Körben auf die Ultraschallwirkung erstmals direkt in Echtzeit beobachtet und optimiert werden, soweit die Sensorik die Echtzeitbeobachtung zulässt. Bei einigen Sensoren hat sich gezeigt, dass ein Einsatz im Ultraschallbecken im laufenden Betrieb technisch nur bedingt umsetzbar oder nicht sinnvoll ist. Zu den Erkenntnissen hinsichtlich sinnvollen Einsatzes der Messtechnik sind bei den Forschungsstellen entsprechende Beratungsangebote vorgesehen und es wird mit einer zeitnahen industriellen Anwendung der Ergebnisse innerhalb der ersten Jahre nach Projektende gerechnet.

Getrieben durch die Transformation zur Industrie 4.0 stehen viele Unternehmen vor wichtigen Strategieentscheidungen zur zukünftigen Positionierung in diesem Spannungsfeld. Zur Objektivierung der Entscheidungsprozesse können Demonstratoren und Lernfabriken wertvolle Hilfsmittel sein, um neue Technologien, Prozesse und Verfahren im praxisnahen Kontext zu evaluieren. Durch die gezielte Ausrichtung auf den Anlageneinsatz ist ein Demonstrator in Form eines Multisensorsystems speziell für die Ultraschallreinigung verfügbar. Sinnvolles Einsatzgebiet ist Ermittlung der Parameterverteilung im Ultraschallbad. Ferner ermöglicht er nach Abschluss des Trainings des Bayes-Klassifikations-Algorithmus Analysen sowohl zum Einsatz multisensorbasierter Messsysteme als auch zu unkonventionellen Datenverarbeitungs- und Regelungskonzepten. Mittelfristig entsteht neben

der technischen Prinziplösung eine Wissensbasis zu verschiedenen Nutzungsszenarien als Ausgangspunkt zukünftiger Produktinnovationen im Anlagenbau.

Anlagenbetreiber

Die im Rahmen des Vorhabens mit dem Multisensor-System und weiteren Sensoren ausgerüsteten Reinigungsanlagen stehen nach Projektende als Versuchsplattformen zur Verfügung. Allerdings müssen vor einer weiteren, intensiven Nutzung der Reinigungsanlagen die aufgetretenen technischen Probleme durch die jeweiligen Anlagen- oder Anlagenkomponentenhersteller behoben werden. Die beiden FEs sind hierzu bereits in engem Kontakt mit den betreffenden Firmen. In Kombination mit der bei FE 1 und FE 2 vorhandenen Expertise zu deren Nutzung bieten sie Anlagenbetreibern erstmals die Möglichkeit, Auswirkungen von Prozesseingriffen auf die Ultraschallwirkungskette im Anlagenmaßstab unter kontrollierten Bedingungen detailliert zu untersuchen und im Erfolgsfall auf die eigenen Produktionsprozesse zu übertragen. Beispiele hierfür sind die Analyse von Fehlerursachen und das Optimieren der Positionierung und Bewegung von Teilen im Bad. Im Vorhaben konnte das System schon bei der Bestimmung von Fehlerzuständen beim Betrieb der Anlagen eingesetzt werden.

Es ist in Zukunft zu erwarten, dass die einzelnen Messgrößen applikationsspezifisch unterschiedliche Informationsbeiträge zur Bewertung der Reinigungswirkung liefern. Die jeweiligen Beiträge der Komponenten konnten im Projekt noch nicht abschließend geklärt werden. Nach der Aufnahme neuer Mess- und Trainingsdaten nach der Reparatur der Versuchsanlagen ist hierzu eine konkrete Aussage zu erwarten. Als wesentlicher Beitrag hat sich in den Versuchen jedoch gezeigt, dass auf jeden Fall ein System zur Kavitationsmesstechnik oder Erosionsmessung eingesetzt werden muss. Ob der neu entwickelte Erosionssensor oder die Kavitationsmesstechnik jeweils alleine ausreichen, wird weiterhin untersucht. Hieraus resultiert die Chance, auf Basis der Projektergebnisse in Kombination mit weiteren Untersuchungen mittelfristig zugeschnittene – und dadurch kostengünstige – Messtechnikprodukte für die Ultraschallreinigung zu entwickeln (siehe unten). Einsatzszenarien hierfür sind, neben der Prozessüberwachung und Prozessoptimierung, ein beschleunigtes Einfahren neuer Prozesse sowie die Integration in zukünftige intelligente Steuerungs- und Regelungskonzepte.

