

Institut für Mikrotechnologien (IMtech)

**Hochschule RheinMain (HS-RM)
Fachbereich Ingenieurwissenschaften (FB ING)**

Institutsbericht 2019/2020

www.hs-rm.de/de/imtech

Redaktion: F. Völklein, S. Kontermann, Ch. Kunz, A. Meier

Rüsselsheim, den 30. 08. 2020

Inhalt

- 1. Mitglieder und Mitarbeiter des IMtech**
- 2. Wissenschaftlicher Beirat des IMtech**
- 3. Profil / Forschungsschwerpunkte**
 - 3.1 Neues Direktorium des IMtech
 - 3.2 Aufgaben und Perspektiven in Forschung und Lehre
 - 3.3 Ausstattung: Neue Geräte und Technologien
 - 3.4 Wissenstransfer in regionalen Netzwerken
- 4. Forschungsprojekte / Kooperationen**
 - 4.1 UltraLIMO
 - 4.2 FemtoBlack
 - 4.3 DiffraLicht
 - 4.4 LasDif
 - 4.5 LiDiOp
 - 4.6 Photonische Wertschöpfungskette
 - 4.7 Engineering 4.0, Teilvorhaben im Themenfeld „Photonik / Mikrosystemtechnik“
 - 4.8 Gasanalytik
 - 4.9 TSPR-MS Epitopanalysator
 - 4.10 HYLEVEL
 - 4.11 PRIPHOR
 - 4.12 ZIRCON
 - 4.13 Engineering 4.0, Teilvorhaben im Themenfeld „Medizintechnik“
 - 4.14 Forschungskoooperation Dragonfly
 - 4.15 Forschungskoooperation „WEFF-Mikroskopie“
- 5. Publikationen und Öffentlichkeitsarbeit**
 - 5.1 Öffentlichkeitsarbeit
 - 5.2 Wissenschaftliche Publikationen (Fachzeitschriften, Tagungen)
 - 5.3 Masterarbeiten
 - 5.4 Bachelorarbeiten

1. Mitglieder und Mitarbeiter des IMtech

Professoren

Prof. Dr. H.-D. Bauer (stellvertretender Direktor IMtech)

Prof. Dr. A. Brensing

Prof. Dr. Bender

Prof. Dr. J. Heibel

Prof. Dr. K. M. Indlekofer

Prof. Dr. W. Kleinekofer

Prof. Dr. S. Kontermann (amtierender Direktor IMtech)

Prof. Dr. Silvia Mittler

Prof. Dr. U. Langbein (im Ruhestand)

Prof. H. Reisinger (im Ruhestand)

Prof. Dr. Bernd Schweizer

Prof. Dr. G. Stein (im Ruhestand)

Prof. Dr. F. Völklein (im Ruhestand)

Wissenschaftliche und technische Mitarbeiterinnen/Mitarbeiter

H.J. Beck, technischer Mitarbeiter

Dr. M. Dürndorfer

R. Groß, wissenschaftlicher Mitarbeiter (im Ruhestand)

J. Kuhl, wissenschaftlicher Mitarbeiter/Doktorand

Ch. Kunz, technische Mitarbeiterin

I. Lebershausen, Laboringenieur

C. Marx, Laboringenieur

P. McKearney, wissenschaftlicher Mitarbeiter/Doktorand

A. Meier, wissenschaftlicher Mitarbeiter

S. Paulus, wissenschaftlicher Mitarbeiter/Doktorand

Dr. H. Reith (seit 2015 IFW, Dresden)

M. Saad Khan, wissenschaftlicher Mitarbeiter/Doktorand

Dr. J. Schmitt (seit 2018 P&G, Kronberg)

Dr. M. Schmitt (seit 2011 Effgen Schleiftechnik, Herrstein)

M. Sommer, wissenschaftlicher Mitarbeiter/Doktorand

S. Stille (seit 2008 Leybold Optics, Alzenau)

Dr. M. Wagner (seit 2018 GSI Helmholtzzentrum, Darmstadt)

Studentische Mitarbeiterinnen/Mitarbeiter (zeitweilige Projektmitarbeiter)

M. Boog (optische Schichten), D. Müllers (Projekt DiffraLicht), J. Paulus (WEFF-Mikroskopie), F. Piermaier (Projekt FemtoBlack), Patrick Rose, Bodo Renner



IMtech-Mitglieder 2019



Direktoren

2. Wissenschaftlicher Beirat des IMtech

N.N.

Hessen Trade & Invest GmbH, Wiesbaden
(bisher Dr. David Eckensberger)

Prof. Dr. Michael Huth
Goethe-Universität Frankfurt/Main
Physikalisches Institut
michael.huth@physik.uni-frankfurt.de

Dr. Gerrit Stratmann
Hessisches Ministerium für Wissenschaft und Kunst, Wiesbaden
Gerrit.Stratmann@hmwk.hessen.de

3. Profil / Forschungsschwerpunkte

3.1 Neues Direktorium des IMtech

Auf der letzten Mitgliederversammlung am 10. 12. 2019 wählten die Mitglieder Prof. Dr. Stefan Kontermann zum neuen Institutsdirektor und Prof. Dr. Hans-Dieter Bauer zum stellvertretenden Institutsdirektor. Das neue Direktorium ist auf der Sitzung des Fachbereichsrats Ingenieurwissenschaften am 30. 06. 2020 von Dekan Prof. Dr. Christian Glockner eingesetzt worden.



Prof. Dr. Stefan Kontermann



Prof. Dr. Hans-Dieter Bauer

Prof. Dr. Friedemann Völklein, der die Mikrosystemtechnik sowohl als Forschungs- wie auch als Lehrgebiet in den „90ern“ an der damaligen Fachhochschule Wiesbaden eingeführt hat, geht in den mehr als wohlverdienten Ruhestand. (Wobei dies für ihn vielleicht bedeutet, dass er endlich mehr „Ruhe“ für die Forschung haben wird als bisher...). Er hat nicht nur durch große Eigeninitiative an der Hochschule, sondern vor allem auch durch Drittmittelinwerbung in bemerkenswertem Umfang für eine Laborinfrastruktur gesorgt, die von anderen Hochschulen als beneidenswert eingestuft wird. Er war maßgeblich an der Gründung des

IMtech 2004 beteiligt und seit der Gründung dessen Direktor. Er hat das IMtech mit höchstem Einsatz dahin geführt, wo es heute steht. Kurzum: Er hinterlässt große Fußstapfen! Dass er das IMtech jetzt weitergibt, verbinden wir mit der Verantwortung dieses Institut, dessen Mitarbeiter, Infrastruktur und wissenschaftlichen Erfolge weiterzuführen und weiterzuentwickeln.

Unseren guten Start in die Lehre und Forschung an der Hochschule RheinMain (Prof. Bauer 2001, Prof. Kontermann 2015) verdanken wir ihm und den Kollegen, die die Voraussetzungen zur Gründung des IMtech geschaffen, den Studienschwerpunkt Mikrosystemtechnik im damaligen Fachbereich Physikalische Technik eingerichtet und den Aufbau der umfangreichen Infrastruktur unterstützt haben. Einer von uns (HDB) konnte den von Friedemann Völklein angelegten Reinraum „übernehmen“, ist seither schwerpunktmäßig für die praxisnahe Lehre dort verantwortlich und konnte mit ihm zusammen den ersten Masterstudiengang an diesem Fachbereich aufbauen und ihn dann fast zehn Jahre lang leiten. Der andere von uns (SK) hat die Leitung des Masterstudiengangs seit 2019 übernommen und profitiert davon, dass dieser Masterstudiengang promotionsfähige Absolventinnen und Absolventen generiert, mit denen der von Friedemann Völklein geebnete Weg der kooperativen Promotionen weiterhin beschritten wird.

Das IMtech lebt so von der Lehre und der Forschung und diese mit den Forschungsprojekten. Daraus ergeben sich dann Promotionen, wissenschaftliche Veröffentlichungen und Technologien zum Transfer in die Anwendung. Um das zu erreichen ist es unser Ziel das Herzstück des IMtech, nämlich seine Mitarbeiter und seine Technologiebasis, so zu lenken und weiterzuentwickeln, dass zunehmend Projekte aus allen Forschungsbereichen des IMtech akquiriert und durchgeführt werden können. Das IMtech leistet hier bereits jetzt seinen Beitrag zum weiteren Zusammenwachsen der Studienbereiche in Rüsselsheim. Dabei sind weitere Mitglieder am IMtech immer herzlich willkommen.

Zur Zukunft der Forschung an den Hochschulen für Angewandte Wissenschaften wird das IMtech in seinen Forschungsbereichen Mikrosystemtechnik, Photonik und Medizintechnik mit Projekten, Veröffentlichungen und Promotionen einen maßgeblichen Beitrag leisten. Dabei sind neben der Technologiebasis sehr gute Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Schlüssel zu erfolgreicher Forschung. Da werden Hände und Köpfe benötigt, die sich um die experimentellen und technischen Anlagen in den Laboren kümmern, Mitdenker, die Ideen im Labor umsetzen und die Ergebnisse veröffentlichen, gute Geister des Hauses, die bei den Feinheiten der organisatorischen Umsetzung von Forschung den Weg freimachen, um die Projektideen umzusetzen. Diese Hände und Köpfe sind das, was für erfolgreiche Forschung notwendig ist. Das IMtech hat hier sehr gutes Potenzial, auf das wir aufbauen können. Um

das nachhaltig zu tun und die zu erledigende Arbeit am IMtech mit Freude anzugehen, ist die Unterstützung der Politik, der Hochschulleitung und des Fachbereichs notwendig: sicherlich im Bereich der Technologie, insbesondere und am wichtigsten jedoch bei der Erhöhung der Anzahl der ideenumsetzenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

Jetzt freuen wir uns darauf, das IMtech mit dem bewährten Team weiter auf- und auszubauen, um noch viele Generationen von Studierenden mit den Technologien und Forschungsfeldern am IMtech vertraut zu machen und möglichst viele davon für Physik und Technik des Kleinen und Kleinsten zu faszinieren!

Herzlichst

Ihr



Stefan Kontermann

Ihr



Hans-Dieter Bauer

3.2 Aufgaben und Perspektiven in Forschung und Lehre

Forschung und Lehre sind an einer Hochschule traditionell miteinander verbunden. Speziell an Hochschulen für Angewandte Wissenschaften – gemeinhin immer noch Fachhochschulen genannt – spielt die Forschung spätestens seit der Einführung des Bachelor-Master-Systems eine größere Rolle, ist sogar als Dienstpflicht im Hochschulgesetz verankert. Schließlich sollen Absolventen von Masterstudiengängen für ihr Fachgebiet die volle Promotionsfähigkeit erlangt haben.

Die Professorinnen und Professoren der „physikalischen Studiengänge“ an der HSRM verstanden sich (der umfassenden Funktion der Physik als Grundlage jedweder Technik entsprechend) seit je her in besonderer Weise als “forschende Lehrende“ und ihre Absolventen als Brückenbauer zwischen Ingenieurwesen und Physik. Sie sahen und sehen sich daher in der Pflicht, Studiengänge anzubieten und weiter zu entwickeln, welche sowohl die Kompetenzen des klassischen Ingenieurs als auch die des Physikers vermitteln, dies aber in praxisnaher und möglichst vielfältiger Weise.

Dem entsprechend hatten und haben die Absolventinnen und Absolventen bei ihren Arbeitgebern einen guten Ruf: Sie sind besonders begehrt und einsatzfähig, wo es darum geht, neue Methoden in die Fertigung zu überführen, Materialien weiter zu entwickeln und

aktuelles Grundlagenwissen umzusetzen. Das ist der Fall bei großen Industriebetrieben mit F&E-Abteilung wie auch bei KMUs und kleinen Start-ups, aber in steigendem Maße auch bei Forschungsinstituten und Großforschungseinrichtungen.

Die Mikrosystemtechnik hat ihre Wurzeln in der Halbleitertechnik und entwickelte sich in den 1980er Jahren vehement zur Schlüsseltechnologie, als man in ihr die Erkenntnisse der Festkörper- und Quantenphysik mit Prozessen wie Lithographie und Laserbearbeitung aber auch Feinmechanik verband. Sensoren, Aktoren, Computertechnik waren die vordringlichsten Produkte. Mit Mikrosystemtechnik konnten nicht nur viele - kommerziell äußerst wichtige - Produkte verbessert, sondern ganz neue entwickelt werden. Das erforderte sehr schnell, dieses Gebiet auch in die Ausbildung von Ingenieuren einzubringen. An der HSRM geschah dies mit der Einführung des Studienschwerpunktes Mikrosystemtechnik in den damaligen Diplom-Studiengang Physikalische Technik, mit dem Aufbau eines Reinraums für Photolithographie, aber auch mit der Etablierung von Dünnschicht- und Vakuumtechnik in den Labors und der Einführung von entsprechenden Lehrinhalten zu den Anwendungen. Festkörperphysik und insbesondere Halbleitertechnik fanden Eingang in die Lehre, ebenso Integrierte Optik und Lithographie. Und dies nicht nur im damaligen Fachbereich Physikalische Technik. Die Gründung eines (In-)Instituts für Mikrotechnologien war eigentlich eine logische Folge, um hier eine organisatorische und vor allem auch nach außen sichtbare Klammer zu setzen.

Mittlerweile hat sich die Mikrosystemtechnik etabliert und diversifiziert und Forschung und Lehre an der HSRM haben darauf reagiert: Neben dem Material Silizium können auch Glasmaterialien auf unterschiedliche Weise mikrostrukturiert werden, ebenso Thermoplaste. Und neben der Photolithographie findet man in den Labors des IMtech Interferenzlithographie, fortgeschrittene Trockenätzverfahren und Lasermaterialbearbeitung mit Femtosekundenpulsen. Wenige Jahre nach der Jahrtausendwende entwickelte sich die Nanotechnologie zu einem neuen „Hype“. Auch die Nanotechnologie zeitigte sehr schnell Anwendungspotentiale und muss nun in die Ingenieursausbildung einfließen, was man an den Inhalten des Masterstudiengangs Angewandte Physik ablesen kann. Professor Friedemann Völklein spielte auch hier die Vorreiterrolle: Seine mit der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) durchgeführten Projekte zu thermischen und elektrischen Eigenschaften von Nanodrähten, auf den ersten Blick Grundlagenforschung, setzen neue Impulse für die Entwicklung von hochempfindlichen Sensoren.

Die Mikro- und Nanotechnologie weiter in Forschung und Lehre zu verankern hat sich auch Professor Dr. Markus Bender auf die Fahnen geschrieben, der Professor Völklein im Amt nachfolgt. Er ist mit der HSRM vertraut, kommt er doch von der GSI und hat in mehreren

Projekten mit Professor Völklein zusammengearbeitet, mehr noch: Er ist Absolvent des Rüsselsheimer Studiengangs Physikalische Technik.

Bei aller Begeisterung für Wissenschaft und Forschung darf nicht übersehen werden, dass die Zahl der Studierenden limitiert ist. Deshalb ist es – gleichberechtigt zu Ausbau und Pflege der Forschung – für jede Dozentin und jeden Dozenten unerlässlich, am Aufbau neuer, aktueller Studienangebote und an der Werbung für sie mitzuarbeiten und die eigene Lehre fortwährend interessant und aktuell zu halten. Nur engagierte und motivierte Studierende sind erfolgreiche Studierende. Der Aufbau des Bachelor-Studiengangs Interdisziplinäre Ingenieurwissenschaften hat dem gesteigerten Interesse an Medizintechnik Rechnung getragen und sein Erfolg ermöglichte den Aufbau des Masterstudiengangs Medizintechnik. Die Mikrosystemtechnik wird im neuen Bachelor-Studiengang Angewandte Physik zwar nicht als Studienrichtung vertreten sein, aber als neu konzipierte Lehrveranstaltung und natürlich in Form der Labor-Lehrveranstaltung Mikrostrukturierung. Außerdem finden „mikrotechnische“ Themen Eingang in eine Reihe anderer Lehrveranstaltungen und Projekte. Ziel ist es, möglichst viele Studierende auch dazu zu bringen, sich an den Forschungsarbeiten zu beteiligen, sei es in Form von Projekten, Berufs- oder Forschungspraktika oder natürlich Abschlussarbeiten. Dabei verbuchen wir es auch als Erfolg, wenn eine Studentin oder ein Student sich für Mikrotechnik begeistert und das Praktikum oder die Abschlussarbeit bei einer externen Firma oder einem Forschungsinstitut anfertigt. IMtech kann nur einige Mikrostrukturierungsprozesse anbieten und schon gar nicht alle aktuellen Anwendungen vertreten. Aber die Lehre kann und muss dafür vorbereiten: Aktuell laufen z.B. Abschlussarbeiten von HSRM-Studierenden zu den Themen Identifizierung und Quantifizierung von Mikroplastik und Aerosolausbreitung und –filterung. Abgesehen von der Notwendigkeit, die Lehre laufend zu aktualisieren und für die Forschung interessante Projekte (und die dazu nötigen Budgets) zu akquirieren, gilt es in den kommenden Jahren natürlich auch, die Beseitigung systemimmanenter Hemmnisse anzugehen. Hierzu zählen eine bessere Finanzierung der laufenden Ausgaben für die Infrastruktur, für die Beschaffung von Ersatz für in die Jahre gekommene Ausrüstung und vor allem für mehr Stellen für technische und wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter! Das Weitergeben von technischem Know-how in den Laboren muss langfristig gesichert werden und das geht bei den derzeitigen Studierendenzahlen – neben Doktorandenstellen - nur über den „Mittelbau“.

Die „politische“ Wunschliste ließe sich noch verlängern, gehört aber letztlich nicht in diesen Jahresbericht, sondern auf den Schreibtisch von Präsidium und Kanzler. Hier sei lieber mit einer positiven Feststellung geschlossen, nämlich dass das Konzept der Verschränkung von aktueller Forschung und motivierender Lehre im Bereich Mikro- und Nanotechnologien, für

welches das IMtech steht, auch aus anderer Perspektive zunehmend erfolgreich ist: Das ist die wachsende Zahl von Masterabsolventinnen und -absolventen, die an ihr Studium eine Promotion anschließen. Zum Weg der kooperativen Promotionen, die im Wesentlichen an der HSRM ablaufen und den man ja mittlerweile schon als etabliert bezeichnen kann, kommt nun bald auch noch die Möglichkeit der hochschulübergreifenden Nutzung von Promotionsplattformen. Und dann gibt es da auch noch eine steigende Zahl von Absolventinnen und Absolventen, die es schaffen, „ganz normal“ an einer Universität zu promovieren. Auch ein Telefonanruf einer oder eines „Ehemaligen“ mit den Worten „Würden Sie vielleicht die Rolle eines Fachprüfers bei der Verteidigung meiner Dissertation übernehmen?“ ist doch ein schöner Erfolg unserer „FH-Ausbildung“!

3.3 Ausstattung: Neue Geräte und Technologien

- Optische Simulationssoftware: VirtualLab Fusion, Wellenleiter-Toolbox der Firma Lighttrans UG, Jena
- Modernisierung der E-beam Beschichtungsanlage SATIS
- Modulares faseroptisches Fluoreszenz-Spektrometer AVASPEC ULS 2048 für den Spektralbereich 335-850nm, Auflösung 2,4nm, CMOS-Detektor, andockbar an Laserquellen
- Spektrum-Analyser bis 4,5 GHz

In Vorbereitung:

- Atomic Layer Deposition (ALD) zur Abscheidung von dielektrischen Passivierungsschichten auf Silizium
- Hochleistungs fs-Lasersystem (100W)
- Hochrepetierendes (>10MHz) fs-Lasersystem
- Ladungsträgerlebensdauerermessgerät QSSPC (Quasi-steady-state-photoconductance)

3.4 Wissenstransfer in regionalen Netzwerken

Das IMtech ist Mitglied im Kompetenznetz Optische Technologien „Optence“ und der zugehörigen Vereinigung Photonics Hub sowie im ZIM-Netzwerk „Instant“.



Kompetenznetz
Optische Technologien
Hessen / Rheinland-Pfalz



Aktivitäten:

- | | |
|-------------------|---|
| 29.03.2019 | Exkursion zum 1. Treffen der Optence-Arbeitsgruppe „Lasertechnologie“, Hochschule Aschaffenburg am Technologiezentrum Obernburg |
| 15.06.2019 | Konferenzteilnahme: Jahrestagung der Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik, Hochschule Darmstadt |
| 26.06.2019 | Exkursion zur Laser World of Photonics, München |
| 21.04.2018 | Arbeitskreis „Optiken für Laser“, IMtech, Hochschule RheinMain“ |
| 22.08.2019 | Teilnahme am Optence-Workshop „Internationale F&E-Kooperationsverträge abschließen“, Schenk Technologiepark, Darmstadt |
| 12.09.2019 | vom IMTech organisierter Gastvortrag von Dr. Bernd Kleemann (ehemals Zeiss AG Oberkochen): „Electromagnetic simulation of a real Head-Up Display consisting of embedded gratings“, Hochschule RheinMain, Fachbereich Ingenieurwissenschaften, Rüsselsheim |
| 29.10.2019 | Forschungstag 2019 der Hessischen Hochschulen für Angewandte Wissenschaften: Vorstellung des Projekts „LasDif“, Frankfurt University of Applied Sciences, Frankfurt |
| 04.11.2019 | Teilnahme am Optence-Workshop „Interkulturelles Training Finnland“, Schenk Technologiepark, Darmstadt |
| 21. – 22.01.2020 | Teilnahme an den Bayerischen Laserschutztagen, Flughafen Nürnberg |
| 31.3. – 5.4.2019 | Teilnahme an der European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2019) in Krakau, Polen mit Konferenzbeitrag |
| 23.7. – 27.7.2020 | Teilnahme an der IEEE-Konferenz Engineering in Medicine and Biology (EMBC 2019) in Berlin mit Konferenzbeitrag |
| 21.7. – 27.7.2020 | Teilnahme an der European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2020) mit Konferenzbeitrag, wegen Corona-Pandemie als Online-Konferenz |

4. Forschungsprojekte / Kooperationen

4.1 UltraLIMO

Projekttitle:	Ultrakurzpuls-Lasermaterialfunktionalisierung für innovative mikrooptische Bauelemente
Projektpartner:	Topag Lasertechnik GmbH, Darmstadt Polyscale GmbH, Aachen Fela GmbH, Villingen-Schwenningen Spittler Lichttechnik GmbH, Goslar Unique Lights GmbH, Bad Lauterberg Technische Universität Clausthal, Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien, Clausthal University of Western Ontario, Dept. of Physics & Astronomy, Kanada Kompetenznetzwerk Optische Technologien Optence e.V, Wörrstadt
Projektlaufzeit:	01. 07. 2017 – 30. 06. 2019
Projektförderung:	BMBF: FHInvest; FKZ: 13FH152IN6

Ultrakurzpuls (UKP)-Lasertechnologie ermöglicht flexible, schnelle, individualisierte und automatisierte Fertigungsverfahren. Diese dienen zur Mikrofunktionalisierung von optischen Medien, Schichten und Silizium, mit denen in UltraLIMO innovative Bauteildesigns für kombinierte Anwendungen aus Mikrooptik, Photonik und Mikrosystemtechnik verwirklicht werden. Sie sind wichtige Komponenten für den in Industrie 4.0 adressierten automatisierten Wertschöpfungsprozess, den das IMtech zusammen mit den Projektpartnern industriell umsetzt.

Das Ziel von UltraLIMO ist der Ausbau der laserbasierten lithografie-freien Mikrostrukturierungstechnologien am IMtech, um innovative F&E Projekte mit kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) durchzuführen. In UltraLIMO wurde dazu ein UKP-Lasersystem und einen 3D-Mikroscanner im Labor für Femtosekunden-Lasertechnologie installiert. Das Projektteam führte Vorarbeiten zu optischen Mikrostrukturen für transparente Lichtflächen, LED-Leuchten, Koppelgitter für planare Wellenleiter, DOE und Mikrostrukturen auf Silizium durch. Mit den 8 kooperierenden Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft wurden die Vorarbeiten und der erreichbare Technologiefortschritt bewertet und innovative praxisnahe Perspektiven für die automatisierte Fertigung entwickelt.

Durch den Aufbau des UKP-Lasersystems ist das IMtech in die Lage versetzt worden, Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit KMUs auf diesem Hochtechnologiegebiet

durchzuführen und den Forschungsschwerpunkt „Engineering 4.0“ weiter auszubauen. Durch die Bereitstellung des UKP-Lasersystems haben die KMUs leichten Zugang zu dieser Hochtechnologie.



Bild 1: *Panoramaaufnahme des im Projekt entstandenen Laboraufbaus.*

Die Planung und Durchführung des Projektes gliederte sich in vier Arbeitspakete (AP).

AP 1: Ausschreibungsverfahren und Beauftragung

Die für die Umsetzung des Vorhabens benötigten Einzelkomponenten wurden entsprechend der Beschaffungsrichtlinien spezifiziert und entsprechend den europäischen Vergabekriterien ausgeschrieben. Hierbei wurde ein Leistungsverzeichnis inkl. Wertungskriterien erstellt und eine Veröffentlichung der Auftragsvergabe durchgeführt. Das Verfahren ermöglichte die Beschaffung aller Komponenten, die für die Durchführung des Projektes benötigt wurden.

AP 2: Vorbereitende Arbeiten im Labor

Im Rahmen der Hochschulsanierung wurde das Labor bereits mit einigen Versorgungsmedien ausgestattet, welche vorbereitend für die Installation des UKP-Lasersystems noch modifiziert bzw. verifiziert werden mussten. So wurden beispielsweise die entsprechenden Druckluftversorgungsleitungen mit Druckminderern, die vorhandenen Kühlwasseranschlüsse der Hauskühlwasseranlage mit Adaptern und Durchflussmessgeräten versehen und eine entsprechende Stromverteilung zum sicheren Betrieb der Laseranlage vorbereitet.

Im zweiten Schritt wurden der vorhandene und der neu zu beschaffende luftgedämpfte Tisch neu in den Raum eingeplant und eine hängende Deckenkonstruktion als CAD-Modell entworfen, beschafft und installiert.

AP 3: Einarbeitungsphase zur Justage und Prozessoptimierung

Das UKP-Lasersystem wurde in Zusammenarbeit mit dem Hersteller auf dem vorbereiteten Tisch aufgebaut und in Betrieb genommen. Die geforderten Spezifikationen (Pulslänge, Pulsleistung/Durchschnittsleistung) wurden in diesem Schritt herstellenseitig nachgewiesen und dokumentiert. Das 3D-Scansystem wurde installiert und mit dem Lasersystem optisch gekoppelt. Für beide Systeme wurde das Projektteam während der Installation im Betrieb

und der Fehlerbehebung geschult. Durch die im Projekt angeschafften Messsysteme können durch die Benutzer die relevanten Systemparameter bzgl. Strahllage, Durchschnittsleistung, Repetitionsrate, Pulsenergie und Pulsdauer überwacht und den Anforderungen entsprechend angepasst werden.

Im Laufe des Projektes entstanden weitere Aufbauten, welche für die Durchführung der Forschungsaktivitäten benötigt wurden. Es entstand ein weiterer Scanner zur Herstellung von femtosekundengelasertem schwarzem Silizium (Bild 2). Dieser Scanner ermöglicht die Prozessierung von flächigen Proben unter definierten Gasatmosphären. Für die Umsetzung dieses in Bild 2 dargestellten Aufbaus wurden sowohl vorhandene Komponenten verwendet als auch einige neue Teile beschafft. Das System besteht aus einer computergesteuerten motorisierten x-y-Stage mit entsprechendem Controller und Software, einem Rezipienten inkl. Ventile zur Steuerung des Prozessgases, einer Drehschiebervakuumpumpe, einem Abgassystem mit Filterung der Abfallgase, der erforderlichen Strahlführung zur Einkopplung der UKP-Stahlquelle, einem Kamerasystem zur Prozessüberwachung inkl. Beleuchtungseinheit, einer analogen Gasflussüberwachung und einer analogen sowie digitalen Prozessdrucküberwachung. Das Scansystem wurde im Laufe der Zeit an die Anforderungen der Versuchsdurchführung immer wieder angepasst.

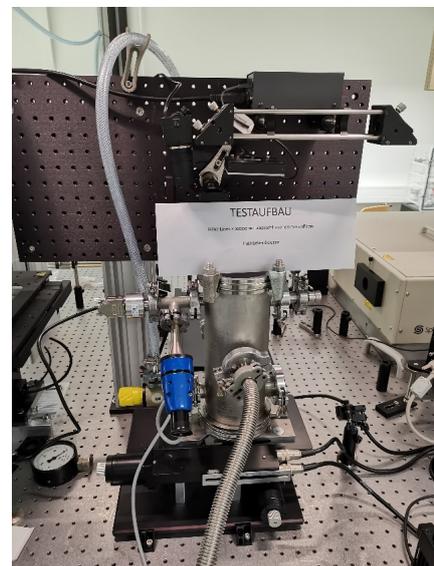
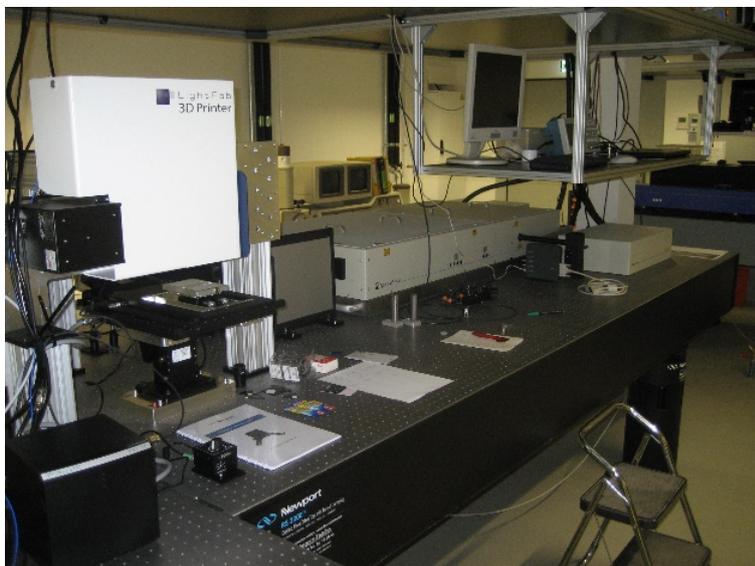


Bild 2: *Ultrakurzpuls-Lasersystem mit 3D-Scansystem und Scanner mit Prozesskammer zur Herstellung von femtosekundengelasertem schwarzem Silizium*

AP 4: Herstellung erster Demonstratoren

DoE/Brechzahlmodulation

Die vom Projektteam evaluierte Software „Virtual Lab Fusion“ wurde aus eigenen Labormitteln beschafft, um DOEs mit Bildvorgabe simulieren und optimieren zu können. Die

Übertragung dieser simulierten Phasenmaske ist theoretisch mittels Brechzahlmodulation durch ultrakurze Laserpulse im Glasvolumen möglich. Die Umsetzung der simulierten Ergebnisse erforderte die Kenntnis der mit dem Femtosekundenlaser erzeugten Brechzahlveränderung. Dazu wurden vorausgehende Versuchsreihen zur Analyse der erzeugbaren Brechzahlmodulationen und Ablationstiefen in ausgewählten optischen Werkstoffen durchgeführt.

Vorbereitend sollte untersucht werden, wie sich eine Änderung der Parameter von fokussierten, ultrakurzen Infrarot-Laserpulsen (800 nm) auf die Brechzahländerung von Quarzglas auswirkt. Die variierten Parameter waren hierbei die Schreibgeschwindigkeit, die Pulsenergie, sowie die Schreibtiefe im Substrat. Des Weiteren wurden Ansätze zur Charakterisierung der modulierten Strukturen vorgestellt. Grundlage für die geplanten Versuche waren Substrate mit definierten optischen Oberflächen, welche im Rahmen der entstandenen Arbeiten u.a. durch UKP-Laserpolieren optimiert wurden. Die Ergebnisse wurden mit mechanischen Polierverfahren verglichen.

Zentrale Erkenntnis der Arbeit war, dass die im Laserprozess verwendeten Fluenzen keinen relevanten Parameter darstellten. Vielmehr schien bei der Brechzahlvariation die Pulsenergie ausschlaggebend zu sein. Es wurden Pulsenergien für permanente lokale isotrope Brechungsindexmodulation und eine Grenzulsenergie für die Entstehung von Kavitäten im verwendeten Quarzglas ermittelt.

Des Weiteren wurde eine Analyse von Charakterisierungsmethoden zur Bestimmung von Brechungsindexmodulation in Gläsern durchgeführt. Diese Arbeit untersucht Methoden zur direkten und indirekten Bestimmung von Brechungsindices in Gläsern, insbesondere bei Quarzglas. Als direkte Methoden werden Methoden bezeichnet, bei denen aus den messbaren Größen in einem Messvorgang die Brechungsindexmodulation ohne zusätzliche Informationen bestimmt werden kann. Indirekte Methoden hingegen benötigen weitere Informationen, wie z. B. die Strukturgröße, um den Brechungsindex zu berechnen. Es wird eine Auswahl von Verfahren beschrieben, welche in der AG Photonik realisierbar sind. Als direkte Methode wird die Messung der numerischen Apertur aufgeführt, als indirekte Messmethoden die Bestimmung der optischen Weglänge durch die Kogelnik-Gleichung, die Bestimmung der Phasenverteilung mittels iterativem Fouriertransformationsalgorithmus nach Gerchberg-Saxton und die Bestimmung der Phase bzw. optischen Weglänge mittels Transport of Intensity Equation (TIE) unter Benutzung verschiedener Lösungsalgorithmen.

Das vielversprechendste Ergebnis ist dabei die TIE-Methode. Die zugehörigen Intensitäts- und Phasenbilder sind in Bild 3 gezeigt. Aus der Phasenrekonstruktion lässt sich die optische Weglänge und daraus die Brechzahl des gelaserten Bereichs bestimmen.

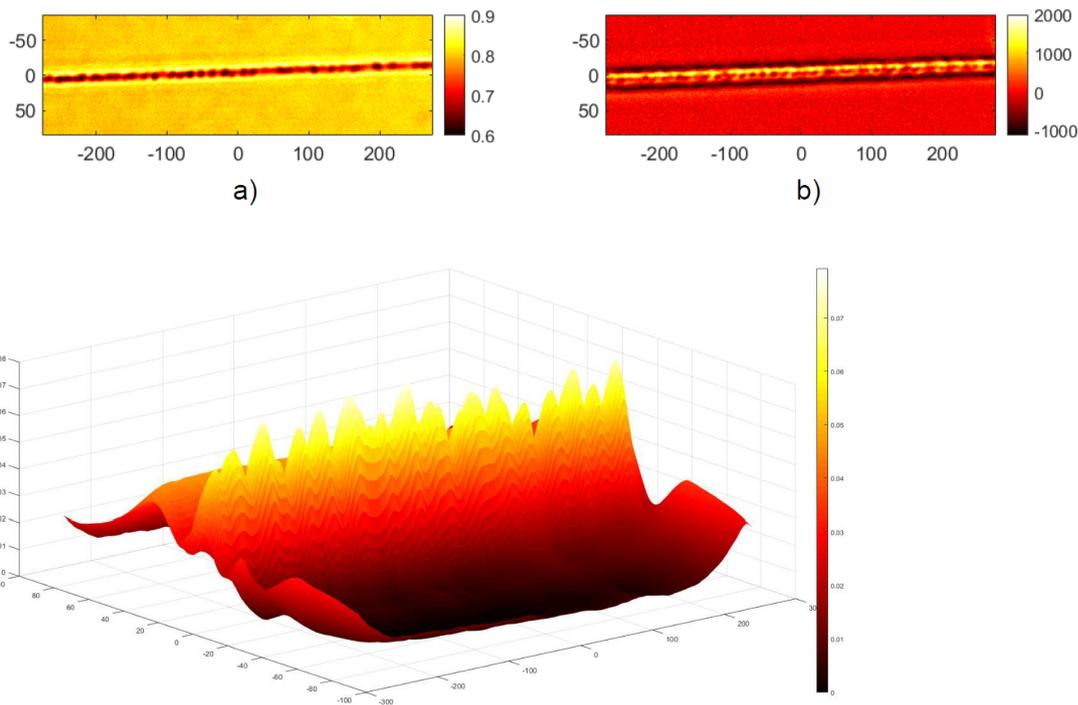


Bild 3: (a) Intensitätsbild des lasergeschriebenen Wellenleiters im Fokus, (b) zugehöriger linearer Intensitätsgradient, (c) Isometrische Darstellung der Phasenrekonstruktion mittels Fast-Fourier-Transformation / Transport of Intensity Equation (FFT-TIE) des lasergeschriebenen Wellenleiters

Ablativ prozessierte optische Gitter

Das im Projekt angeschaffte UKP-Lasersystem stellte die Grundlage für einen konzeptionellen Aufbau zur Erzeugung von in Quarzglas lithographisch ablativ, mittels des im Projekt angeschafften UKP-Lasersystems, hergestellten optischen Koppelgittern dar.

Das angestrebte Verfahren sollte eine Möglichkeit schaffen, den zeitaufwendigen klassischen Mikrostrukturierungsprozess zur Herstellung von Koppelgittern in Quarzglas vor allem in Bezug auf die Herstellungsdauer zu optimieren. Die Interferenzeffekte der im Labor erzeugbaren ultrakurzen Pulse wurden simuliert, um die Anforderungen an den zu planenden Aufbau zu spezifizieren. Eine große Herausforderung stellte hierbei die Justage der räumlichen Gleichzeitigkeit zweier Teilpulse dar. Ein entsprechender Versuchsaufbau zur genauen Justage der Teilstrecken wurde geplant, beschafft und aufgebaut. Außerdem wurde ein auf nichtlinearen Effekten basierendes Messsystem zum Detektion der Teilpulse entworfen und realisiert. Die prinzipielle Funktion des Aufbaus konnte verifiziert werden. In einem zweiten Verfahren wurden Gitter direkt durch UKP-Laserablation mittels des im Projekt angeschafften 3D-Scanners geschrieben.

Es wurden Versuche zur Ermittlung der minimalen erzeugbaren Gitterkonstante durchgeführt, wodurch optische Gitter im Mikrometerbereich entstanden. Die Ergebnisse wurden mit den Mikrostrukturierungsverfahren verglichen, welche üblicherweise zur Herstellung von optischen Gittern in Quarzglas verwendet werden. Mit dem Direktschreibverfahren konnten deutlich höhere Gitteramplituden erzeugt werden. Aus den Ergebnissen der durchgeführten Versuche entstand ein Beitrag zur Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Angewandte Optik im Jahre 2019.

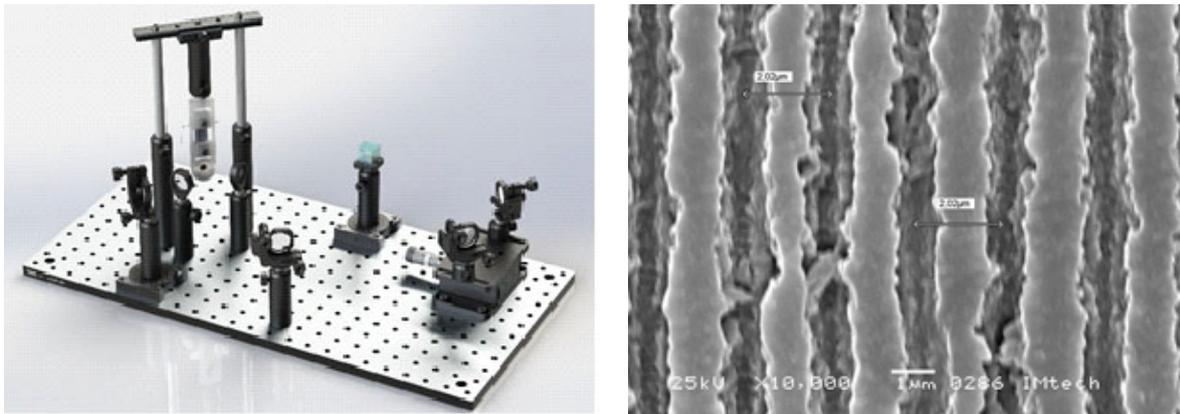


Bild 4: CAD-Modell des Aufbaus zur Erzeugung lithographisch ablativer optischer Gitter und REM-Aufnahme eines mittels 3D-Scanner direkt ablatierten Gitters.

Herstellung von femtosekundengelasertem schwarzem Silizium

Der Aufbau des Black Silicon Scanners ermöglichte die Prozessierung von Siliziumwafern zur Herstellung von schwarzem Silizium. Unter Variation der Prozessparameter Repetitionsrate, Fluenz und Anzahl der Einzelpulse pro Spot konnten erste Parameter zur Erzeugung der für schwarzes Silizium typischen nadelförmigen Nanostrukturen erfolgreich ermittelt werden. In weiteren Experimenten gelang es durch mäanderförmiges Scannen der ultrakurzen Laserpulse über das Substrat, flächig homogene Nanostrukturen herzustellen. Zur Charakterisierung der entstandenen Proben wurde eine Ulbrichtkugel in ein vorhandenes UV-VIS-NIR Spektrometer integriert. Dieser Aufbau ermöglichte die Messung von Reflexion, Transmission und Absorption des schwarzen Siliziums, und stellte somit eine wichtige Voraussetzung für die durch den UKP-Laserprozess gesteuerte Optimierung der Absorptionseigenschaften des Black Silicon dar. Als zweite Möglichkeit zur Charakterisierung der geometrischen Nanostruktur wurde ein Rasterelektronenmikroskop herangezogen. Die Weiterentwicklung des Scanners ermöglichte zudem eine Prozessierung der Substrate unter definierter Prozessgasatmosphäre, um eine Schwefeldotierung im Strukturierungsprozess zu ermöglichen. Für die Umsetzung dieses Teilprozesses war eine Analyse der Prozessabgase erforderlich, welche mittels Massenspektrometrie erfolgte. Auf

Basis dieser Untersuchung konnte ein Absorbersystem zur Neutralisation der entstehenden Prozessgase entwickelt und aufgebaut werden.

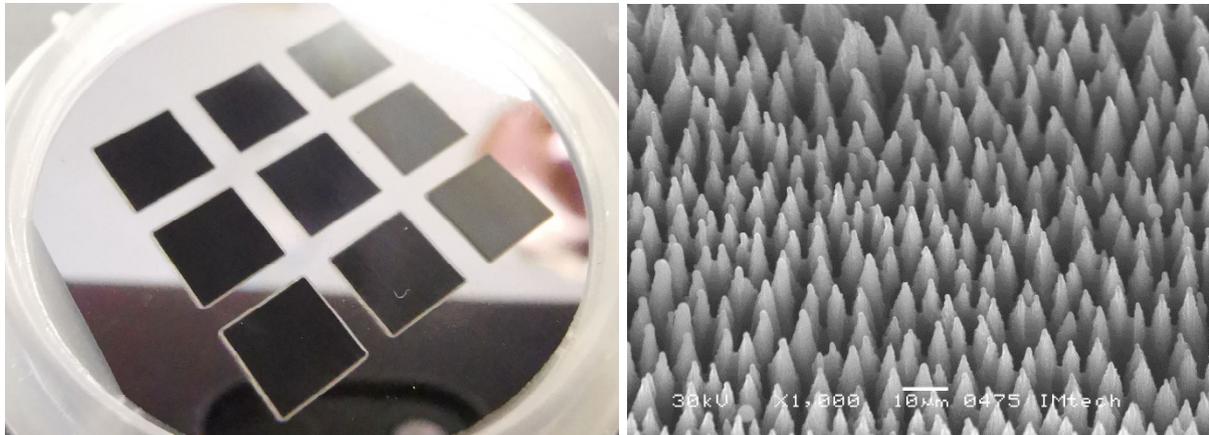


Bild 5: Makroskopisches Foto und REM Aufnahme von femtosekunden-gelasertem Black Silicon

4.2 FemtoBlack

- Projekttitle:** Femtosecond laser sulfur hyperdoped black silicon for infrared photonic applications
- Projektpartner:** InfraTec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik, Dresden
Photonics Hub GmbH, Wörrstadt
Aalto University, Dep. of Electronics and Nanoengineering, Espoo, Finnland
Beneq Oy, Thin Film Solutions, Espoo, Finland
EIFys Oy, Black silicon photodiodes, Espoo, Finland
Noptel, Optoelectronic distance and position sensors, Oulu, Finland
- Projektlaufzeit:** 01. 05. 2020 – 30. 04. 2023
- Projektförderung:** BMBF: Internationalisierung von Spitzenclustern, Zukunftsprojekten und vergleichbaren Netzwerken; FKZ: 03INT071AA

Die Funktionalisierung von Silizium ist eine Methode, um neue Materialeigenschaften zu erhalten. Durch Bestrahlung von Silizium mit hochenergetischen fs-Laserpulsen entsteht gleichzeitig eine Oberflächenstruktur aus bis 20 µm hohen Mikrokegeln, die das Licht zwischen den Kegeln einfängt, und eine oberflächennahe schwefelhyperdotierte Si-Schicht. Diese Hyperdotierung führt zu Energiezuständen innerhalb der Bandlücke von Silizium, die eine Absorption von Photonen im sub-Bandlückenbereich von nahezu 1 ermöglichen.

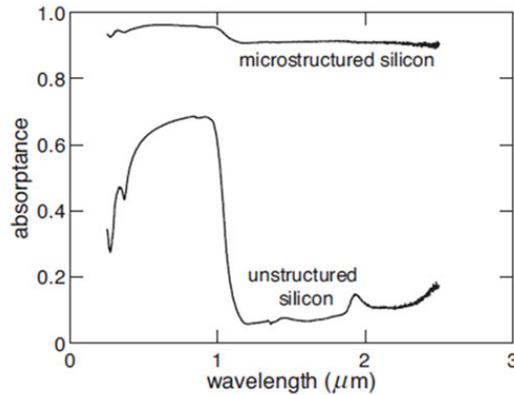
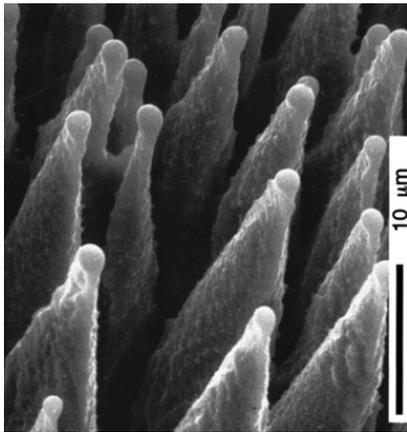


Bild 6: Links: Mikrostrukturen auf Silizium nach der Bearbeitung mit fs-Laserpuls in SF_6 -Atmosphäre (vergl. T.-H. Her, R. J. Finlay, C. Wu et al., "Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses," *Applied Physics Letters* 73 (1998) 1673–1675). Rechts: Spektrales Absorptionsverhalten von unstrukturiertem und strukturiertem Silizium (vergl. J. E. Carey, *Femtosecond-laser microstructuring of silicon for novel optoelectronic devices*, Dissertation, Harvard University 2004).

Photodetektoren, die im nahen Infrarot Wellenlängenbereich (1-5 μm) arbeiten, sind für spektroskopische Anwendungen und IR-Wärmebilder von großer Bedeutung, da diese Wellenlängen innerhalb des atmosphärischen Fensters liegen und daher die Absorption in der Atmosphäre minimal ist. Dieses mit fs-Laserpulsenschwefelhyperdotierte Silizium (fs-hSi) zeichnet sich durch eine hohe Absorption genau in diesem Wellenlängenbereich aus und ist daher ein vielversprechendes Material, das teure und häufig schwierig abzuscheidende IR-Sensormaterialien wie InGaAs, InSb oder HgCdTe ersetzt.

Ein weiterer Ansatz zur Erhöhung der IR-Absorption im NIR von Silizium ist die Induced Junction-Technologie. Dort wird mit einer durch Atomic Layer Deposition (ALD) abgeschiedenen Aluminiumoxidschicht ein durch reaktives Ionenätzen mikrostrukturierter induzierter pn-Übergang in Silizium erhalten. Dies beinhaltet keine Hyperdotierungsprozesse und ermöglicht eine hocheffiziente Erfassung elektrischer Ladung.

Ziel von FemtoBlack ist es, sensorrelevante Eigenschaften von fs-hSi und nicht hyperdotiertem, fs-gelasertem schwarzen Silizium (fs-bSi) zu untersuchen, um ein geeignetes Konzept für die Implementierung von fs-hSi und fs-bSi in Nah- und Mittel-IR-Sensoren zu entwickeln. Das FemtoBlack-Projekt ist Teil des Internationalisierungskonzepts von Photonics Hub und soll von der umfassenden Strategie und dem Netzwerk bei der Umsetzung und Verwertung der Projektergebnisse profitieren.

WP	Task	1. year	2. year	3. year
0	Preparatory work	all partners		
1	Establishing fs-laser processes including characterization methods	IMtech		
		InfraTec		
2	Workflow for post hyperdoping processes including characterization		Aalto	
3	Development of passivation scheme for fs-hSi			
		Beneq		
4	Processing and characterizing lifetime samples			
5	Adapting ALD machines for fs-hSi			
6	Development of the concept for the sensor element for fs-hSi, and fs-bSi	Noptel		
		EIFys		
7a	Sensor element: implementation and metallization			
7b	Electrical characterization			
8	Detector: choice and sourcing of components, assembly and characterization			
9	Promotion of project results, network	Photonics Hub		
A	Project documentation, publication, meetings	all partners	M1	M2
				M3

Milestone M1: fs-hSi and fs-bSi process established

Milestone M2: passivation scheme and sensor element concept developed

Milestone M3: detector prototype assembled and performance quantified

Bild 7: Arbeitsplan des Projekts FemtoBlack.

Im ersten Projektjahr von FemtoBlack ist vorgesehen zunächst die Sensorleistung beeinflussende Parameter zu sichten und zu bewerten (WP0). Davon ausgehend legen die beteiligten Partner den zu untersuchenden Bereich der Parameter fest. Die Partner spezifizieren die Anforderungen der Anwendungen an das Sensorelement und konzipieren den Aufbau dieses Elements. Es wird begonnen den Femtosekunden-Laserprozess für fs-hSi zu entwickeln (WP1) und an nachfolgende Bearbeitungsprozesse anzupassen sowie Materialeigenschaften zu charakterisieren (WP2). Außerdem beginnt das IMtech die Entwicklung des Passivierungsprozesses für fs-hSi mittels Atomlagenabscheidung von Aluminiumoxid und weiteren Schichten (WP3). Parallel beginnt die Entwicklung des Sensorelements basierend auf fs-hSi und fs-bSi (WP6).

Im zweiten Projektjahr ist der finale fs-hSi Laserprozess inklusive Nachbehandlung final optimiert (WP1 und 2). Der Passivierungsprozess ist entwickelt und festgelegt (WP3). Das Projektteam beginnt mit der Herstellung von Ladungsträger-Lebensdauer-Proben (WP4). Das Sensorkonzept ist für beide Materialarten fertiggestellt (WP6). Es wird begonnen das Sensormaterial zu metallisieren und elektrisch zu charakterisieren (WP7a, b).

Das dritte Projektjahr wird genutzt, um aus den bisherigen Entwicklungen im Bereich der Passivierung und Lebensdauerermessungen zu verifizieren (WP3 und 4). Diese Erkenntnisse

fließen dann in die Herstellung der finalen Sensorelemente ein. Der beste Metallisierungsprozess wird genutzt, um das Sensormaterial zu kontaktieren. Abschließend werden diese Sensorelemente elektrisch charakterisiert und zum Detektorbau verwendet.

4.3 DiffraLicht

Projekttitle: Diffraktiv optische Elemente zur Lichtlenkung in transparenten Medien

Projektpartner: Unique Lights Produktion & Vertrieb GmbH, Bad Lauterberg

LightFab GmbH, Aachen

Lighttrans UG, Jena

Hochschule Harz, Wernigerode

Projektlaufzeit: 01. 01. 2020 – 31. 12. 2022

Projektförderung: BMBF: FHProfUnt; FKZ: 13FH212PX8

Diffraktiv optische Elemente (DOEs) ermöglichen es, beliebige Lichtmuster mittels Interferenz zu erzeugen. Hierzu wird die Phase des einfallenden Lichtes durch Änderung der optischen Weglänge der einzelnen optischen Teilstrahlen gezielt manipuliert. Fokussierte ultrakurze Laserpulse (UKP) induzieren in transparenten Materialien in der Nähe des Fokus eine Brechzahländerung, welche auf ein kleines Volumenelement (Voxel) beschränkt ist.

Durch gezieltes Hervorrufen und Überlagern dieser Voxel lassen sich nahezu beliebige 3D-Strukturen innerhalb von transparenten Substraten erzeugen. Gleichzeitig lassen sich, aufgrund der geringen Brechzahlmodulation, hohe Transmissionsgrade von 99% erreichen.

Dies ermöglicht die Fabrikation von transparenten, schaltbaren Lichtflächen. Im ausgeschalteten Zustand sind die Lichtflächen transparent, während im eingeschalteten Zustand die Fläche lateral homogen Licht abgibt. Das ermöglicht designtechnisch schwebend erscheinende Leuchten und schaltbare Raumtrennelemente mit Beleuchtungsfunktion. Bild 8 zeigt die Prozesskette zur Herstellung eines Circular Dammann-Gratings (CDG) ausgehend von einem Quarzglassubstrat mittels lokaler Brechzahländerung, induziert durch UKP.

In Bild 9 sind zwei mittels UKP induzierte CDGs (im Zentrum der roten Kreise) in einem Quarzglassubstrat (a), eine Mikroskopieaufnahme eines der CDG (b) und das entstehende Intensitätsmuster, in Falschfarben, im Fernfeld (c) gezeigt. Als Beleuchtungsquelle wird ein He-Ne-Stablaser verwendet. Das CDG ist aufgrund des hohen Transmissionsgrades nur schwach sichtbar.

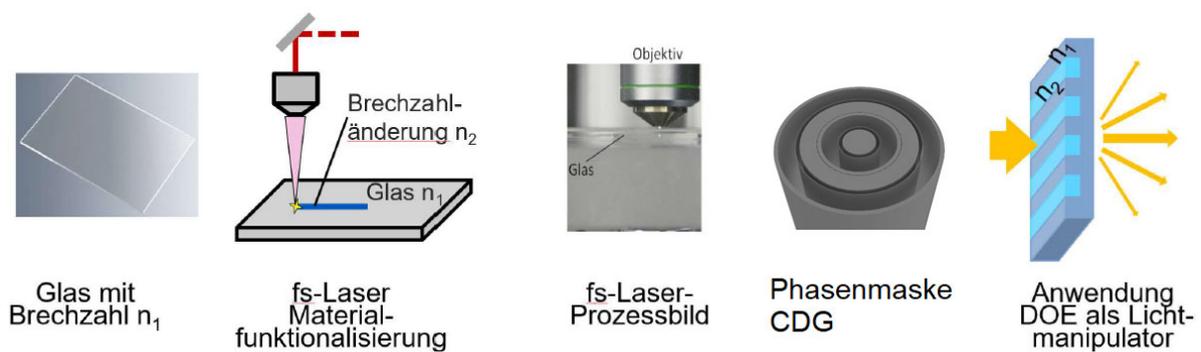


Bild 8: Prozessschritte vom Glassubstrat zum DOE am Beispiel von Quarzglas und der Fabrikation eines Circular Damann-Gratings (CDG).

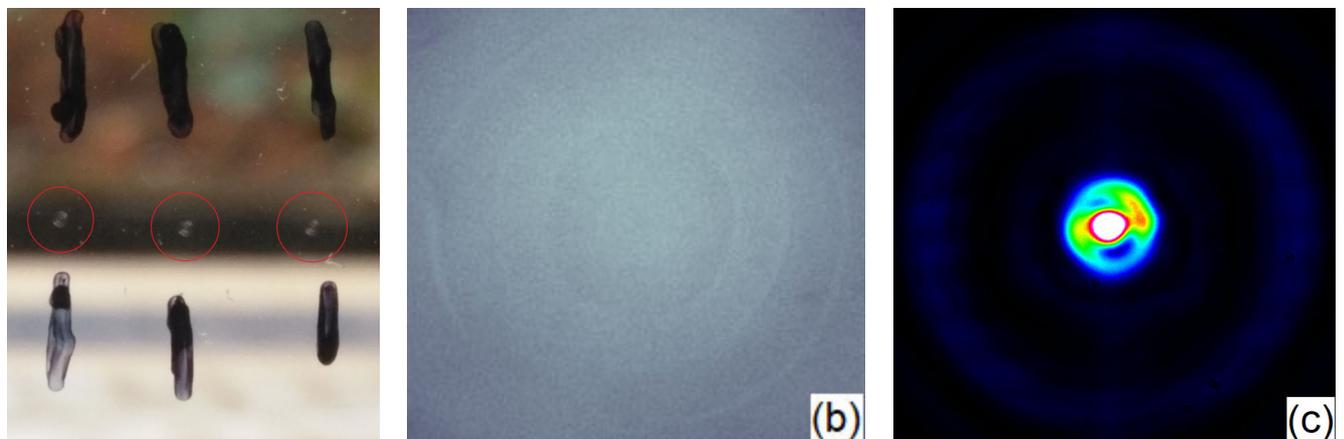


Bild 9: (a) Mittels UKP induzierte CDGs (im Zentrum der roten Kreise) in einem Quarzglassubstrat, (b) kontrasterhöhte Mikroskopieaufnahme und (c) entstehendes Intensitätsmuster, in Falschfarben, im Fernfeld.

Neben dem Einsatz zur Beleuchtung hat die angestrebte DOE-Technologie das Potenzial im Bereich der Erweiterten Realität (Augmented Reality) im Automobilbereich neue Maßstäbe zu setzen. Dort bekommt der Fahrer Information direkt in der Windschutzscheibe eingeblendet. Bisher wurde das mit sogenannten Head-up-Displays realisiert, wo ein Projektor und eine speziell gefertigte Windschutzscheibe das Licht des projizierten Bildes ins Auge des Fahrers reflektiert. Der Schwierigkeit bei dieser Technologie ist, dass das Bild bei der schiefwinkligen Projektion für den Fahrer verzerrungsfrei dargestellt werden muss und eine spezielle Windschutzscheibe zur Bilddarstellung benötigt wird. Mit der DOE-Technologie können diese Probleme gelöst werden, da keine Freistrahlsprojektion inklusive Verzerrungen vorliegt, und der Laserprozess auf nahezu jeder beliebigen Windschutzscheibe anwendbar ist.

4.4 LasDif

Projekttitle:	Bestimmung der Dauer von ultrakurzen Laserpulsen mittels diffraktiv-optischen Elementen
Projektpartner:	Hochschule Darmstadt (hDa) Topag Lasertechnik GmbH, Darmstadt Primes GmbH, Pfungstadt Newport Spectra-Physics GmbH, Darmstadt Kompetenznetzwerk Optische Technologien Optence e.V., Wörrstadt
Projektlaufzeit:	01. 06. 2018 – 30. 09. 2019
Projektförderung:	Hessische Ministerium für Wissenschaft und Kunst, Forschung für die Praxis, FKZ: wird nicht vergeben

Ausgangsfragen und Zielsetzung des FuE Projektes

Femtosekunden-Laser befinden sich an der Schwelle der industriellen Anwendung mit stetig wachsender Verbreitung aber noch zahlreichen unbefriedigenden Grundbedingungen. Eine davon ist die Messung von kurzen Pulsdauern. Die aus wissenschaftlicher Verwendung übernommenen Verfahren (Autokorrelation, FROG, SPIDER, ...) enden in aufwendigen Tischgeräten mit Kosten jenseits von 15.000 €. Für die industrielle Anwendung besteht dringender Bedarf an kostengünstiger Sensorik. Ziel des Projektes war die Entwicklung eines kompakten, auf diffraktiv optischen Elementen (DOE) basierenden, günstigen Sensors zur Vermessung von ultrakurzen Laserpulsen, und die Evaluation von Mikrostrukturierungsverfahren zu seiner Herstellung.

Darstellung der erreichten Ergebnisse und Meilensteine

Simulation

Am Anfang des Projektes stand die Simulation der erforderlichen diffraktiv optischen Elemente. Dieser Teil wurde von der Hochschule Darmstadt übernommen. Aus den Simulationen ergab sich die Geometrie für die Mikrostrukturierungsprozesse.

Mikrostrukturierung

Zur Erreichung der notwendigen Phasenverschiebungen der Teilpulse bei einem 100 fs langen Laserpuls und einer Brechzahl des verwendeten Glassubstrats von 1,5 ist es notwendig Stufen im DOE von ca. 40 μm Tiefe zu ätzen. Da für ein DOE möglichst senkrechte Ätzflanken gefordert sind, sollte der Tiefenätzprozess in der im Reinraum des IMtech zur Verfügung stehenden RIE-ICP-Ätzanlage Oxford Cobra 100 (reaktive Ionenätzanlage mit induktiv gekoppeltem Plasma) durchgeführt werden.

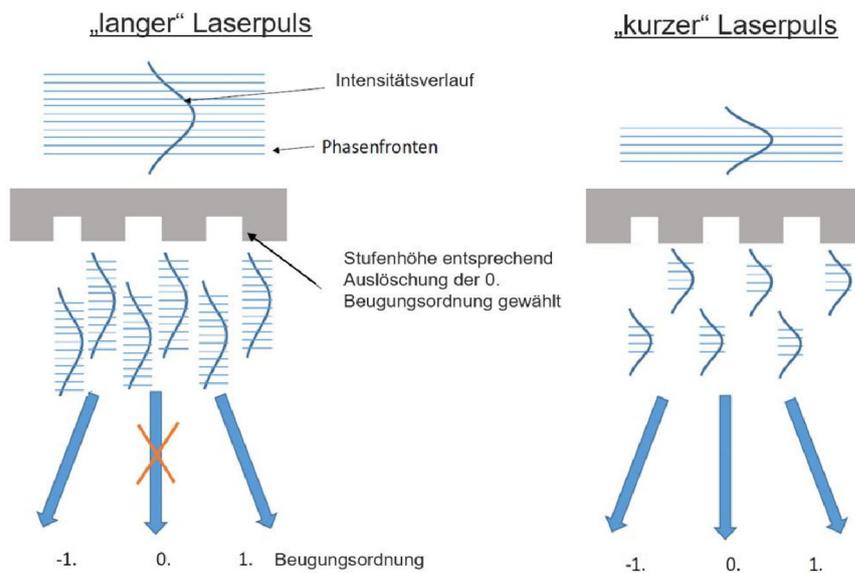


Bild 10: Prinzip des Sensors zur Vermessung von ultrakurzen Laserpulsen

Für die Tiefenätzung von Quarzglas in dieser Anlage steht ein von Oxford entwickeltes Ätzprogramm zur Verfügung. Die Selektivität zwischen dem von Oxford bevorzugtem Maskensystem aus Nickel und Quarzglas beträgt bei diesem Ätzprozess 1:40. Das heißt, für eine 40 µm tiefe Ätzung in Quarzglas wird eine 1µm dicke Maskierschicht aus Nickel benötigt. Mit einer ähnlichen Selektivität ist bei einer Maskierschicht aus Chrom zu rechnen. Typisch werden derartige Maskierschichten aus Nickel in einem galvanischen Prozess in Anlehnung an die LIGA-Technik (*L*ithographie, *G*alvanik und *A*bformung) hergestellt. Hierbei wird auf dem zu ätzenden Substrat in einem ersten Schritt eine Metallisierung aufgebracht, die im Folgenden als Startschicht für eine Nickelgalvanik dient. Je nach verwendetem Substrat ist es notwendig, einen Haftvermittler unter die Startschicht zu legen.

Nach dem Aufbringen der Startschicht für die Galvanik wird dann durch Lithographie mit einem Dickschicht-Resist die Struktur der Maske definiert. Hiernach wird das Nickel galvanisch abgeschieden und der Resist wieder entfernt.

Im Experiment wurden drei verschiedene Nickelbäder verwendet. Mit allen drei Bädern konnten erfolgreich Nickelschichten abgeschieden werden. Durchgeführt wurden die Experimente auf Startschichten aus gesputtertem Nickel (100 nm) und aus gesputtertem Kupfer (100 nm). In beiden Fällen wurde zwischen Quarzglas-Substrat und metallischer Startschicht ein Haftvermittler aus Chrom (50 nm) eingesetzt. Auf den beschichteten Substraten wurde jeweils eine Lithographie mit dem Negativresist AZ nLof 2020 mit einer Schichtdicke von 2,2 µm durchgeführt. Die Belichtung erfolgte mit der Testmaske "Extras" im Maskaligner Sues MJB21 mit einer Dosis von 120 mJ/cm².

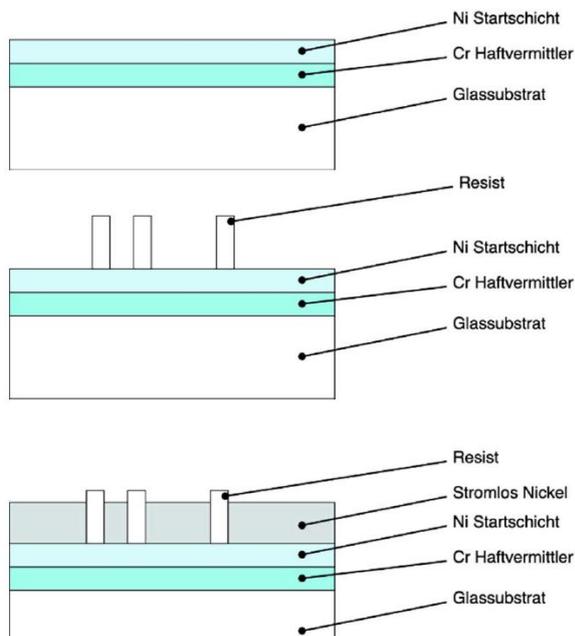


Bild 11: Schematische Darstellung der Einzelschichten

Die unter Verwendung von zwei kommerziellen Bädern entstandenen Nickelschichten waren feinkristallin und dickenhomogen, lösten sich jedoch nach spätestens 12 Stunden vom Substrat. Ein selbst angesetztes Bad führte zu extrem grobkörnigen Strukturen, welche zudem eine schlechte Dickenhomogenität aufwiesen. Alle entstandenen Schichten eigneten sich somit nicht zur weiteren Prozessierung.

Im Rahmen des Projektes konnte grundsätzlich gezeigt werden, dass sich Maskiersysteme für trockenchemische Ätzprozesse in Quarzglas durch stromlose Abscheidung von Nickel herstellen lassen. Als nächster Schritt wäre die für den RIE-ICP-Prozess erforderliche Schichtdicke bei guter Schichthftung zu erreichen. Mit der Einrichtung des Simulationslabors, der vollständigen Analytik für optische Mikrostrukturen an der hDa im Verbund mit den Realisierungsmöglichkeiten am IMtech steht eine vollständige Prozesskette für Forschungsvorhaben zur Verfügung. Hervorzuheben ist die erreichte enge Vernetzung der Forschungskompetenzen beider Hochschulen. Erste Resultate im neuen Forschungsfeld DOE-Strukturen für ultrakurze Laserpulse konnten gemeinsam realisiert werden.

4.5 LiDiOp

- Projekttitlel:** Lichtlenkung mittels diffraktiv optischer Elemente in transparenten Lichtflächen und Augmented Reality Anwendungen
- Projektpartner:** TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld
Hochschule Harz, Wernigerode
- Projektlaufzeit:** 19. 05. 2019 – 31. 03. 2021
- Projektförderung:** gefördert durch die interne Forschungsförderung der Hochschule RheinMain

Die Möglichkeit, Licht, das von der Kante in ein scheibenförmiges transparentes Medium eingespeist wird, im Medium führen und gezielt senkrecht zur Scheibenfläche wieder herausleiten zu können, kann die aktuelle Technologie im Bereich von transparenten Lichtflächen sowie Erweiterter Realität (Augmented Reality „AR“) signifikant voranbringen. Entscheidend dabei ist, dass dieses Medium einerseits individualisierbare lichtlenkende Eigenschaften besitzt und dabei vollkommen transparent ist. Bild 12 zeigt eine transparente Lichtfläche als Anwendung in einer LED-Leuchte und eine Visualisierung der Anwendung im Bereich AR.



Bild 12: Einsatz von diffraktiv optischen Elementen (DOEs) in (a) transparenten Lichtflächen und (b) im Fahrercockpit eines Automobils (Quelle: Texas Instruments)

Zur Veranschaulichung der angestrebten DOE-basierten Innovationen zeigen Bild 13(a) ein gewünschtes Beugungsbild und Bilder 13(b), 13(c) das zugehörige simulierte DOE. Das Simulationsergebnis sind 3D-CAD Daten, die mit dem Femtosekundenlasersystem (fs-Lasersystem) unter Zuhilfenahme eines 3D-Mikroscanners am IMtech direkt in optische Medien eingeschrieben werden.

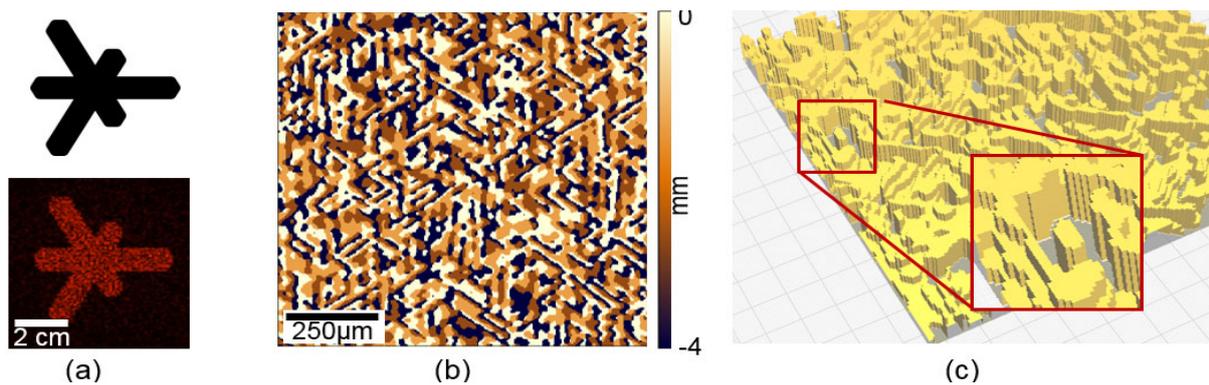


Bild 13: Simulation mittels Virtual Lab (Voll-Lizenz am IMtech vorhanden) von DOEs: (a) oben: gewünschtes Beugungsbild in 1 m Entfernung zum DOE, unten: simuliertes Beugungsbild bei Beleuchtung des DOE, (b) Aufsicht des simulierten DOE mit Tiefenangabe bis wohin die Brechzahl verändert werden muss (angenommene Brechzahlerhöhung $\Delta n = 1 \cdot 10^{-4}$), (c) 3D-Ansicht von (b).

4.6 Photonische Wertschöpfungskette

- Projekttitle:** Hochtechnologie und Wirtschaftlichkeit:
Studentisches Lernen an einer photonischen Wertschöpfungskette
- Projektpartner:** Prof. Dr. Oliver Kunath. Wiesbaden Business School, Hochschule RheinMain
- Projektlaufzeit:** 28. 05. 2019 – 31. 12. 2021
- Projektförderung:** gefördert durch zentrale Mittel der Hochschule RheinMain

Das Projekt „Photonische Wertschöpfungskette“ ermöglicht die Ausbildung von Studierenden und Promovierenden der HSRM an photonischen Wertschöpfungsketten. Die Studierenden lernen diese für verschiedene Skalierungsstufen technologisch zu erfassen, damit zu experimentieren und sie insbesondere in Abhängigkeit der Skalierung ökonomisch zu bewerten. Dies wird anhand zweier repräsentativer Beispiele von femtosekunden (fs)-laserbasierten photonischen Wertschöpfungsketten realisiert, mit welchen neuartige optische und halbleitende Funktionswerkstoffe hergestellt und auf ihre Wirtschaftlichkeit hin untersucht werden können. Damit kann der Markterfolg eines fs-laserbasierten Funktionswerkstoffs und dessen Einsatz in einer konkreten industriellen Anwendung ökonomisch bewertet werden. Die Technologiebasis der mit dem Projekt realisierten photonischen Wertschöpfungsketten in je zwei Skalierungsstufen steht an der HSRM auch zukünftig, über das Projekt hinaus, zur Verfügung, um mit fortgeschrittenen Studierenden

weitere Funktionsmaterialien zu realisieren und zu bewerten sowie den wissenschaftlichen Nachwuchs über Promotionen im Rahmen von Folge-Forschungsprojekten auszubilden.

Photonische Wertschöpfungskette I: fs-gelasertes Schwarzes Silizium

Werden hochenergetische fs-Laserpulse unter schwefelhaltiger Atmosphäre auf Silizium geschossen, so entsteht fs-gelasertes schwefel-hyperdotiertes Schwarzes Silizium (fs-hSi). Während des fs-Laserprozesses werden gleichzeitig eine Oberflächenmikrostruktur und eine Hyperdotierung mit Schwefel erzeugt. Dies verändert die elektronische Bandstruktur, was veränderte optische Eigenschaften zur Folge hat: Nämlich die Absorption von Licht im infraroten Wellenlängenbereich, welche Standard-Silizium nicht aufweist. Bild 14 zeigt eine Rasterelektronenmikroskopie(REM)-Aufnahme) der Oberfläche von fs-hSi und dessen Absorptionseigenschaften in Abhängigkeit der Wellenlänge. Das ist insbesondere interessant, wenn ein Material erforderlich ist, mit dem Infrarotstrahlung wie z.B. in Infrarotkameras detektiert werden soll. Normalerweise wird dafür der Halbleiter Germanium benutzt. Dieser ist jedoch um ca. einen Faktor 20 teurer als Schwarzes Silizium, was Schwarzes Silizium für eine Anwendung in Infrarotsensoren per se prädestiniert.

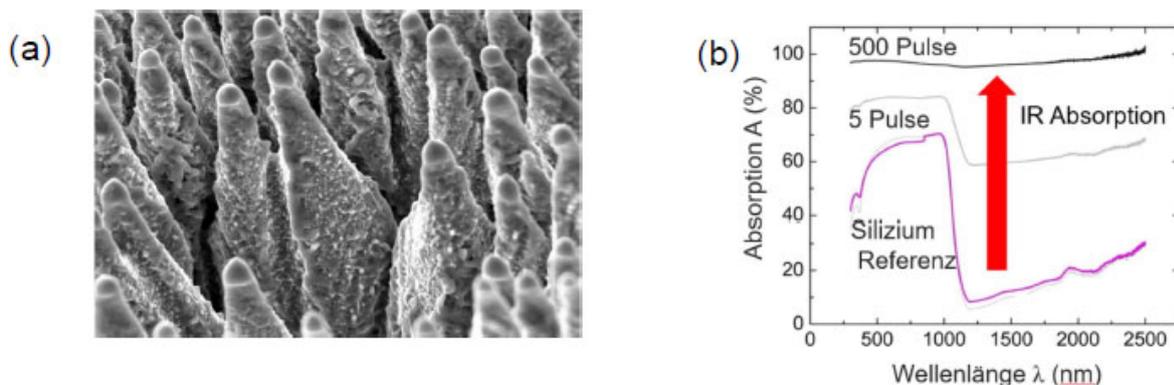


Bild 14: (a) REM-Bild von Schwarzem Silizium (fs-hSi). (b) Absorption von fs-hSi und einer Siliziumreferenzprobe: Die Absorption oberhalb von 1100 nm steigt stark an.

Photonische Wertschöpfungskette II: Diffraktiv optische Elemente (DOEs)

Diffraktiv optische Elemente (DOEs) unter Beleuchtung nutzen unterschiedliche optische Weglängen der Teilstrahlen zu Phasenmodulationen, wodurch Interferenzmuster entstehen. So können durch geschickte Auslegung nahezu beliebige Intensitätsmuster in den Beleuchtungsstrahl hineinmanipuliert, bzw. der Beleuchtungsstrahl in seiner Richtung abgelenkt werden. Zur Erzeugung der unterschiedlichen optischen Weglängen im DOE werden Mikrostrukturen mit verändertem Brechungsindex im Material genutzt wie Bild 15(a) illustriert. Die Brechzahländerung kann durch Bestrahlung mit fs-Laserpulsen hervorgerufen werden. Dadurch sind Transmissionsgrade der DOEs von 99% erreichbar, wodurch diese

DOEs quasi transparent sind. Werden diese DOEs wie in Bild 15(b) in scheibenförmiges transparentes Material eingebracht, so kann seitlich eingespeistes Licht bzw. darin enthaltene Bildinformationen um bis zu 90° abgelenkt werden.

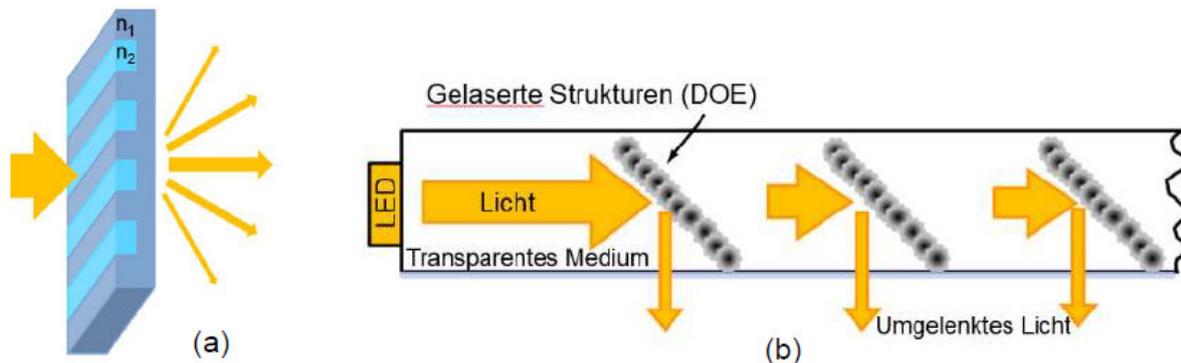


Bild 15: (a) Funktionsweise eines DOE: Der Beleuchtungsstrahl wird an periodischen Strukturen unterschiedlicher Brechzahl n_1 , n_2 gebeugt. (b) Querschnitt durch eine lichtleitende Platte (Glas- oder Kunststoff) mit gelaserten Weißlicht-DOEs zur Lichtlenkung.

Damit hat diese DOE-Technologie das Potenzial neue Maßstäbe für Anwendungen in der Leuchtenindustrie (transparente Leuchten) und in der Erweiterten Realität (Augmented Reality), z.B. im Automobilbereich zu setzen. Dort bekommt der Fahrer Informationen direkt in der Windschutzscheibe eingeblendet. Bisher wurde das mit sogenannten Head-up-Displays realisiert, die mittels eines Projektors und einer speziell gefertigten Windschutzscheibe das Licht des projizierten Bildes ins Auge des Fahrers reflektieren. Die Schwierigkeit dabei ist, dass das Bild bei der schiefwinkligen Projektion für den Fahrer verzerrungsfrei dargestellt werden muss, um die dargestellten Informationen sinnvoll verarbeiten zu können und daher eine speziell beschichtete Windschutzscheibe zur Bilddarstellung benötigt wird. Mit der DOE-Technologie können diese Probleme kostengünstiger gelöst werden, da keine Freistrahlsprojektion inklusive Verzerrungen vorliegt, der Laserprozess auf nahezu jeder beliebigen Windschutzscheibe anwendbar ist und eine Fertigung spezieller Windschutzscheiben entfallen kann.

Projektziele

Zur Realisierung der Ziele des Projektantrags sind mindestens zwei Skalierungsstufen der exemplarischen photonischen Wertschöpfungsketten notwendig. Mit einer höheren Skalierungsstufe ist eine Wertschöpfung gemeint, die um ca. eine Größenordnung verbessert ist, deren Produktionskosten also um den Faktor 10 kleiner sind. Eine höhere Skalierungsstufe kann durch eine entsprechende Vergrößerung der Laserprozess-

geschwindigkeit realisiert werden. Diese ist dabei insbesondere von der Durchschnittsleistung der Laserstrahlquelle abhängig. Außerdem muss die Repetitionsrate, also die Anzahl der Pulse, die pro Sekunde von der Strahlquelle emittiert werden können, ausreichend hoch sein, um die Durchschnittsleistung auch passend auf der Probe zu platzieren.

Am IMtech steht aktuell eine wissenschaftliche fs-Strahlquelle (Spectra Physics, Spitfire ACE, Pulsdauer $\tau = 100$ fs, Durchschnittsleistung $P = 7$ W, Repetitionsrate $f_{\text{rep}} = 10$ kHz) mit einem selbstgebauten Laserscanner basierend auf Linearachsen zur Verfügung. Dieses Femtosekundenlaserlabor wurde im zuvor beschriebenen Projekt UltraLIMO aufgebaut. Darüber hinaus ist ein 3D-Scanner zur Realisierung der Phasen-DOEs angeschafft worden. Damit können beide oben dargestellten photonischen Wertschöpfungsketten in einer ersten Skalierungsstufe dargestellt werden. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Abhängigkeit der Skalierung ist ein entsprechend leistungsfähigerer Laser notwendig.

In diesem Projekt wird eine UKP-Laserstrahlquelle mit hoher mittlerer Leistung ($P > 100$ W) angeschafft. Da aktuelle Hochleistungsstrahlquellen Laserpulse mit Pulsdauern $\tau > 500$ fs emittieren, wird zur besseren Vergleichbarkeit ein Pulskompressor eingesetzt. In einer gasgefüllten Herriott Zelle werden Pulse durch Selbstphasenmodulation auf $\tau = 100$ fs komprimiert, sodass die Pulsdauer beim Prozessübertrag auf das neue System konstant bleibt.

Der Einsatz hoher mittlerer Leistungen erfordert einen angepassten Laserprozess um qualitätsmindernde Effekte wie Wärmeakkumulation und die Zerstörung des Werkstücks durch zu hohe Fluenzen zu vermeiden. Ein Ansatz hierfür ist der Einsatz eines Polygonscanners, mit dem extrem hohe Scangeschwindigkeiten von $v > 1.000.000$ mm/s bei entsprechend hoher Repetitionsrate der Laserstrahlquelle erreicht werden können. Alternativ zu einem schnellen Scansystem eignet sich der Einsatz von prozessoptimierten Intensitätsverteilungen. Durch Phasenmodulation mittels statischer oder dynamischer diffraktiver Optik wird die Strahlform verändert, um die Fluenz zu reduzieren und somit höhere mittlere Leistungen im Prozess zu nutzen. Dieser Ansatz ermöglicht darüber hinaus die Prozessparallelisierung durch Strahlteilung. Im Projekt „Photonische Wertschöpfungskette“ wird der Ansatz der dynamischen Strahlformung durch den Einsatz eines räumlichen Lichtmodulators verfolgt.

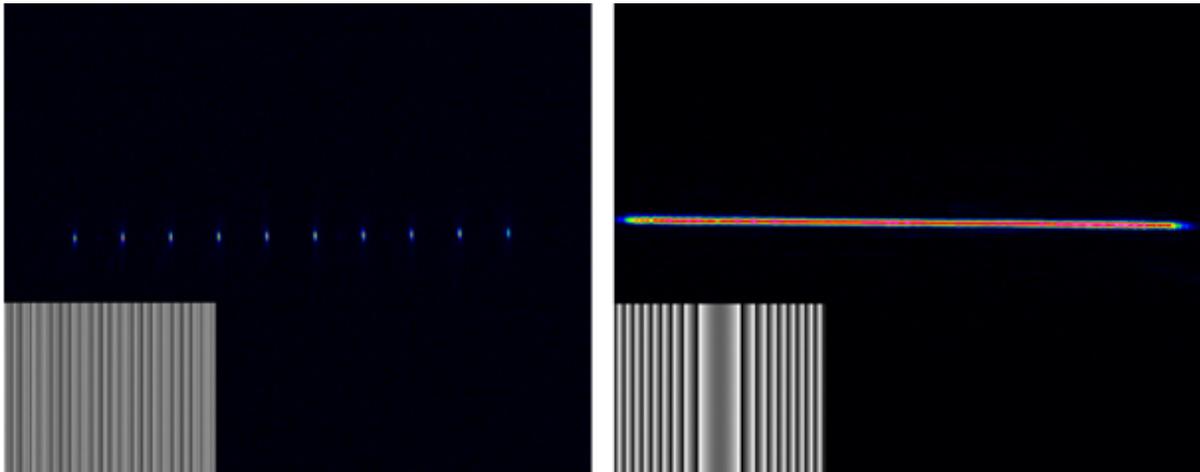


Bild 16: Links: Mittels räumlichen Lichtmodulators erzeugtes 1x10 Multispotarray. Rechts: 1D-Tophat Linienprofil. Die eingesetzten Bilder zeigen die dazugehörigen Phasenverteilungen. Die Berechnung für die Strahlteilung erfolgte über den iterativen Fourier-Transformations-Algorithmus und Optical Map Transformation für das Linienprofil.

In der AG Photonik des IMtech wird das geplante Laser-, Scan- und Strahlformsystem in Betrieb genommen und der Übertrag der Prozessparameter beider Wertschöpfungsketten durchgeführt. Neben dem Vorantreiben aktueller Forschungsschwerpunkte der AG Photonik ermöglicht dieses flexible Hochleistungssystem die Erschließung neuer Gebiete im Bereich der fs-Laser Materialbearbeitung und -funktionalisierung. Neben den technischen und naturwissenschaftlichen Fragestellungen wird in diesem Projekt eine wirtschaftliche Bewertung von Laserprozessen in Kooperation mit dem Fachbereich „Wiesbaden Business School“ der Hochschule RheinMain durchgeführt.

4.7 Engineering 4.0, Teilvorhaben im Themenfeld „Photonik / Mikrosystemtechnik“

Projekttitlel: Weiterentwicklung der Forschungsstrukturen und der Förderung des Wissenschaftlichen Nachwuchses im profilbildenden Forschungsschwerpunkt Engineering 4.0

Projektpartner: Prof. Dr. Andreas Brensing, Prof. Dr. Bernd Schweizer, Hochschule RheinMain

Projektlaufzeit: 01. 01. 2019 – 31. 12. 2021

Projektförderung: gefördert durch zentrale Mittel der Hochschule RheinMain im Rahmen des internen Doktorandenprogramms

Projektthema und Ziel: UKP-gelasertes Schwarzes Silizium zeigt zum einen minimale Reflexion (durch Lichteinfang in den Mikrostrukturen) und zum anderen eine Absorption deutlich über 96 % im Infraroten, ganz im Gegensatz zu Standard-Silizium, das aufgrund seiner Bandlücke von 1,1 eV im Infraroten gar nicht absorbiert. Bild 17(a) zeigt ein Mikroskopie-Bild dieses Schwarzen Siliziums. Das Problem des Schwarzen Silizium ist, dass erzeugte Ladungsträgerpaare so schnell rekombinieren, dass sie nicht mehr zur Stromgewinnung beitragen. Der Grund ist eine durch den Laserprozess geschädigte Siliziumkristallstruktur, die nicht einfach zu passivieren ist.

Bisher wurde die Infrarotabsorption als notwendige Bedingung für Ladungsträgererzeugung aus Infrarotstrahlung gezeigt. Die Erhöhung der Infrarotabsorption wird erreicht, indem beim Lasern unter schwefelhaltiger Atmosphäre Schwefel in das Siliziumkristallgitter eingebaut wird. Dieser erzeugt in der Bandlücke von Silizium zusätzliche Energieniveaus, die eine Absorption von Infrarot-Photonen ermöglichen: Im so veränderten Energiebandschema von Silizium wird dann durch ein Infrarot-Photon zunächst ein Elektron aus dem Valenzband in das Schwefelenergieniveau und von da aus durch Absorption eines oder mehrerer infraroten Photonen ins Leitungsband gehoben. Dies ist in Bild 17(b) gezeigt.

Im Projekt konnten wir außerdem nachweisen, dass Licht im Infraroten nicht nur absorbiert, sondern auch in Ladungsträger umgewandelt wird und ein Photostrom messbar ist. Mit einer ersten photovoltaischen Zelle Bild 17(c) konnte in Vorarbeiten eine Wirkungsgraderhöhung durch Infrarotabsorption gezeigt werden und Rekombinationsverluste auf Kristallgitterschädigung durch den Laserprozess sowie unzureichende Passivierung der gelaserten Siliziumoberfläche zurückgeführt werden.

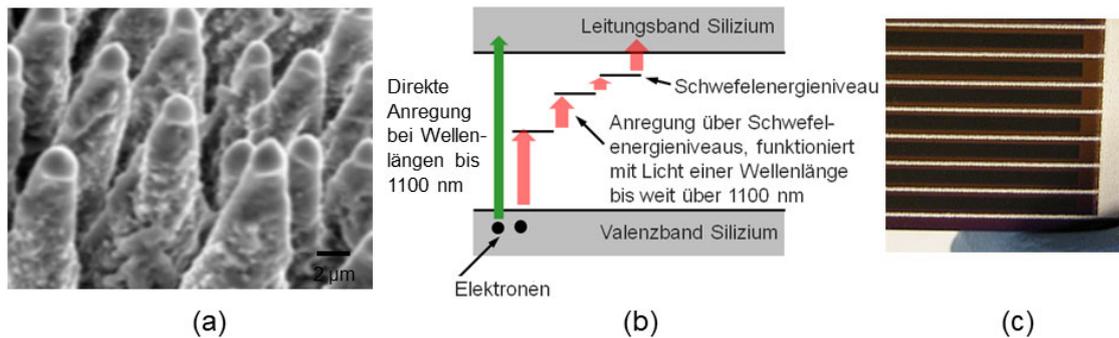


Bild 17: (a) Rasterelektronenmikroskopie-Bild von ultrakurzpulslaser-hyperdotiertem Schwarzem Silizium, (b) Energiebandschema und Funktionsprinzip von Schwarzem Silizium, (c) Solarzelle aus Schwarzem Silizium.

In der Masterarbeit von Simon Paulus (HSRM 2020) wurde untersucht, wie tief die verlustzeugende Laserschädigung ist. Es wurden RIE und IBE-basierte Rückätzprozesse entwickelt, die die Schädigung entfernen und die Infrarotabsorption erhalten. Somit kann jetzt die Infrarotabsorption von unerwünschter Materialschädigung isoliert werden.

Nächstes Ziel ist es Passivierungsschichten aus Siliziumnitrid, Siliziumoxid, Aluminiumoxid und Mehrschichtsystemen zu Passivierungszwecken zu entwickeln. Die Innovation besteht dann in der Entwicklung eines dielektrischen Schichtsystems, das Schwarzes Silizium so gut passiviert, dass Ladungsträgerlebensdauern $>100 \mu\text{s}$ erreicht werden können. Folgende innovative Ergebnisse sind zu erwarten:

- Verständnis der Laser-Material-Wechselwirkung beim Ultrakurzpulslaser-gelasierten Schwarzem Silizium
- Entwicklung eines angepassten Rückätzschrittes der oberflächennahen geschädigten Schicht
- Besseres Verständnis der Rekombinationsmechanismen durch DLTS-Messungen
- Stabile Passivierungsmethode für gelasertes Schwarzem Silizium
- Realisierung von Ladungsträgerlebensdauern von $>100 \mu\text{s}$

Seit Januar 2020 arbeitet Patrick McKearney als Doktorand an diesem Projekt.

4.8 Gasanalytik

Projekttitle:	Mikrosystemtechnik in der Gasanalyse
Projektpartner:	Emerson Process Management GmbH & Co. OHG, Hasselroth
Projektlaufzeit:	01. 08. 2019 – 31. 07. 2020
Projektförderung:	Emerson Process Management GmbH & Co. OHG, Hasselroth

Gemeinsam mit der Fa. Emerson Process Management wurde das Projekt MEGAS (siehe Jahresberichte u.a. 13/14 und 17/18) in einer Forschungsk Kooperation fortgesetzt.

Dieses Projekt endete geplant nach 12 Monaten zum 31. 07. 2020 mit der Lieferung einer Alphaserie von Gassensoren. Für 12 Monate konnte so eine 50 % Stellenfinanzierung von Martin Sommer (wiss. Mitarbeiter SB ITE) gesichert werden. Eine Fortsetzung auf Projektbasis ist von Seiten Emerson, auf Grund einer konzernweiten Vorgabe, nicht möglich. Nach Verzögerungen und langen Lieferzeiten auf Seiten von Emerson wurde aktuell die Lieferung einer Betaserie, auf deren Basis der Technologietransfer und die Überführung in ein reguläres Produkt entschieden wird, zusätzlich vereinbart.

Ebenfalls Bestandteil dieser Vereinbarung ist, dass Hr. Sommer von Emerson weiterhin beim Test der neu entwickelten Sensorstrukturen unterstützt wird, welche Teil seines laufenden Promotionsverfahrens (kooperative Promotion) sind.

Eine zukünftige erneute Zusammenarbeit, auch in Bezug auf neue Fragestellungen zur Gassensorik, ist von beiden Seiten ausdrücklich gewünscht.

Während der Projektlaufzeit wurden die in der bisherigen Zusammenarbeit entwickelten Strukturen prozesstechnisch optimiert und zwei Designs als sehr vielversprechend festgelegt (Alphaserie). Ziel ist – nach Charakterisierung der Alphaserie - die Betaserie mit nur noch einem Design bis Ende 09/20 zu liefern. Nach interner Validierung und Qualitätssicherung sollen die neu entwickelten Sensoren bis Ende des Jahres 2020 bisherige Produktlinien ablösen und in die Serienfertigung überführt werden.

Um eine gleichbleibende Ätzqualität der mikromechanischen Strukturen im Silizium mit hoher Selektivität der (100)-Ebenen gegenüber (111)-Ebenen und geringer Unterätzung von konvexen Ecken zu erreichen, wurde eine neue KOH-Ätzstation aufgebaut (Bild 18). Diese erlaubt das wirtschaftliche Ätzen von Strukturen mit dieser Anforderung. Die KOH-Ätzstation besteht im Wesentlichen aus einem doppelwandigen Reaktorglas sowie drei am Deckel angeflanschten Kühlern. An diesen kondensiert das Isopropanol, welches dem KOH zugegeben ist. Das Mischungsverhältnis bleibt so immer gleich und die Ätzlösung kann wiederverwendet werden.



Bild 18: Ätzstation für das anisotrope Ätzen von 4-Zoll-Siliziumwafern mit präzise definierter Ätzbad-Temperatur und -Zusammensetzung

4.9 TSPR-MS Epitopanalysator: Ein wegweisendes neues Gerät zur Epitop- und Affinitätsanalyse von Antikörpern

Projektpartner: Sunchrom GmbH (SUN), 61381 Friedrichsdorf
Steinbeis- Transferzentrum (STZ) Biopolymeranalytik und
Biomedizinische Massenspektrometrie, 65428 Rüsselsheim

Projektlaufzeit: 01. 04. 2019 – 31.12. 2020

Projektförderung: LOEWE, FKZ: HA 696/19-16

Antikörper finden in jüngster Zeit zunehmende Anwendung als Therapeutika für die Behandlung einer Vielzahl von Krankheiten; sie bilden derzeit die am schnellsten wachsende Gruppe von Medikamenten mit einem Umsatzvolumen von >100 Milliarden US-Dollar in 2016. Antikörper besitzen ebenfalls erhebliche Bedeutung in der Krankheitsdiagnostik; sie sind bereits unverzichtbar für eine Vielzahl von analytischen Laboruntersuchungen und verschiedenen Verfahren wie ELISA, Western Blot und Biosensor-Analytik. Dies gilt ebenso für die Diagnostik pathophysiologischer Antikörper in Immunreaktionen, z.B. in der Proteintherapie und in der Transplantationsmedizin. Trotz der großen medizinischen

Bedeutung von Antikörpern sind Methoden zur Identifizierung und Charakterisierung der Erkennungsstrukturen (Epitope) von Peptid- und Proteinantigenen bisher noch wenig entwickelt bzw. molekulare und automatisierte Methoden noch im Anfangsstadium.

Zur Epitopanalyse von Protein-Antikörper-Wechselwirkungen wurde vom Kooperationspartner *Steinbeis-Transferzentrum Biopolymeranalytik und Biomedizinische Massenspektrometrie* (STZ) eine Biosensor-Massenspektrometrie-Kombination entwickelt, die mittels selektiver Proteolyse und Affinitätstrennung die molekulare Identifizierung von Antikörper-Epitopen ermöglicht (PROTEX-MS). Ein neuartiges SPR-Biosensorverfahren mit thermooptischer Detektion wurde am Institut für Mikrotechnologien entwickelt. Dieses wird im Rahmen eines LOEWE-Projekts für den bioanalytischen Einsatz zur Epitopanalyse adaptiert. Folgende Zielsetzungen sind mit dem F&E- Kooperationsprojekt verbunden:

- Entwicklung und prototypische Realisierung einer instrumentellen SPR (Surface-Plasmon-Resonance)-Biosensor-Massenspektrometrie-Kombination zur Epitop- und Affinitätsanalyse von Antikörpern
- Nachweis des medizinischen Anwendungspotenzials des Thermal-SPR-Epitopanalysators (TSPR) durch Einsatz zur Identifizierung von Epitop-Peptiden von Antikörpern nach Enzyersatztherapie bei lysosomalen Speichererkrankungen.

Der neue TSPR-MS Epitopanalysator soll ab 2021 durch die Sunchrom GmbH in Kooperation mit Steinbeis-Transferzentrum und IMtech für den biotechnologischen Einsatz zur Serienreife gebracht werden. Eine vergleichbare Gerätekombination für die direkte „online“ Epitop- und Affinitätsbestimmung ist auf dem biomedizinischen Gerätemarkt bisher nicht vorhanden. Zur TSPR wird derzeit am IMtech ein neues Biosensor-Chipsystem für die online Kombination mit Massenspektrometrie entwickelt. Hierzu wurden spezifische Chipherstellungstechnologien erprobt und Metallschicht-Gitter-Strukturen für die SPR-Gitterkopplung entwickelt, die inzwischen reproduzierbar mit hoher Koppeleffizienz hergestellt werden können (Bild 19). Sensoraufbau und Funktionsprinzip des neuen T-SPR Systems sowie die Eignung zur Affinitätsbestimmung von Proteinen wurden in der Masterarbeit von Oliver Müller (Hochschule Rhein-Main, 6/2019) beschrieben. Die Herstellung der T-SPR Chips ist nur möglich aufgrund der am IMtech vorhandenen Expertise zur Mikrotechnologie. Biosensorfunktion und Mikrochipeigenschaften, sowie Bestimmung von Bindungskonstanten von Biopolymeren mit hoher Sensitivität sind bereits zum jetzigen Zeitpunkt den kommerziell erhältlichen SPR-Chipsystemen überlegen.

Für den Einsatz von Antikörpern werden derzeit von den Projektpartnern spezifische Immobilisierungsverfahren an Mikroaffinitätssäule und TSPR-Chip entwickelt. Dabei konnte vor kurzem erstmals – und zusätzlich zu dem Entwicklungsprogramm des Vorhabens – Immobilisierung und direkte Elution zur Epitopanalyse vom SPR-Chip nachgewiesen werden.

Zur weiteren Entwicklung und Optimierung der TSPR-MS-Koppung wird der TSPR- Sensor derzeit mit einem Mikro-Fluidiksystem versehen, um die zu analysierenden molekularen Spezies (Antikörper-Epitope) an die SPR-Metallschicht heranzuführen und sie nach Elution zum Massenspektrometer weiterzuleiten. Auch dieses Mikro-Fluidiksystem wird mit Verfahren der Mikrosystemtechnik in SU8-Technologie realisiert (Bild 20). Neben Antikörpern konnten erstmals auch DNA-Aptamere für die Epitopanalyse entwickelt werden. Auch dieser Arbeitsabschnitt ist bereits vorangeschritten. Die Entwicklung des gesamten TSPR- Fluidiksystems erfolgt in enger Abstimmung zwischen IMtech, Sunchrom und STZ.

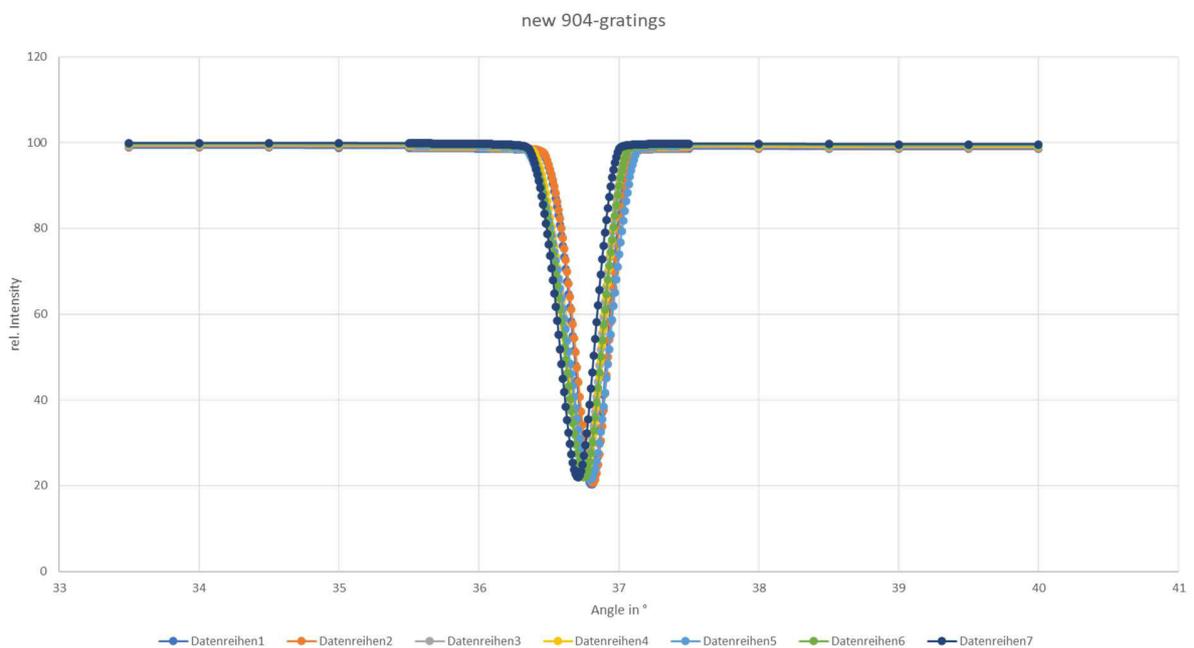


Bild 19: SPR an Metallschicht-Gitter-Strukturen mehrerer SPR-Sensoren bei einem reproduzierbaren Koppelwinkel von $36,8^\circ$ (Laserwellenlänge 904 nm)

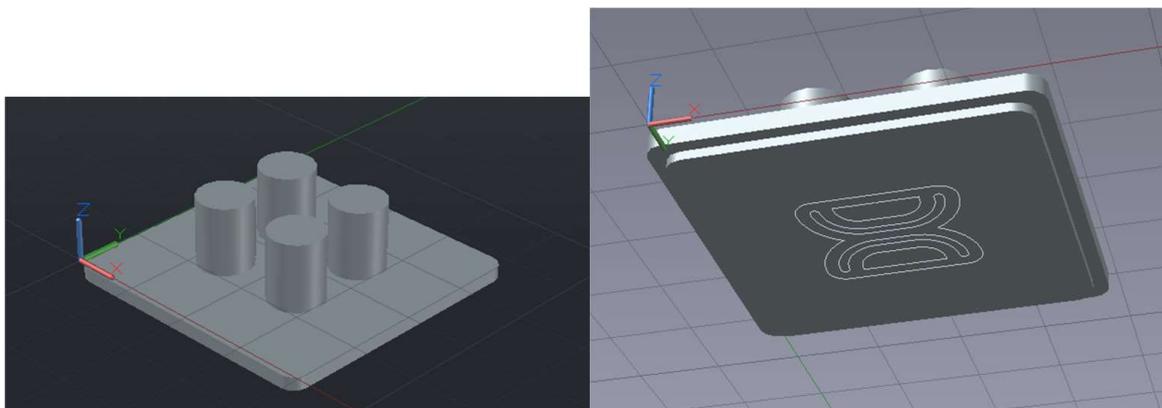


Bild 20: Mikro-Fluidiksystem mit Analytik- und Referenzkanal in SU8-Technologie

4.10 HYLEVEL

Projekttitle: HYLEVEL - Optischer Füllstandsensor für Festkörper-Wasserstofftanks

Projektpartner: HUBER & SUHNER CUBE-Optics AG, Mainz
ANLEG GmbH, Wesel

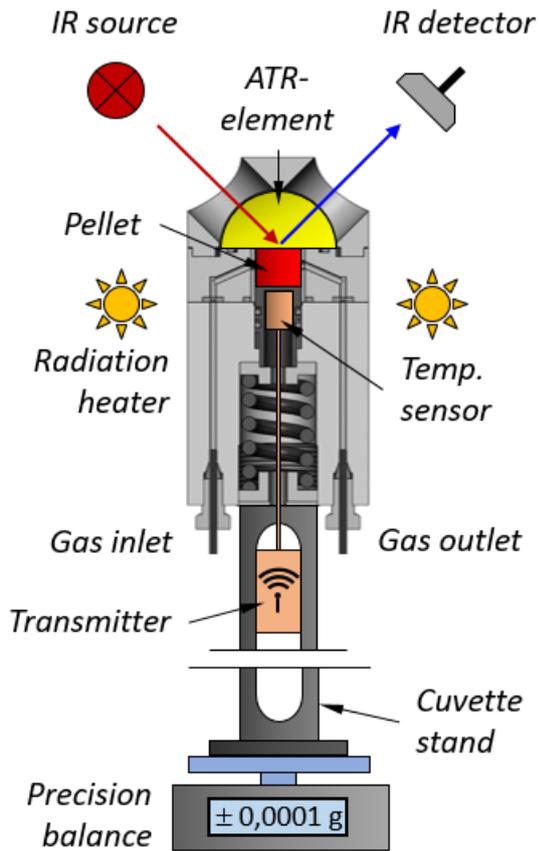
Projektförderung: BMBF, FKZ: 13FH063PX5, Förderprogramms FH_ProfUnt

Ziel des auf drei Jahre angelegten Projekts, an dem sich zwei Industriefirmen aus den Bereichen Faseroptische Komponenten und Tanksysteme beteiligen, ist die Realisierung eines optischen Füllstandssensors für Festkörper-Wasserstofftanks (**Hydrogen Level Sensor**). Es geht dabei um die Umsetzung eines (im Vorgängerprojekt HYDEMON gefundenen) Sensoreffekts in einen möglichst einfachen und kostengünstigen Sensor sowie das Thermomanagement des zugehörigen auf wasserstoffspeichernden Pulversubstanzen beruhenden Tanksystems (siehe dazu auch die vorangegangenen Jahresberichte). Die Projektleitung liegt bei Prof. Dr. Birgit Scheppat (Labor für Wasserstofftechnologie der HSRM), seitens des IMtech ist Prof. Dr. Hans-Dieter Bauer am Projekt beteiligt. Herr Matthias Enders (M.Sc.), Absolvent des Studiengangs Angewandte Physik, konnte für das Projekt als Doktorand gewonnen werden.

Das Projekt, das kurz vor seinem Abschluss steht, beschäftigt sich mit ganz verschiedenen technischen und materialwissenschaftlichen Fragestellungen. Der Sensoreffekt nutzt die Tatsache, dass das Speichermaterial (Standard: Natriumalanat NaAlH_4 mit Katalysatoranteil) bei der Desorption von Wasserstoff in die Verbindung Na_3AlH_6 mit anderer Kristallstruktur übergeht. Dieser Übergang wird im Laboraufbau messtechnisch auf zwei Wegen verfolgt: Durch Aufzeichnung der Massenabnahme (gravimetrisch) und durch Aufnahme von FTIR-ATR-Spektren (optisch). Den Messaufbau zeigen die Bilder 21a-c.

Das gemessene IR-Spektrum verändert sich während der Desorption kontinuierlich, da Schwingungsbanden des Eduktes NaAlH_4 allmählich verschwinden und neue Banden des Produkts Na_3AlH_6 entstehen (s. Bild 22). Dass nur die beiden genannten Spezies an der Reaktion beteiligt sind, konnte durch den in Bild 22 zu sehenden isosbestischen Punkt nachgewiesen werden.

Optical signal



Gravimetical signal

Bild 21a: Messküvette zur parallelen Aufnahme von FTIR-ATR-Spektren und Massenabnahme

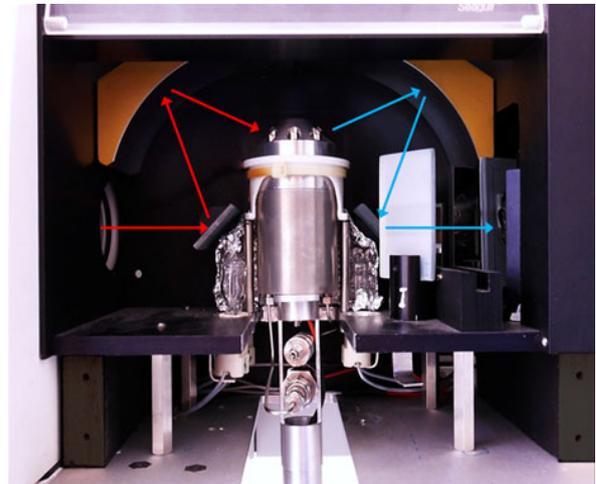


Bild 21b: Küvette im Probenraum des FTIR-Spektrometers, eingefügt in den Strahlengang einer HARRICK Seagull® - Einheit



Bild 21c: Spektrometer mit eingebauter Messküvette und Präzisionswaage

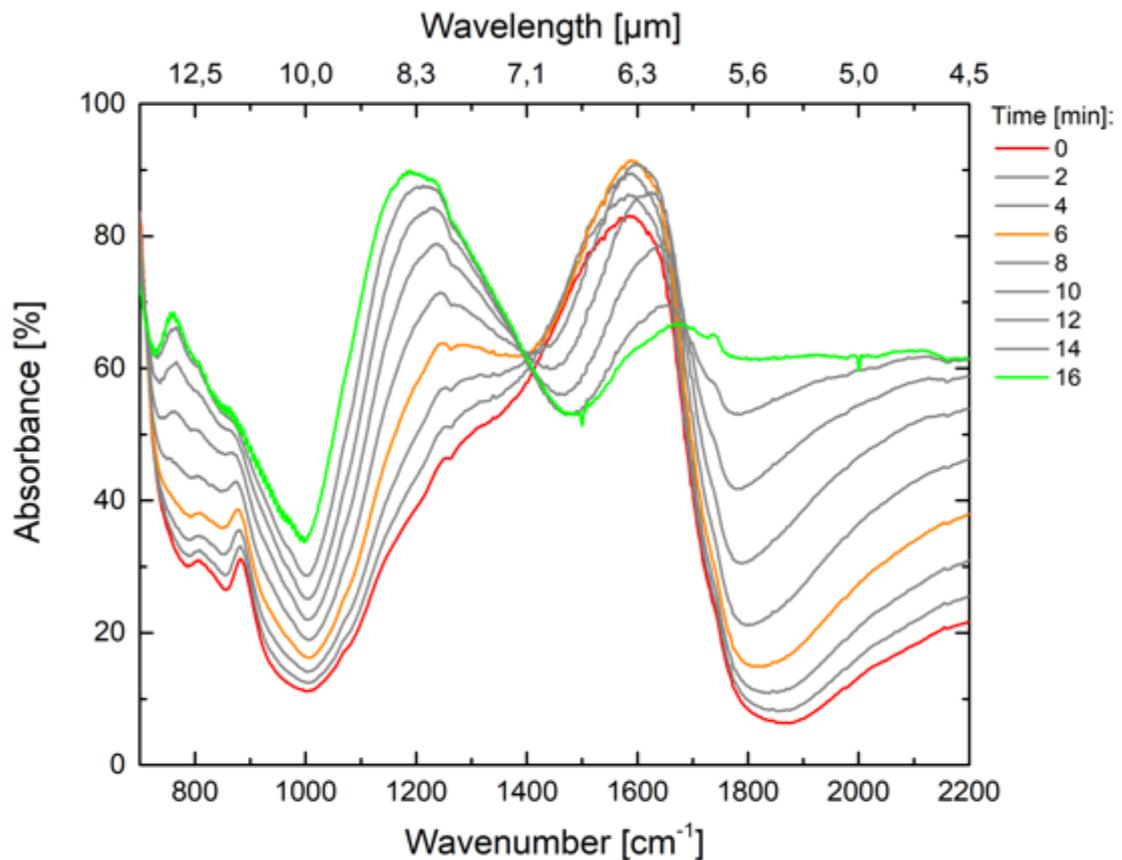


Bild 22: Aus FTIR-ATR-Messungen gewonnene Absorptionsspektren von NaAlH_4 mit 2 mol% CeCl_3 als Katalysator

Zu Beginn des Projektes konnte nachgewiesen werden, dass optische und gravimetrische Messwerte sehr gut korrelieren und somit das optische Signal (Peakintensitäten) zur Bestimmung des Wasserstoffgehalts genutzt werden kann (s. Jahresbericht 2017/18).

Weitere Messungen wurden bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Mit diesen Werten konnten Aktivierungsenergie und Reaktionskonstanten bestimmt und auch das zugrunde liegende Keimbildungsmodell (Avrami-Kolmogorov) untersucht werden. Außerdem wurde neben CeCl_3 auch der Katalysator TiCl_3 verwendet. Bei allen Messungen der vergangenen drei Jahre wurde Speicherpulver verwendet, was aus den gekauften Grundchemikalien selbst vermahlen und zu Pellets gepresst wurde, um die Vielzahl der mit der Probenpräparation verbundenen Parameter kontrollieren zu können.

Wichtig im Hinblick auf die Anwendbarkeit solcher Messungen als Sensoreffekt war das Durchführen von Zyklierungen (Desorption – Absorption – Desorption - ...), um Reproduzierbarkeit und Langzeitverhalten von Probe und Messverfahren zu bewerten. Unter anderem wurden und werden hier Aufräumungseffekte entdeckt, die an der Grenzfläche

zwischen ATR-Element und Pellet auftreten und deshalb essentiell sind für die Qualität der ATR-Messungen.

Spezielle Aufmerksamkeit widmet das Team derzeit einer genaueren Zuordnung der Schwingungsbanden zu den Schwingungsmoden der molekularen Struktur. Hier zeigen sich durchaus deutliche Unterschiede zwischen den bereits veröffentlichten und den gemessenen Werten. