

Schlussbericht zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF98
zum InnoProfile-Transfer-Verbundprojekt

„Mikroakustischer Mischer für Laboranalysensysteme“



Teilprojekt 1: „Akustoelektronische Fluid-Mikroaktorik“

BMBF-Förderkennzeichen 03IPT610A

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden
(IFW Dresden)

Institut für Festkörperforschung

Helmholtzstr. 20

01069 Dresden

Autor: H. Schmidt

Dresden, Dezember 2016

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03IPT610A gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zuwendungsempfänger: Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung
Dresden (IFW Dresden)

Förderkennzeichen: 03IPT610A

Vorhabenbezeichnung: Mikroakustische Mischer für Laboranalysensysteme
Teilprojekt 1: Akustoelektronische Fluid-Mikroaktorik

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2013 – 30.06.2016

Berichtszeitraum: 01.07.2013 – 30.06.2016

Adresse: IFW Dresden
Helmholtzstr. 20
01069 Dresden

Kontakt: Dr. Hagen Schmidt
h.schmidt@ifw-dresden.de
(0351) 4659 – 278

I Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Aufgabe des Projekts war es, die im vorangegangenen InnoProfile-Projekt „Akustoelektronische Mikrofluidik“ erarbeiteten Funktionsprinzipien und konstruktive Lösungen aus dem Gebiet der Akustoelektronik, d.h. der akustischen Oberflächen- und Volumenwellen-Technik (SAW- und BAW-Technik; SAW: surface acoustic waves, BAW: bulk acoustic waves) für die Nutzung im Rahmen der Fluidaktorik in Laboranalysensystemen weiterzuentwickeln. Dabei sollte vor allem eine kostengünstige und applikationsangepasste Lösung konzipiert und umgesetzt werden.

Die vorgesehenen Ziele lauteten:

- die Grundlagen derjenigen Mechanismen, die für mikroakustische Manipulationen von Fluiden – Mischen/Homogenisieren, Erwärmen und Zerstäuben – mit Hilfe akustoelektronischer Bauelemente maßgeblich sind, aufzubereiten, so dass deren effizienter Einsatz in kommerziellen Anwendungen (beispielsweise Labor- und Analysegeräte) möglich ist,
- die Entwicklung von innovativen und kosteneffizienten Technologien zur applikationsangepassten flüssigkeitsdichten Verkapselung von akustoelektronischen Fluid-Mikroaktoren,
- applikationsangepasstes Systemdesign, Aufbau, Charakterisierung und umfassende Optimierung innovativ gekapselter akustoelektronischer Fluid-Mikroaktorik-Baugruppen für den Einsatz in unterschiedlichen Systemkonfigurationen von Labor- und Analysengeräten.

Dabei sollten am Ende des Projekts technisch umgesetzte Demonstratoren für die unterschiedlichen Aufgaben – Mischen, Erwärmen und Zerstäuben – bereitstehen, die nach dem Prinzip einer Technologieplattform durch die Geräteentwickler und -konstrukteure der beteiligten kleinen und mittelständischen Firmen eingesetzt werden können.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW Dresden) im Rahmen des Verbundprojektes „Mikroakustischer Mischer für Laboranalysensysteme“ als Teilprojekt durchgeführt. Dabei wurde auf die Kompetenzen der im vorangegangenen InnoProfile-Projekt gegründeten Nachwuchsforschungsgruppe „Akustoelektronische Mikrofluidik“ aufgebaut.

Neben personeller und fachlicher Unterstützung wurden durch das IFW Dresden auch zusätzliche Laborräume sowie Investitionsmittel zur Ergänzung der Geräteausstattung bereitgestellt.

Eine weitere Basis bildete die intensive Zusammenarbeit mit den am Vorhaben beteiligten kleinen und mittelständischen Firmen. Auf diese Weise konnten neben der zielgerichteten Entwicklung auch die Kompetenzen jedes Projektpartners effektiv genutzt werden.

I.3 Planung und Ablauf des Teilvorhabens

Für die Projektlaufzeit von 3 Jahren waren Arbeiten zu den folgenden Arbeitskomplexen geplant, die als notwendig für den Aufbau eines Demonstrators als technologische Plattform angesehen wurden:

- Untersuchung zu Mechanismen mikroakustischer Fluidaktorik,
- mikroakustische Fluiderwärmung,
- mikroakustisches Systemdesign inkl. Materialscreening,
- Verkapselungstechnologien für aktive mikroakustische Bauelemente,
- applikationsspezifisches Fluidaktorik-Systemdesign,
- Aufbau und Funktionsnachweis eines Demonstrator-Analysesystems.

Sie boten die Gewähr, die technische Umsetzung der zuvor untersuchten fluidaktorischen Effekte unter Verwendung geeigneter Materialien und Technologien systematisch und zielgerichtet zu verfolgen, so dass am Ende ein funktionierender Demonstrator für den Einsatz in einem Laboranalysensystem aufgebaut werden konnte.

Der konzipierte zeitliche Ablauf für die Bearbeitung der miteinander vernetzten Arbeitskomplexe innerhalb des Teilvorhabens ist in Abb. 1 dargestellt.

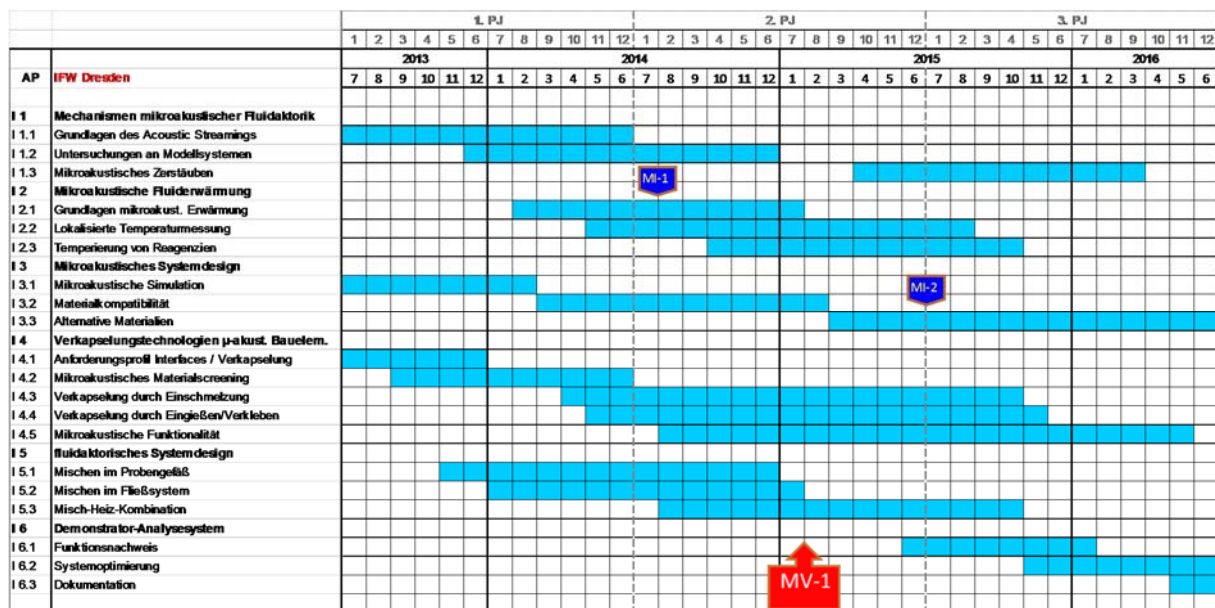


Abb. 1: Zeitplanung und Meilensteine für das Teilprojekt 1 „Akustoelektronische Fluid-Mikroaktorik“ des Projektteilnehmers IFW Dresden, MI-1 und MI-2 sind Meilensteine des IFW Dresden, MV-1 ist ein Verbundmeilenstein innerhalb des Gesamtprojekts

Das Teilvorhaben gliederte sich ein in das Gesamtvorhaben mit den insgesamt vier Teilprojekten der Projektpartner:

- Medizin- und Labortechnik Engineering GmbH Dresden (MLE Dresden)
- Sensortechnik Meinsberg (STM)
- Prolatec Prozess- und Labortechnik GmbH (Prolatec)

- Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW Dresden).

Auf die inhaltlichen Verbindungen speziell zwischen einzelnen Arbeitspaketen des IFW Dresden und den anderen drei Projektpartnern wird im Rahmen der eingehenden Darstellung (Abschnitt II) näher eingegangen.

Für die Projektplanung wurde von 3 Personalstellen für Wissenschaftler (3 Postdocs und 1 Doktorand) ausgegangen, die im Projektverlauf mit geringer Verzögerung besetzt werden konnten.

Der Strategieprozess bezüglich der InnoProfile-Transfer-Kriterien (Beitrag zur Herausbildung eines besonderen Forschungs- und Innovationsprofils in der Region, Nachhaltigkeit und voraussichtliche überregionale Wirksamkeit des Profils hinsichtlich Markt und spezieller Kompetenz, Strategie zur Personalqualifizierung und Nachwuchsgewinnung für die umliegenden Unternehmen) ist im Erfolgskontrollbericht des Projekts dargestellt.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden

Das Anwendungsspektrum herkömmlicher Bauelemente nach dem Prinzip der akustischen Oberflächenwellen (Surface Acoustic Waves, SAW) wird derzeit noch durch den Einsatz Hochfrequenzfilter in der draht-, funk- und fasergestützten Kommunikationstechnik dominiert. Darüber hinaus haben SAW-Bauelemente der zweiten Generation Eingang in den Markt gefunden. Dabei handelt es sich um Sensoren, vorwiegend für physikalischen Eigenschaften wie z.B. für Temperatur, Drehmoment und Druck. Die dritte Generation von SAW-Bauelementen ist auf eine fluidaktorische Funktion ausgerichtet. Für diesen Anwendungsfall sind deutlich andere Anforderungen, wie z.B. hohe Amplituden und sagittale Polarisierung der Wellen, entscheidend. Charakteristisch für den technischen Stand ist hier, dass Standard-SAW-Lösungen (d.h. Substrate, Schnitte und Ausbreitungsrichtungen, Layoutstrukturen) zum Aufbau von Fluidaktoren verwendet werden und dabei meist in direktem Kontakt mit dem Fluid stehen. An dieser Stelle zielt das vorliegende Projekt auf eine zusätzliche Verkapselung der Aktorik-Bauelemente hin. Diese Verkapselung dient dem Aufbau robuster Mischer für die Laboranwendung. Hierzu konnte auf das wissenschaftlich-technische Know-how zur akustoelektronischen Fluidaktorik zurückgegriffen werden, das im Rahmen des InnoProfile-Vorgängerprojektes gewonnen wurde.

Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Es wurden die üblichen Fachjournale sowie elektronischen Informationsquellen genutzt, wie z.B.: IEEE Xplore, ScienceDirect, Web of Knowledge / Web of Science, sowie die Patentdatenbanken des Deutschen, des Europäischen und des US-Patentamtes (DEPATISnet, Espacenet, USpto.gov) und freie Datenbanken (Free patents online).

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wissenschaftliche Institutionen der TU Dresden

Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik - Dr. Elke Boschke

Untersuchungen zur Ausrichtung von Hefezellen mittels SAW (acoustic tweezers)

Institut für Strömungsmechanik – Dr. Kerstin Eckert

Untersuchung an akustisch induzierten Fluidströmungen mittels Particle Image Velocimetry

Weitere wissenschaftliche Institutionen

Universität der Bundeswehr München, Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik – Dr. Christian Cierpka

Untersuchung an akustisch induzierten Fluidströmungen mittels Particle Image Velocimetry

Kooperierende Unternehmen

SAW Components Dresden GmbH

Leistungsbständigkeit von SAW-Bauelementen, innovative Materialsysteme

creavac Creative Vakuumbeschichtung GmbH

Hochentwickelte Dünnschichttechnologien und Abscheideprozesse

BelektroniG GmbH

Hochstabile Reglersysteme und intelligente Piezo-Ansteuersysteme

II Eingehende Darstellung

II.1 Zur Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung des vorgegebenen Ziels

*Arbeitspaket **Mechanismen mikroakustischer Fluidaktorik (AP I 1)***

Die aktorische Wirkung auf ein beschalltes Fluid (Acoustic Streaming) bildete die physikalische Grundlage für das vorliegende Prohekt. Das Arbeitspaket *Mechanismen mikroakustischer Fluidaktorik* unterteilte sich in *Grundlagen des Acoustic Streamings*, *Untersuchungen an Modellsystemen* und *Mikroakustisches Zerstäuben* (siehe Abb. 1). Die Untersuchungen hierzu wurden wie geplant durchgeführt und dabei die angestrebten Ergebnisse weitgehend erreicht.

Im Rahmen der Grundlagenuntersuchungen zum *Acoustic Streaming (AP I 1.1)* wurden die Wechselwirkungen zwischen akustischen Wellen und einem Fluid auf der Basis von theoretischen Betrachtungen, Simulationen und Experimenten betrachtet. Dazu wurden sowohl unterschiedliche Wellenarten (Oberflächenwellen, Grenzflächenwellen, Volumenwellen) und Polarisationsformen (horizontal, sagittal) als auch relevante Parameter wie z. B. akustische Wellenlänge, Frequenz und Fluideigenschaften (Dichte, Viskosität) untersucht. Im Fokus dieser Untersuchungen stand die Frage, mit welcher Kombination (akustische Welle, Fluideigenschaften) eine effiziente Strömungsanregung innerhalb eines Fluids erzielt werden kann. In Kooperation mit dem Unterauftragnehmer InnoXacs erfolgte sowohl die mathematische Modellbeschreibung wie auch die Simulation zur Energieübertragung zwischen akustischer Welle und Fluid (als Grundlage für das Acoustic Streaming). Auf dieser Basis konnten Aussagen hinsichtlich einer optimierten Auswahl von Wellenart und Wellenlänge in Bezug auf Eigenschaften und Volumen des Fluids abgeleitet werden. Zudem wurden die Grundlagen des Acoustic Streaming für weiterführende Untersuchungen (vereinfachte zweidimensionale FEM-Simulation) aufbereitet.

Die erreichten Erkenntnisse wurden in einem weiteren Schritt dazu genutzt werden, um *Untersuchungen an Modellsystemen und typischen Fluiden (AP I 1.2)* durchzuführen. Anhand von zwei typischen Einsatzszenarien (Eintauchmischer und „wanddurchkoppelnder“ Mischer) wurde die Mischwirkung sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht. Die theoretischen Untersuchungen zur Strömungsanregung in vorgegebenen Fluidvolumina (Gefäß, Schlauch bzw. Kanal) erfolgten mit Hilfe von FEM-Simulationen und den erarbeiteten Grundlagen aus AP I 1.1. Auf der Basis eines zweidimensionalen Interdigitalwandler-Modells auf einem piezoelektrischen Substrat wurde die Schallabstrahlung in die darüber liegende Flüssigkeit und die damit verbundene Strömungsanregung betrachtet. Die resultierenden Ergebnisse wurden zusätzlich mit Messergebnissen eines speziellen Strömungsmessverfahrens (Particle Image Velocimetry, Kooperation mit TU Dresden) verglichen und bewertet. Für die experimentellen Untersuchungen wurden in enger Abstimmung mit dem Projektpartner MLE mehrere funktionsangepasste Konstruktionen (Mischerstäbe zum Eintauchen in Probengefäße, Mischkanäle mit akustischer Ankopplung an der flüssigkeitsabgewandten Seite) für die Fluidaufnahme und die akustische Ankopplung entwickelt, umgesetzt und erprobt. Auf diese

Weise konnten wichtige Erfahrungen und Erkenntnisse für die Gestaltung und Umsetzung von mikroakustischen Mischanordnungen gewonnen werden.

Neben dem Mischen von/in Fluiden stellte das *Mikroakustische Zerstäuben (AP I 1.3)* einen weiteren Anwendungsfall im Rahmen der Fluidaktorik dar. Anders als beim Mischen kommt es beim Zerstäuben nicht zu einer Strömungsanregung, sondern zur Ablösung von Tropfen aus einem dünnen Fluidfilm. Hier wurde das Ablösungsverhalten der Tropfen untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass neben den akustischen Parametern wie SAW-Wellenlänge und –amplitude auch die Art und Weise der Fluidzuführen entscheidenden Einfluss auf die Aerosolzeugung hat.

Arbeitspaket **Mikrofluidische Erwärmung (AP I 2)**

Ein Begleiteffekt der aktorischen Wechselwirkung zwischen Ultraschallwelle und Fluid ist die Erwärmung des beschallten Fluids. Das Arbeitspaket *Mikrofluidische Erwärmung* unterteilte sich in *Grundlagen mikrofluidischer Erwärmung*, *lokalisierte Temperaturmessung* und *Temperierung von Reagenzien* (siehe Abb. 1). Die Untersuchungen hierzu wurden wie geplant durchgeführt und dabei die angestrebten Ergebnisse weitgehend erreicht.

Im Rahmen der *Grundlagen mikroakustischer Fluiderwärmung (AP I 2.1)* erfolgten theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einfluss akustischer (Wellenart, Wellenlänge, Leistung) und fluidischer (Dichte, Viskosität) Parameter auf die Erwärmung des Fluids. In Kooperation mit dem Unterauftragnehmer InnoXacs wurden Parameterkombinationen ausgewählt, die zum einen eine Fluiderwärmung möglichst ohne effektive Strömungserzeugung und zum anderen in Verbindung mit einer solchen ermöglichen. Dabei war die Eindringtiefe der mikroakustischen Wellen ein entscheidender Faktor, der von den zuvor erwähnten Parametern abhängt. Der direkte Vergleich zwischen Experimenten und Simulationen erlaubte zudem eine stetige Weiterentwicklung und Verbesserung der theoretischen Beschreibung mikroakustisch induzierter Fluiderwärmung. Außerdem konnten für die verschiedenen Anwendungsszenarien (Eintauchmischer und „wanddurchkoppelnder“ Mischer) in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner MLE wichtige Erkenntnisse hinsichtlich Machbarkeit und Umsetzung einer kombinierten Mischung und Erwärmung des Fluids gesammelt werden.

Zur Aufklärung grundlegender Effekte der mikroakustischen Fluiderwärmung war der Aspekt der Temperaturmessung von besonderer Bedeutung. Die *lokalisierte Temperaturmessung (AP I 2.2)* stellte aufgrund der begrenzten Abmessungen von Aktorbauelement und Fluidvolumen sowie der stark verkürzten Reaktionszeiten eine besondere Herausforderung dar. Eine Temperaturmessung über angrenzende Oberflächen wie z. B. Behälterwände schied daher aus, vielmehr mussten neue Messstrategien entwickelt werden. Für besonders kleine Fluidvolumina (z. B. Tropfen oder in Mikroküvetten) wurde eine Temperaturmessung direkt auf der Oberfläche des Aktorbauelements in Form von elektrischen Dünnschichtwiderständen realisiert (on-chip-Messung). Dies ermöglicht die Erfassung einer Temperaturänderung direkt im Gebiet der fluidaktorischen Wechselwirkung. Für größere Volumina (z. B. Mischkammern oder Gefäße) wurde hingegen eine Temperaturmessung im Fluid (on-location-Messung) in Form eines Miniatur-Thermoelements realisiert. Durch die sehr kompakte Bauform des Thermoelements ermöglicht dieser Ansatz zudem eine Messung der räumlichen Temperaturverteilung

im Fluid. Damit lassen sich Bereiche starker Erwärmung bzw. Wechselwirkung genauer lokalisieren. Beide Strategien der Temperaturmessung erlauben es, die Fluiderwärmung nahezu ohne zeitliche Verzögerung und direkt ‚vor Ort‘ experimentell zu verfolgen. Diese im Projekt erfolgreich umgesetzte Entwicklung ermöglichte erst die zielgerichteten Grundlagenuntersuchungen zur Fluiderwärmung (AP I 2.1).

Auf Grundlage der beiden vorherigen Arbeitspakete wurden im Anschluss Versuche zur *Temperierung von Reagenzien* (AP I 2.3) durchgeführt. Dabei sollte vor allem die Frage beantwortet werden, inwieweit die Fluiderwärmung chemische Reaktionen innerhalb ausgewählter Analysegemische beeinflusst und ob eine Entkopplung von mikroakustisch angeregter Strömung und Erwärmung möglich ist. Dazu erfolgten zunächst Experimente an Modellstoffsyste men und später an vom Projektpartner MLE vorgegebenen Fluidgemischen.

Im Ergebnis der Untersuchungen innerhalb dieses Arbeitspakets stand die Feststellung, dass die unabhängige Realisierung von Fluiderwärmung und Mischvorgang mittels eines einzelnen Aktorbau elements nach aktuellem Kenntnisstand als nicht effektiv genug eingeschätzt wird (Entscheid zu Meilenstein MI-1). Um bei Bedarf beide Funktionalitäten miteinander zu kombinieren, ist hingegen eine Lösung mit mehreren Aktorbau elementen sinnvoll. Auf diese Weise kann der einzelne Aktor für die jeweilige Aufgabe (Mischen oder Erwärmen) optimiert werden (entsprechend den Ergebnissen aus AP I 1 und I 2).

*Arbeitspaket **Mikroakustisches Systemdesign (Materialaspekt)** (AP I 3)*

Auf der Basis der zuvor erarbeiteten Grundlagen (AP I 1 und I 2) sollte nunmehr ein anwendungstaugliches mikroakustisches System entworfen und umgesetzt werden, das die jeweils geforderte Funktionalität (Mischen und/oder Erwärmen) realisiert. Dazu waren zunächst potenzielle Materialien bzw. Materialklassen hinsichtlich ihrer mikroakustischen Eignung zu untersuchen und auszuwählen. Dies betraf sowohl piezoelektrische Materialien für die Anregung von Schallwellen als auch Materialien für die Interdigitalwandler sowie deren Passivierung. Das Arbeitspaket *Mikroakustisches Systemdesign* unterteilte sich in *Mikroakustische Simulation*, *Materialkompatibilität* und *Alternative Materialien* (siehe Abb. 1). Die Untersuchungen hierzu wurden wie geplant durchgeführt und dabei die angestrebten Ergebnisse weitgehend erreicht.

Im Rahmen der *Mikroakustische Simulation* (AP I 3.1) erfolgte zunächst die Betrachtung unterschiedlicher piezoelektrischer Materialien, die zur Anregung unterschiedlicher mikroakustischer Wellenarten geeignet sind. Dazu wurden theoretische Betrachtungen und Simulationen (Wellenfeldsimulationen) zu unterschiedlichen Kristallmaterialien, Kristallschnitten und Wellenausbreitungsrichtungen in Kooperation mit dem Unterauftragnehmer InnoXacs angestellt. Außerdem wurde bereits zu diesem Zeitpunkt der Einfluss von zusätzlichen Passivierungsschichten (z. B. SiO₂) auf das elektroakustische Anregungsverhalten untersucht. Eine Passivierung ist zumeist unumgänglich, um die Dünnschichtelektroden der Interdigitalwandler effektiv vor mechanischer und chemischer Beanspruchung zu schützen. Mit Lithiumniobat

(LiNbO₃) wurde ein praxistaugliches Material gewählt, das eine effektive Anregung von Schallwellen erlaubt. Je nach Kristallschnitt und Ausbreitungsrichtung können mit diesem Piezomaterial sowohl Oberflächenwellen (SAW) als auch Volumenwellen (BAW) angeregt werden.

Wie bereits erwähnt, müssen die Aktorbaulemente für die praxistaugliche Anwendbarkeit zu meist mit einer zusätzlichen Passivierung ausgestattet werden. Zudem besteht bei einem direkten Fluidkontakt die Forderung nach einer *Materialkompatibilität* (AP I 3.2) in dem Sinn, dass keine wechselseitige Beeinflussung von Fluid und Aktorbaulement erfolgt. So kann es im Fall des eingesetzten Piezomaterials LiNbO₃ prinzipiell zum Übertrag von Lithium in das Fluid kommen. Zudem weist das Fluid eine korrosive Wirkung auf das Elektrodenmaterial der Interdigitalwandler auf. Für den Aufbau einer geeigneten Passivierung wurden umfangreiche Untersuchungen zu akustischer, thermischer und chemischer Belastbarkeit an verschiedenen Dünnschichtmaterialien und Materialkombinationen durchgeführt. Dazu waren ebenso Versuchsreihen zur Dünnschichtabscheidung notwendig. Im Ergebnis existiert ein neuartiger Ansatz zur Passivierung von Aktorbaulementen, in den neben der eigentlichen Passivierung zusätzliche Funktionalitäten wie z. B. eine elektrische Abschirmung der Interdigitalwandler integriert werden können. Diese Lösung erlaubt den Betrieb von elektroakustischen Fluidaktoren mit hohen Leistungen (bis zu 5 Watt) und ermöglicht somit eine effiziente Mischwirkung.

Neben den üblicherweise eingesetzten einkristallinen Piezomaterialien sollten *Alternative Materialien* (AP I 3.3) auf deren Anwendbarkeit hin untersucht werden. Hintergrund ist, dass die Verwendung der Einkristallmaterialien neben den reinen Materialkosten auch einen deutlichen Aufwand im Bereich Aufbau- und Verbindungstechnik verursacht, der bei der Verwendung von auf low-cost-Materialien (Glas, Silizium, Keramik) abgeschiedenen piezoelektrischen Dünnschichten verringert werden könnte. Allerdings erfüllten die Untersuchungen und Ergebnisse an alternativen Piezomaterialien diese Erwartungen bzw. die formulierten Anforderungen nicht, so dass derartige piezoelektrische Dünnschichten keine kurz- bzw. mittelfristige Alternative zum aktuell verwendeten Material LiNbO₃ beim marktrelevanten Einsatz in den vorgesehenen industriellen Mischanwendungen bilden. Die freigewordenen Projektressourcen wurden daraufhin zu Gunsten des Demonstrator-Analysensystems verschoben (Meilenstein MI-2).

Zur Halbzeit des Verbundvorhabens war parallel zu den Meilensteinen der einzelnen Teilprojekte ein Verbundmeilenstein MV-1 angesetzt, um die Ausrichtung und prinzipielle Weiterführbarkeit des Gesamtprojekts zu überprüfen. Am IFW Dresden wurden die dafür geforderten Arbeiten erfolgreich abgeschlossen. Auf Basis der bis zu diesem Zeitpunkt erzielten Ergebnisse aller Projektpartner wurde ein positiver Entscheid zum Verbundmeilenstein getroffen.

Arbeitspaket *Verkapselungstechnologien für aktive mikroakustische Bauelemente* (AP I 4)

Der praktische Einsatz von mikroakustischen Aktorbaulementen in Fluiden erfordert neben einer geeigneten Konstruktion zur Fluidaufnahme und zur akustischen Ankopplung des Aktorbaulements zusätzlich eine Verkapselung. Nur auf diesem Weg kann eine Beständigkeit

gegenüber erhöhter Belastung durch Leistungs- und Temperaturbeaufschlagung sowie gegenüber chemischem Angriff durch Analyseflüssigkeiten und mechanischer Belastung durch Handling und Reinigung gewährleistet werden. Außerdem muss insbesondere bei Kontakt mit Analysefluiden eine Kontamination der Analyten durch herausgelöste Bestandteile der Aktoren verhindert werden. Das Arbeitspaket *Verkapselungstechnologien für aktive mikroakustische Bauelemente* unterteilte sich in *Anforderungsprofile für Interfaces bzw. Verkapselungen*, *mikroakustisches Materialscreening*, *Verkapselung durch Einschmelzung (silikatisch)*, *Verkapselung durch Eingießen/Verkleben (organische Polymere)* und *Charakterisierung der mikroakustischen Funktionalität* (siehe Abb. 1). Die Untersuchungen hierzu zeigten, dass die zunächst geplante Verkapselungsstrategie und die damit einhergehende Durchführung der einzelnen Arbeitspakete nicht uneingeschränkt möglich waren. Aus diesem Grund wurden die durchzuführenden Arbeiten entsprechend den zwischenzeitlich erzielten Ergebnissen teilweise neu ausgerichtet. Auf diese Weise konnten die angestrebten Ergebnisse (Verkapselung der mikroakustischen Aktorbaulemente) dennoch weitgehend erreicht werden.

Ausgangspunkt war die Erstellung von *Anforderungsprofilen für Interfaces bzw. Verkapselungen* (AP I 4.1), die sich für die Verkapselung der Aktorbaulemente bzgl. mikroakustischer Sicht für fluidaktorische Anwendungen ergeben, um eine Startauswahl für mögliche Verkapselungsmaterialien und –fügetechnologien beim Projektpartner STM zu ermöglichen. Dazu wurden die relevanten Materialanforderungen hinsichtlich der Materialeigenschaften (z. B. Strukturhomogenität, akustische Dämpfung) und Technologiekompatibilität für verschiedene Verkapselungsprozesse in enger Abstimmung mit den Projektpartnern MLE und STM erarbeitet.

Auf der Basis dieser Anforderungen erfolgte ein intensives *mikroakustisches Materialscreening* (AP I 4.2), bei dem neben der Recherche von Materialien und Materialeigenschaften auch umfangreiche experimentelle Arbeiten durchgeführt wurden. Insbesondere akustische Parameter wie Schallgeschwindigkeit und Schalldämpfung waren für viele der betrachteten Materialien (im relevanten Frequenzbereich) zunächst nicht bekannt. Um diese Kennwerte zu ermitteln, erfolgten Messungen unter Verwendung akustischer Volumenwellen (BAW, Dämpfung und Schallgeschwindigkeit) und eines laserakustischen Messverfahrens (SAW, Schallgeschwindigkeit). Dazu waren die zu untersuchenden Materialien zunächst entsprechend aufzubereiten (Präparation). Neben verschiedenen Gläsern und Glasloten wurde eine Vielzahl von organischen Polymeren mit den genannten Methoden untersucht. Im Ergebnis stand eine Bewertung der Einsatzfähigkeit der untersuchten Verkapselungsmaterialien für die mikroakustische Anwendung.

Zunächst wurde die Möglichkeit der *Verkapselung durch Einschmelzen (silikatisch, AP I 4.3)* untersucht. Dazu wurden beim Projektpartner STM unterschiedliche Gläser und Glaslote vorausgewählt, die für eine Verkapselung der Aktorbaulemente in Frage kamen. Prinzipiell mussten sämtliche silikatischen Glasverbindungen zunächst bei vergleichsweise hohen Temperaturen (mehrere hundert bis über eintausend Grad) aufgeschmolzen werden, bevor diese im flüssigen Zustand in Form gebracht werden konnten und sich anschließend beim Erkalten verfestigten. Die hohen Temperaturen und die während der Abkühlphase auftretenden ther-

misch-mechanischen Spannungen zwischen Materialien mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten verhinderten eine erfolgreiche Verkapselung der mikroakustischen Aktorbaulemente. Entweder kam es während der Prozessierung zur Zerstörung der Bauelemente oder die Verkapselung entsprach nicht den mikroakustischen Anforderungen. Selbst Glaslote mit vergleichsweise geringem Schmelzpunkt lieferten keine zufriedenstellende Lösung. Die dafür notwendigen umfangreichen Untersuchungen beinhalteten mikroskopische Analysen (Lichtmikroskop und Rasterelektronenmikroskop) in Kombination mit Ionenmikroskopie. Die Arbeiten an diesem Teilarbeitspaket wurden daraufhin reduziert und die entsprechend frei gewordenen Ressourcen für die Entwicklung einer alternativen Glaseinhausung verwendet.

Ein weiterer Ansatz bestand in der *Verkapselung durch Eingießen/Verkleben (organische Polymere, AP I 4.4)*. Dabei wurden ausgewählte Polymere (Materialscreening in AP I 4.2) direkt auf die Aktorbaulemente aufgebracht. Es kamen Polymere zum Einsatz, die sich während des Materialscreenings (vgl. AP I 4.2) als mikroakustisch geeignet erwiesen haben. In Analogie zu den Untersuchungen in AP I 4.3 wurden mikroskopische Analysen an den mit verkapselten Aktorbaulementen durchgeführt. Dabei konnte generell eine vergleichsweise geringe Beständigkeit gegenüber Temperaturbeaufschlagung und diversen Chemikalien festgestellt werden. Vorzugsweise eignet sich eine polymerbasierte Verkapselung der Aktorbaulemente überall dort, wo keine hohen Anforderungen hinsichtlich der Beständigkeit bestehen. Zudem ist eine derartige Verkapselung vergleichsweise einfach zu realisieren und bietet somit die Möglichkeit, kostengünstige Mischer herzustellen.

Der ursprüngliche Ansatz einer silikatischen Verkapselung durch Einschmelzen konnte nicht erfolgreich umgesetzt werden. Um dem Anspruch einer hohen Beständigkeit gegenüber Temperatur und Chemikalien dennoch gerecht zu werden, wurden Konzepte für eine alternative Glasverkapselung entwickelt und erprobt. In Abstimmung mit dem Projektpartner MLE wurde dieser Ansatz auf zwei Einsatzszenarien angewendet – einen Eintauchmischer (Mischstab) sowie eine optische Messzelle mit mikroakustischer Mischfunktion. Aufbau und Einsatz beider Szenarien werden im AP I 5.1 näher betrachtet. Die neuartige Glasverkapselung wurde in enger Abstimmung und Zusammenarbeit mit dem Projektpartner STM entwickelt und umgesetzt. Nach einer grundlegenden Machbarkeitsanalyse erfolgte der Aufbau einer geeigneten Glaseinhausung durch den Projektpartner STM. Diese Glaseinhausung diente im Weiteren zur Aufnahme eines Aktorbaulements mit zugehöriger elektrischer und akustischer Kontaktierung. Entwicklung und Umsetzung der elektrischen und akustischen Kontaktierung erfolgten am IFW Dresden. Auf diese Weise konnte ein glasverkapselter Mischstab bereitgestellt werden. In enger Zusammenarbeit mit Projektpartner MLE erfolgten dazu parallel die Entwicklung und Umsetzung einer optischen Messzelle mit Ankopplung eines Aktorbaulements zu Realisierung der mikroakustischen Mischfunktion.

Arbeitspaket *applikationsspezifisches Fluidaktorik-Systemdesign (AP I 5)*

Die zuvor geschilderten Arbeiten bildeten die Grundlage für die Anwendung der Aktorbaulemente als mikroakustische Misch- und Heizeinheiten verschiedener Einsatzszenarien beim Projektpartner und finalen Gerätehersteller MLE. Im Rahmen dieses Arbeitspakets erfolgte

darauf aufbauend das *applikationsspezifisches Fluidaktorik-Systemdesign*. Die Arbeiten unterteilten sich in *Mischen im Probengefäß*, *Mischen im Fließsystem* und *Misch-Heiz-Kombination* (siehe Abb. 1). Die Untersuchungen hierzu zeigten, dass das zunächst geplante Mischen im Fließsystem aufgrund der erforderlichen hohen Strömungsgeschwindigkeiten im MLE-Fließsystem (FIA-System) nicht möglich war. Aus diesem Grund wurden die durchzuführenden Arbeiten auf die Einsatzszenarien Mischstab und optische Messzelle fokussiert. Auf diese Weise konnten die angestrebten Ergebnisse - applikationsspezifisches Fluidaktorik-Systemdesign - weitgehend erreicht werden.

Das mikroakustische Mischen auf der Basis der verkapselten Aktorbaulemente wurde im Teilarbeitspaket *Mischen im Probengefäß* (AP I 5.1) für zwei spezifische Anwendungen (Mischstab und optische Messzelle) umgesetzt. Neben dem Mischstab, d.h. als Eintauchmischer zur Anwendung in Verbindung mit dem MLE-Autosampler, bestand zudem der Wunsch nach einer optischen Messzelle, d.h. einer Analysenküvette, mit aktiver Mischfunktion. Für beide Anwendungsszenarien wurde der Ansatz eines glasverkapselten Aktorbaulements verfolgt (vgl. AP I 4), wobei die jeweiligen spezifischen Anforderungen unterschiedliche Konstruktionen notwendig machten. Die Analysenküvette ist eine vom Projektpartner MLE entwickelte optische Messzelle, in die Analyseflüssigkeiten eingebracht werden können. Die akustische Ankopplung des Aktorbaulements erfolgt über eine austauschbare Aktorikeinheit, die das Aktorbaulement von der Flüssigkeit räumlich trennt und gleichzeitig eine akustische Ankopplung ermöglicht. Die Innenseite der Küvette besteht aus chemisch inertem Material, so dass keine Verunreinigung der Analyseflüssigkeit auftritt. Die akustisch induzierte Mischwirkung innerhalb der Flüssigkeit konnte mit Versuchsreihen beim Projektpartner MLE experimentell bestätigt werden. Durch die aktorische Funktionalität der optischen Messzelle konnte die Reproduzierbarkeit der Analysen bei gleichzeitiger Verkürzung der zugehörigen Analysezeiten deutlich verbessert werden.

Parallel dazu erfolgte die Entwicklung eines in Glas eingehausten Mischstabs. Die zu mischende Flüssigkeit kommt dabei lediglich mit Glas in Kontakt. Somit ist eine sehr hohe chemische Beständigkeit gewährleistet. Auch für diesen Anwendungsfall konnte die prinzipielle Funktionsfähigkeit nachgewiesen werden. Aufgrund der komplexen Verkapselung war jedoch eine deutlich verminderte Mischwirkung festzustellen. Hier bedarf es weiterer Entwicklungsschritte, um die Mischwirkung zu erhöhen und somit die Vorteile der hohen chemischen Beständigkeit besser auszuschöpfen. Neben der Glasverkapselung wurde noch eine weitere Variante des Mischstabes umgesetzt. Auf Grundlage der polymerbasierten Verkapselung (vgl. AP I 4.4.) wurde eine Variante mit Edelstahlhausung realisiert, die chemische Beständigkeit und gute Mischwirkung mit hoher elektrischer Abschirmung gewährleistet. Darüber hinaus besitzt dieser Aufbau die Möglichkeit der Integration einer zusätzlichen Probenkanüle.

Die Systementwicklung wurde von theoretischen und experimentellen Untersuchungen zur akustisch induzierten Strömungsanregung im Fluid begleitet. Auf experimenteller Seite erfolgten unter anderem umfangreiche Messungen auf Basis der Particle Image Velocimetry (PIV), einem optischen Messverfahren zur Quantifizierung von Strömungsfeldern in Flüssigkeiten. Die theoretischen Betrachtungen lieferten Modelle, auf deren Basis Simulationen mittels Finite

Elemente Methode (FEM) zur Strömungsanregung sowie zum Einfluss wichtiger mikroakustischer Parameter (z. B. Wellenlänge, Verkapselung Aktorbauelement) erfolgten. In Verbindung mit den experimentellen Beobachtungen stellten diese Untersuchungen eine wichtige Grundlage für das Verständnis und die daraus resultierende Weiterentwicklung des fluidaktorischen Systemdesigns dar.

Neben dem Mischen im Probegefäß wurde das *Mischen im Fließsystem (AP I 5.2)* untersucht. Dieses Anwendungsszenario basiert auf dem Ansatz, die Mischung verschiedener Flüssigkeiten innerhalb von T- bzw. Y-Schlauchverbindern mittels eines integrierten Aktorikbauelements aktiv zu unterstützen. Auf diese Weise soll eine schnellere Durchmischung erreicht werden. Hierzu wurden mehrere Ausführungen von Durchflusszellen (schlauchbasierte Mischzellen) in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner MLE entworfen, aufgebaut und getestet. Während der Untersuchungen in diesem Arbeitspaket stellte sich heraus, dass die im FIA-Fließsystem von MLE, in dem die Entwicklung eingesetzt werden sollte, zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten erforderlich sind. Aufgrund der damit verbundenen kurzen Aufenthaltsdauer des Fluids innerhalb der akustischen Wirkungszone ist der Effekt der akustisch induzierten Strömungsanregung im Vergleich zur Strömung im Fließsystem zu gering, um eine für den praktischen Laboreinsatz relevante Mischwirkung zu erzielen. Die ursprünglich geplanten Untersuchungen wurden daher auf die Anwendung in Mikrokanälen erweitert. Bei diesen Anwendungen liegen deutlich geringere Fluidvolumina und Strömungsgeschwindigkeiten vor. Anhand von Experimenten (PIV) und Simulationen (FEM) konnte der Nachweis erbracht werden, dass eine gezielte Beeinflussung der Strömung im Mikrokanal möglich ist. Dies kann sowohl zum Mischen von Fluiden als auch zur Manipulation von Partikeln innerhalb eines Fluids in Lab-on-a-Chip-Systemen genutzt werden. Die im Rahmen der durchgeführten Arbeiten erzielten experimentellen Ergebnisse dienen darüber hinaus zur Validierung der ebenfalls weiterentwickelten theoretischen Grundlagen.

Die Realisierung einer *Misch-Heiz-Kombination (AP I 5.3)* für das Fließsystem konnte aufgrund der zu hohen Strömungsgeschwindigkeit im FIA-System (vgl. AP I 5.2) ebenfalls nicht erreicht werden. Die örtlich konzentrierte Einwirkung der akustischen Leistung auf das vorbeiströmende Fluid und die damit verbundene lokale Erwärmung wird durch die vergleichsweise deutlich größer Schlauchoberfläche sehr schnell kompensiert. Dadurch ist keine anhaltende Erwärmung möglich, wie sie für chemischen Reaktionen im FIA-System erforderlich ist. Für die Anwendungsszenarien Mischstab und optische Messzelle führt der akustische Leistungseintrag neben einer Strömungsanregung ebenfalls zu einer Erwärmung des Fluids. Je kleiner das Fluidvolumen ist, desto stärker erwärmt sich die Flüssigkeit. Für sehr kleine, abgeschlossene Volumina (<5 ml) kann je nach eingebrachter Energiemenge eine Erwärmung von bis zu 10 K hervorgerufen werden.

Arbeitspaket *Demonstrator-Analysesystem (AP I 6)*

Mit dem Aufbau eines Demonstrator-Analysesystems wurden sämtliche im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse aller Projektpartner (MLE, STM, Prolatec, IFW) zusammengeführt. In

Verbindung mit den Anforderungen von Endanwender MLE wurden die beiden Anwendungsszenarien Mischstab und optische Messzelle gewählt, um die Funktionsfähigkeit des mikroakustischen Mischens für Laboranalysensysteme zu demonstrieren. Das zugehörige Arbeitspaket *Demonstrator-Analysesystem* unterteilte sich in *Funktionsnachweis*, *Systemoptimierung* und *Dokumentation* (siehe Abb. 1). Die Arbeiten hierzu wurden wie geplant durchgeführt und dabei die angestrebten Ergebnisse weitgehend erreicht.

Anhand der beiden Anwendungsszenarien wurden zusammen mit dem Projektpartner MLE umfangreiche Untersuchungen zum Misch- und Heizverhalten durchgeführt und es konnte der *Funktionsnachweis* (AP I 6.1) erbracht werden. Die Trennung von Aktorbauelement und Flüssigkeit durch eine Verkapselung senkt die Effizienz der akustisch induzierten Strömungsanregung (Mischen). Diesem Umstand konnte jedoch durch verschiedene Maßnahmen, wie z.B. Verbesserung der akustischen sowie der elektrischen Anpassung, Erhöhung der eingebrachten Leistung etc. entgegen gewirkt werden. In dieser finalen Projektphase konnte zudem die elektrische Ansteuerung mit einem Elektronikmodul nachgewiesen werden, das vom Projektpartner Prolatec bereitgestellt wurde. Während der Entwicklung dieses Ansteuermoduls erfolgte ein intensiver Austausch zwischen den Projektpartnern Prolatec und IFW, um die Umsetzung der anspruchsvollen Ansteuerung von mikroakustischen Aktorbauelementen möglichst einfach und damit kostengünstig realisieren zu können.

Anhand von typischen Anwendungsfällen bei der standardisierten Probeaufbereitung in Laboranalysensystemen von MLE erfolgten Untersuchungen zum praktischen Einsatz der mikroakustischen Mischer sowie eine *Optimierung des gesamten Systems* (AP I 6.2). Im Fall des Mischstabs konnte dabei neben der Glaseinhausung eine Polymerverkapselung (vgl. AP I 4.4) erfolgreich erprobt werden. Diese Form der Verkapselung ist kostengünstiger umzusetzen. Für Anwendungen mit geringeren Anforderungen an die chemische Beständigkeit ist dieser Lösungsansatz praktikabel und interessant. Außerdem konnte während der praktischen Erprobung festgestellt werden, dass eine elektrische Abschirmung des Aktorbauelements notwendig ist, um wechselnde elektrische Randbedingungen (z. B. durch unterschiedliche elektrische Leitfähigkeit der zu mischenden Fluide) zu kompensieren. Dazu wurde am IFW eine multiple Dünnschichtpassivierung der Aktorbauelemente entwickelt und erfolgreich erprobt, die neben der elektrischen Abschirmung ebenfalls eine höhere Lebensdauer gewährleistet. In Verbindung mit einer Einhausung aus Edelstahl und der Polymerverkapselung erlaubt dies den Aufbau einer in Bezug auf die Glaseinhausung technologisch vergleichsweise einfachen Variante des Mischstabs.

Für die Anwendung von Mischstab und optischer Mischzelle ergaben die vorangegangenen Untersuchungen, dass größere akustische Wellenlängen ($>100\text{ }\mu\text{m}$) eine vergleichsweise bessere Durchmischung bewirken. Dementsprechend wurden die Aktorbauelemente optimiert und das Chiplayout angepasst. Außerdem konnte auf diese Weise der Frequenzbereich für die elektrische Ansteuerung entsprechend eingeschränkt werden, was zu einer vergleichsweise vereinfachten Ansteuerelektronik führte.

Sämtliche durchgeführte Entwicklungsarbeiten und Untersuchungen wurden durch eine entsprechende *Dokumentation* (AP I 6.3) begleitet. Auf dieser Grundlage konnten die für die dargestellte Anwendung am besten geeignete Kombination aus mikroakustischem Aktor, dessen Verkapselung und einer dazu passenden elektrischen Ansteuerung gewählt und umgesetzt werden.

II.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Ausgabenpositionen des Projekts sind in Abb. 2 in ihrer prozentualen Verteilung dargestellt. Aufgrund des hohen Bedarfs an wissenschaftlicher Arbeit bilden Entgelte für wissenschaftliche Beschäftigte, d.h. Postdoktoranden und Doktoranden, mit 82,1% (Position 0812: Beschäftigte E12-E15) den größten Anteil der Ausgabenpositionen, gefolgt von der Gruppe Verbrauchsmaterialien und Infrastruktur (11,9%, Position 0843), die zur Absicherung der umfangreichen experimentellen Arbeiten der Gruppe benötigt wurden. Der Anteil der beiden weiteren Positionen (Reisekosten sowie Aufträge an Dritte) beträgt weniger zusammen als 6% der Gesamtausgaben.

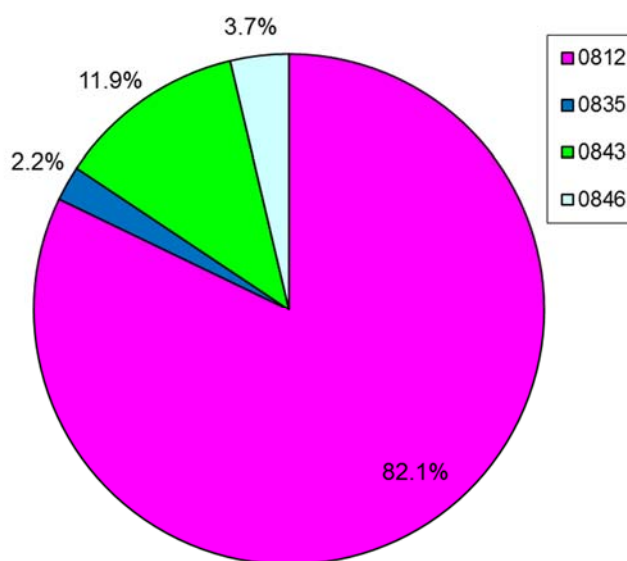


Abb. 2: Prozentuale Verteilung der Ausgabenpositionen des InnoProfile-Teilvorhabens
(0812: wiss. Beschäftigte, 0835: Unteraufträge, 0843: Verbrauchsmaterial etc., 0846: Reisekosten)

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten der Nachwuchsgruppe orientierten sich am Forschungsbedarf der am Verbundprojekt beteiligten KMU-Partner. Basierend auf den wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen der vorangegangenen InnoProfile-Projektes erfolgte eine gezielte Weiterentwicklung des Themenfeldes Mikroakustisches Mischens für die Anwendung in Laboranalysen-Systemen. Hierzu erfolgte fortlaufender Abgleich zwischen Forschungsergebnissen und sich aus der

Marktlage ergebendem Anwendungsbedarf, so dass die Angemessenheit der erfolgten Arbeiten über den gesamten Projektzeitraum gesichert wurde. Durch das Verbundprojekt gelang es, die innerhalb der Region ansässigen Partner MLE, Prolatec und STM fachlich miteinander zu verknüpfen und deren längerfristigen Entwicklungsaktivitäten zu unterstützen. Die Zusammensetzung der in das Vorhaben eingebundenen industriellen Verbundpartner – Komponentenhersteller, Elektronikhersteller und Gerätehersteller – deckt die gesamte Wertschöpfungskette ab.

Durch die am IFW Dresden etablierte Nachwuchsgruppe erfolgte in allen Projektphasen eine zielgerichtete Forschung und Entwicklung zu den Grundlagen des Mikroakustischen Mischens sowie zum Transfer der Ergebnisse in praktisch verwertbare Gerätetechnik. Die Wissenschaftler unterstützten dabei die Partnerunternehmen auf den Gebieten der applikationsangepassten mikroakustischen Strömungsanregung (Mischen), der Verkapselungstechnologie sowie der hochfrequenztauglichen elektronischen Ansteuerung.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Arbeiten der Gruppe führten neben den wissenschaftlichen Veröffentlichungen (siehe II.6.) auch zu mehreren Produktansätzen, die gemeinsam mit den Verbundpartnern weiterverfolgt werden sollen. Zudem erfolgte im Projektzeitraum die Erteilung eines Patentschutzrechtes.

Außer für die Partnern im Verbundprojekt wurden auch Erkenntnisse gewonnen, die für die Fa. BelektroniG, das InnoProfile Spin-off des IFW Dresden, Verwertungspotenzial besitzen.

Die Forschungsergebnisse im den Bereich des mikroakustisches Zerstäubens konnten bereits im Rahmen eines weiteren Projektes zur SAW-gestützten Aerosolbildung weitergeführt und intensiviert werden. Dieser Bereich besitzt neben dem mikroakustischen Mischen ein großes Verwertungspotenzial.

Neben der Zielanwendung in Laboranalysensystemen können die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse auch auf den sich international entwickelnden Bereich der mikrofluidischen Lab-on-a-Chip-Systeme angewendet werden. Dazu zählen unter anderem die in der Gruppe weiterentwickelten dedizierten Mess- und Simulationsverfahren. Diese konnten bereits in Kooperationen mit anderen Forschungsgruppen eingebracht werden. Vorgesehen ist, insbesondere die Arbeiten zur Mikrofluidik und zur Aerosolerzeugung im Rahmen von Folgeprojekten zu verwerten.

Weiterhin ist geplant, den im Projekt erzielten Entwicklungsstand für die Anwendungen Mischstab und optische Messzelle zusammen mit den anderen Projektpartnern auszubauen und in eine Produktentwicklung zu überführen.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die schon bei Projektbeantragung in der Literatur zu verzeichnende Tendenz zur Nutzung mikroakustischer Prinzipien und Bauelemente hat sich über die Projektlaufzeit generell bestätigt und besonders für die SAW-basierte Mikrofluidik international noch verstärkt.

Es sind jedoch keine Umstände bekannt geworden, welche den Rahmen des Projektes oder die Durchführung des Vorhabens in Frage gestellt noch grundsätzlich befördert hätten.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Forschungsergebnisse und Konferenzbeiträge von Mitgliedern der Nachwuchsgruppe finden sich in folgenden Konferenzbeiträgen und Journalveröffentlichungen:

A. Darinskii, M. Weihnacht, H. Schmidt,

Surface acoustic wave scattering by substrate edges, 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings (Chicago, Illinois, USA), 03.-06.09.2014, 10.1109/ULTSYM.2014.0512, 2055 - 2058

R. Brünig, A. Winkler, F. Kiebert, H. Schmidt,

Towards high efficient SAW-based microfluidic actuators, Acoustofluidics 2014 (Prato, Italien), 11.-12.09.2014

A. Winkler, S. Harazim, D.J. Collins,

SAW-based fluid atomization using mass-producible chip devices, Acoustofluidics 2014 (Prato, Italien), 11.-12.09.2014

S. Wege, A. Winkler, R. Brünig, H. Schmidt,

SAW micro channel fluid mixing in simulation and experiment Acoustofluidics 2014 (Prato, Italien), 11.-12.09.2014

R. Bruenig, H. Schmidt, A. Winkler,

SAW Technology for Microfluidic Mixers and Considerations about Efficiency, 4th European Conference on Microfluidics - Microfluidics 2014 (Limerick, Irland), 10.-12.12.2014

A. Winkler, S. M. Harazim, S. B. Menzel and H. Schmidt,

SAW-based fluid atomization using mass-producible chip devices, Lab on a Chip 15 (2015) 18, 3793-3799

F. Kiebert, J. König, C. Kykal, H. Schmidt,

Measurements of streams agitated by fluid loaded SAW-devices using a volumetric 3-component measurement technique (V3V), Physics Procedia 70 (2015), 25-29

J. König, F. Kiebert, H. Schmidt and C. Kykal,

Volumetric velocimetry of the particle motion induced by surface acoustic waves, 15th International Symposium on Particle Image Velocimetry PIV 2015 (Santa Barbara, California, USA), 14.-16.09.15

J. König, F. Kiebert, H. Schmidt, C. Kykal,

Volumetrische Messung der durch akustische Oberflächenwellen induzierten Partikelbewegung in Flüssigkeiten, GALA Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik 2015 (Dresden, Deutschland), 8. – 10.09.15

J. Massing, J. König, F. Kiebert, S. Wege, H. Schmidt, C. Cierpka,

3D3C Geschwindigkeitsmessungen mittels Astigmatismus Particle Tracking Velocimetry (APTV) in SAW-basierten mikrofluidischen Mischern, GALA Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik 2015 (Dresden, Deutschland), 8.-10.09.15

A. Winkler, R. Brünig, C. Faust, R. Weser, H. Schmidt,

Towards efficient surface acoustic wave (SAW)-based microfluidic actuators, Sensors and Actuators A: Physical A 247 (2016), 259-268

F. Kiebert, S. Wege, J. König, R. Weser, H. Schmidt,

Comparison between acoustic streaming induced fluid flow in 3D-simulation and experiment, Acoustofluidics 2016 (Kopenhagen, Dänemark), 22.-23.09.2014

C. Faust, E. Angermann, A. Winkler, H. Schmidt,

Multi-purpose SAW-based device for comprehensive cell behavior studies, Acoustofluidics 2016 (Kopenhagen, Dänemark), 22.-23.09.2014

A.N. Darinskii, M. Weihnacht, H. Schmidt,

Simulation of high-frequency pressure produced by SAWs in microchannels, Surface Acoustic Wave Sensor and Actuator Symposium 2016 (Dresden, Deutschland), 20.-21.10.2016

A. Winkler, S. Harazim, D.J. Collins, R. Brünig, S. Menzel, H. Schmidt,

Compact SAW aerosol generator, Surface Acoustic Wave Sensor and Actuator Symposium 2016 (Dresden, Deutschland), 20.-21.10.2016

R. Weser, A. Winkler, R. Brünig, C. Faust, J. König, H. Schmidt,

Energy efficient operation of surface acoustic wave (SAW) based microfluidic actuators, Surface Acoustic Wave Sensor and Actuator Symposium 2016 (Dresden, Deutschland), 20.-21.10.2016

J. König, F. Kiebert, H. Schmidt,

Measurement of the particle velocity and temperature distributions in a SAW-driven fluid flow, Surface Acoustic Wave Sensor and Actuator Symposium 2016 (Dresden, Deutschland), 20.-21.10.2016

S. Wege, F. Kiebert, C. Faust, E. Angermann, H. Schmidt,

Particle focusing pattern in micro fluidic systems from interference of bulk waves excited by

two facing IDTs, 26th Anniversary World Congress on Biosensors – Biosensors 2016 (Göteborg, Schweden), 24.-28.05.2016

A.N. Darinskii, M. Weihnacht, H. Schmidt,

Computation of the pressure field generated by surface acoustic waves in microchannels, Lab on a Chip 16 (2016) 14, 2701-2709

Gemeinsam Auftritte mit dem IFW-Spin-Off „BelektroniG“

MicroTAS 2013 (27.-31.10.2013, Freiburg, Deutschland)

Deutsches BioSensor Symposium 2015 (11.-13.03.2015, München, Deutschland)

Surface Acoustic Wave Sensor and Actuator Symposium 2016 (20.-21.10.2016, Dresden, Deutschland)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Schlussbericht der InnoProfile-Transfer Nachwuchsgruppe „Akustoelektronische Fluid-Mikroaktorik“ Teilvorhaben im InnoProfile-Transfer-Verbundprojekt „Mikroakustische Mischer für Laboranalysensysteme (MiMi)“		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Hagen Schmidt	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2016	
	6. Veröffentlichungsdatum geplant	
	7. Form der Publikation	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW Dresden) Helmholtzstr. 20 01069 Dresden	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 03IPT610A	
	11. Seitenzahl 20	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 19	
	14. Tabellen -	
	15. Abbildungen 2	
16. Zusätzliche Angaben keine		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Im Rahmen des Projekts wurden Funktionsprinzipien der Akustoelektronik, d.h. der akustischen Oberflächen- und Volumenwellen-Technik (surface acoustic waves: SAW, bulk acoustic waves: BAW) für die Nutzung zur Fluidaktorik in Laboranalysensystemen untersucht und weiterentwickelt. Angestrebt wurden vor allem kostengünstige und applikationsangepasste mikroakustische Lösungen. Hierzu wurden die Grundlagen verschiedener mikroakustischer Fluid-Manipulationen, wie Mischen/Homogenisieren, Erwärmen und Zerstäuben, für einen effizienten Einsatz in kommerziellen Anwendungen aufbereitet. Dies umfasste auch die Entwicklung von innovativen und kosteneffizienten Technologien zur flüssigkeitsdichten Verkapselung der Fluid-Mikroaktoren sowie Systemdesign, Aufbau, Charakterisierung und Optimierung derartiger Baugruppen für den Einsatz in unterschiedlichen Labor- und Analysengeräten. Es wurden mehrere Technologien auf ihre mikroakustische Tauglichkeit untersucht und Verkapselungsmaterialien charakterisiert, darunter silikatische Gläser und organische Polymere. Auf der Geräteseite wurden ein Mischstab für den Einsatz in Autosamplern sowie eine optische Messzelle mit Mischfunktion als geeignete Anwendungen identifiziert. Mit den ausgewählten Verkapselungstechnologien ausgestattete mikroakustische Aktoren konnten erfolgreich gemeinsam mit den Projektpartnern im Rahmen von Demonstrationssystemen realisiert und getestet werden.		
19. Schlagwörter Akustoelektronik, Mikroakustik, SAW, BAW, SAW-Aktor, Verkapselung, Mischer, piezoelektrisch		
20. Verlag	21. Preis	

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report	
3. title Final report of the InnoProfile-Transfer research group „Acoustoelectronic Fluid-Microactuators“ (Part of the joint InnoProfile-Transfer project ‚Microacoustic mixers for lab analysis systems (MiMi)‘		
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Hagen Schmidt	5. end of project 2016-06-30	
	6. publication date planned	
	7. form of publication	
8. performing organization(s) (name, address) Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW Dresden) Helmholtzstr. 20 01069 Dresden	9. originator's report no.	
	10. reference no. 03IPT610A	
	11. no. of pages 20	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 19	
	14. no. of tables -	
	15. no. of figures 2	
16. supplementary notes none		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract Within the framework of the project, functional principles of acoustoelectronics, i.e. of surface acoustic wave (SAW) and bulk acoustic wave (BAW) technology have been investigated for the utilization as fluid actuators within lab analysis systems. Particularly cost-effective and application-oriented microacoustic solutions were strived for. For this purpose, the fundamentals of various microacoustical fluid manipulations, such as mixing / homogenizing, heating and atomizing, have been scrutinized for an efficient use in commercial applications. Included was also the development of innovative and cost-effective technologies for the liquid-tight encapsulation of the fluid microactuators as well as system design, construction, characterization and optimization of such assemblies for the application in lab-based analysis systems. Several encapsulation technologies have been investigated for their microacoustic compatibility and various encapsulation materials have been characterized, including silica-based glasses and organic polymers. As for the application, a mixing rod for the use in autosamplers as well as an optical cell with mixing functionality have been identified as promising demonstrators. Finally, microacoustic actuators equipped with the preferred encapsulation technologies were successfully realized jointly by the project partners and have been proven within the framework of demonstration systems.		
19. keywords acoustoelectronics, microacoustics, SAW, BAW, SAW actuator, encapsulation, mixer, piezoelectric		
20. publisher	21. price	