Messtechnikhersteller

Die Ergebnisse der Eignungsanalyse für den Anlageneinsatz sowie die im Anschluss an das Projekt vorgesehenen Aktivitäten zum Erproben des Demonstrators anhand praktischer Problemstellungen der Anlagenbauer und -betreiber liefern Erkenntnisse zum Präzisieren der Anforderungen an entsprechende Prozessmesstechnik sowie zu deren Einsatzpotenzial. Diese bieten Messtechnikherstellern eine Entscheidungsgrundlage zur Produktentwicklung

eines Multisensor-Systems für die Ultraschallwirkungskette. Da im Forschungsdemonstrator angepasste Sensoren unterschiedlicher Hersteller sowie das bislang nur als Laborlösung verfügbare Prinzip des Erosionssensors kombiniert (siehe AP 1) und die Ergebnisse publiziert wurden bzw. werden, bleibt hierbei die Vorwettbewerblichkeit gewahrt. Die für das Multisensor-System notwendigen Sensorelemente sind als OEM-Komponenten bei am projektbegleitenden Ausschuss beteiligten Firmen und externen Lieferanten verfügbar, sodass keine lizenz-rechtlichen Einschränkungen für den Transfer der Projektergebnisse zu erwarten sind.

Die komplexen Projektinhalte aus den Bereichen Anlagen- und Messtechnik bieten vor dem Hintergrund der gemeinsamen Herausforderungen durch die Transformation zur Industrie 4.0 eine ideale thematische Grundlage für die Vernetzung von Maschinenbauern und Messtechnikherstellern. Die in der Projektlaufzeit gebildeten Kooperationen und Netzwerke sollen weiterhin unterstützt und ausgebaut werden und dadurch gemeinsame Folgeaktivitäten in Richtung der Systemintegration intelligenter Anlagen- und Messtechnik für ein neues Niveau der Ultraschallreinigung katalysiert werden.

Zukünftige Forschung und Entwicklung für KMU

Die im Projekt erreichten Ergebnisse und berücksichtigten Parameterräume umfassen nur exemplarische Auszüge, bilden jedoch nicht die vielfältigen Parameter, Einflüsse und Wirkmechanismen in der industriellen Ultraschallreinigungsanwendung ab. Darüber hinaus stellen moderne Fertigungsverfahren wie zum Beispiel additive Fertigung die Reinigung vor neue Herausforderungen, die eine umfassende wissenschaftliche Durchdringung des Parameterraumes erforderlich machen. Die Nutzbarmachung der dabei gewonnenen Erkenntnisse wird zukünftig einen signifikanten Beitrag zur Ressourceneffizienz und prozesssicheren Reinigung leisten.

Basierend auf dem Projektergebnis sollten perspektivisch cloudbasierte Lösungen zur Auslegung und Parametrierung der Ultraschallreinigung unter Nutzung der im Rahmen des Projektes erreichten Ergebnisse entwickelt werden. Damit wird eine umfassende Datenbasis zur Ermittlung von Ursache-Wirkzusammenhängen in unterschiedlichsten Parameterkombinationen möglich. Insbesondere ergibt sich auf Basis der erreichten Ergebnisse weiterer Forschungsbedarf:

- Variation der Parameter bei der Ultraschallreinigung
 - Fluid: Dichtevariation, Temperatur, Viskosität, Verschmutzungsgrad/Partikellast, Tensidgehalt, Gasgehalt
 - Reinigungsobjekt: Material, Geometrie, Oberflächenspezifikation
 - Schmutz: filmische und partikuläre Verunreinigungen

- Zielkonflikt Sauberkeit gegenüber Bauteilintegrität: Vermeidung von Schäden am Bauteil durch geeignete Parametrierung
- Weiterentwicklung des bestehenden Multisensorsystems zur Überwachung der Ultraschallreinigung, z. B. durch Qualifizierung des Erosionssensors für filmische Verunreinigungen
- Herleitung der komplexen Zusammenhänge über analytische Methoden in Kombination mit KI-Modellen durch Einsatz von
 - Explainable KI-Modellen
 - Feature-Importance-Analysen zu Zwecken des Reverse Engineerings der Blackbox-KI-Modelle

Aus dem Projekt heraus und im Hinblick auf die vorher angesprochenen Herausforderungen bei der Reinigung von additiv gefertigten Teilen wurde bei FE 2 (IGCV) ein erstes Projekt initiiert, das diesen Aspekt behandeln wird. Das Projekt Cryosam wird voraussichtlich ab Juli 2022 vom STMWI gefördert und findet zusammen mit einem der Mitglieder des PbA statt.

7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Im Folgenden ist tabellarisch der Plan zum Ergebnistransfer aufgeführt. Darin enthalten sind bereits durchgeführte sowie geplante Transfermaßnahmen. Die generelle Umsetzbarkeit dieser Maßnahmen wird als gut eingeschätzt. Einige der Maßnahmen wurden coronabedingt abgesagt.

Tabelle 5: Liste der durchgeführten Maßnahmen

Maßnahme	Anzahl	Ziel	Datum/Zeitraum
Sitzungen projektbegleitender Ausschuss	5	Fortlaufende Präsentation und Diskussion der Forschungsergebnisse sowie Sicherstellung eines praxisrelevanten Projektverlaufes	13.06.2019 03.03.2020 07.10.2020 20.04.2021 14.12.2021
Bilaterale Diskussionsrunden bei PbA-Partnern	6	Kennenlernen der individuellen Aufgabenstellungen vor Ort und Identifikation von dort anwendbaren Projektzielen in eintägigen Besuchen oder Meetings	2019 bis 2020

Fachvortrag auf der 28. Fachtagung industrielle Bauteilreinigung, Ulm	1	Präsentation der Vorhabensinhalte zur Gewinnung weiterer Verwertungsinteressenten	04.04.2019
Fachvortrag auf der Parts2Clean 2019, Stuttgart	1	Präsentation der Vorhabensinhalte zur Gewinnung weiterer Verwertungsinteressenten	23.10.2019
Diskussion mit PbA-Partnern im Rahmen des Besuchs der Parts2Clean	2	Diskussion aktueller Entwicklungen und Neuerungen sowie veränderter Anforderungen, die in das Projekt einfließen können	2019, 2021
Veröffentlichung im JOT Special Industrielle Teilereinigung 2020	1	Präsentation des Projektfortschritts und Bekanntmachung in der Öffentlichkeit	11/2020
Beitrag in der Fachzeitschrift ZVO Report 03/21	1	Präsentation des Projektfortschritts und Bekanntmachung in der Öffentlichkeit	05/2021
Präsentation bei DGO Fachausschuss Forschung	1	Bekanntmachung Projektziele, Inhalte, erreichtes Ergebnis	09.03.2021

Tabelle 6: Liste der Maßnahmen nach Projektende

Maßnahme	Anzahl	Ziel	Datum/Zeitraum
Veröffentlichung des Schlussberichtes auf der Internetseite der DGO	1	Bekanntmachung Projektziele, Inhalte, erreichtes Ergebnis	06/2022
Veröffentlichung von Artikel in Fachzeitschrift Werkstoffe	1	Präsentation des Projektfortschritts und Bekanntmachung in der Öffentlichkeit	09/2022

Veröffentlichung in wissenschaftlichen Zeitschriften	1	Wissenschaftliche Publikation: Bekanntmachung Projektziele, Inhalte, erreichtes Ergebnis, Gewinnung weiterer Verwertungsinteressenten: z. B. Chemie Ingenieur Technik; Journal für Oberflächentechnik; Ultrasonics Sonochemistry; Magazin für Oberflächentechnik	2022/2023
Vorlesung und Praktikum „Reinigungstechnik“ der TU Dresden	1	Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre	Ab Wintersemester 2022
Blockpraktikum Ressourceneffizienz in der Produktion der HS Augsburg	1	Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre	Ab Wintersemester 2022

 Projektleiter IVV

 Projektleiter IGCV

8 Literaturverzeichnis

- [1] Verband der Automobilindustrie e.V., „VDA 19.1 Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Prüfung der Technischen Sauberkeit“. 2010.
- [2] M. Flämmich, A. Lohse, A. Schaab, A. Schäfer, W. Schmitt, und C. Worsch, „FiT Richtlinie: Filmische Verunreinigungen Beherrschen“. ZVO Service GmbH, 31. Juli 2018.
- [3] Springer Fachmedien Wiesbaden, „Ultraschallanwendungen in der Bauteilreinigung: Workshop“, *JOT Journal für Oberflächentechnik*, Bd. 55, Nr. 13 Zusatz, S. 13, März 2015, doi: 10.1007/s35144-015-0507-z.
- [4] I. Kahlen, „Untersuchung des Reinigungseffektes von Ultraschall auf Oberflächen von Chirurgie-Instrumenten und dessen prototypische Umsetzung in ein Dekontaminationsverfahren“, Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2012.
- [5] M. Schöler, „Analyse von Reinigungsvorgängen an komplexen Geometrien im immersierten System“, Technische Universität Dresden, 2011.
- [6] B. Niemczewski, „Influence of concentration of substances used in ultrasonic cleaning in alkaline solutions on cavitation intensity“, *Ultrason Sonochem.*, Bd. 16, Nr. 3, S. 402–407, 2009, doi: 10.1016/j.ultsonch.2008.09.002.
- [7] N. Bretz, J. Strobel, M. Kaltenbacher, und R. Lerch, „Numerische Simulation der Schallausbreitung und Kavitation in der Ultraschallreinigung“, *FORTSCHRITTE DER AKUSTIK*, Bd. 32, Nr. 2, S. 631, 2006.
- [8] A. Boye, H. Köhler, R. Murcek, E. Fuchs, M. Mauermann, und J.-P. Majschak, „Spatially resolved determination of soil layer thickness on surfaces of 3D parts by measuring the fluorescence intensity“, *Journal of Hygienic Engineering and Design*, Bd. 3, S. 3–8, 2013.
- [9] M. Mauermann, „Methode zur Analyse von Reinigungsprozessen in nicht immersierten Systemen der Lebensmittelindustrie“, Technische Universität Dresden, Dresden, 2012.
- [10] M. Mauermann, U. Eschenhagen, T. Bley, und J.-P. Majschak, „Monitoring the progress of cleaning using optical detection methods“, 2010.
- [11] C. Koch, *Untersuchung, Messung sowie Optimierung des Schallfeldes und seiner Wirkungen in Reinigungsbädern und Sonochemiereaktoren: Schlussbericht; (Bewilligungszeitraum: 01.09.2007 - 30.11.2010)*. Bundesanstalt Physikalisch-Technische, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=6LJazgEACAAJ>
- [12] M. Jueschke, C. Koch, und T. Dreyer, „An erosion sensor based on a quartz crystal microbalance for quantitative determination of the cleaning efficiency in an ultrasonic vessel“, *Ultrasonics sonochemistry*, Bd. 21, Nr. 5, S. 1900–1906, 2014.
- [13] T. Distler, „Badüberwachung mit SCUID zur besseren Prozessbeherrschung“, gehalten auf der Fachtagung Industrielle Bauteilreinigung, Ulm, 2017.
- [14] T. Klaeger, „Datenaggregation in Verarbeitungsanlagen zur automatischen Auswertung mittels maschinellem Lernen“, gehalten auf der VVD 2018 Verarbeitungsanlagen und Verpackungstechnik, Dresden/ Radebeul, 16. März 2018.
- [15] A. Schult, L. Oehm, T. Klaeger, und S. Carsch, „Selbstlernende Bedienerassistenzsysteme in Verarbeitungsanlagen“, gehalten auf der VVD 2018 - Tagung Verarbeitungsanlagen und Verpackungstechnik, Dresden/ Radebeul, März 2018.
- [16] M. Jüschke, C. Koch, und T. Dreyer, „An erosion sensor based on a quartz crystal microbalance for quantitative determination of the cleaning efficiency in an ultrasonic vessel“. *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 21, pp.1900–1906, 2014.
- [17] G. Wildbrett, *Reinigung und Desinfektion in der Lebensmittelindustrie*, 2. Aufl. Behr's Verlag, 2006.
- [18] D. Holly, „Kavimetrie - Quantifizierung der Mechanik in Ultraschallbädern“, gehalten auf der Projektteamtreffel UltraRein, Webkonferenz, 7. Oktober 2020.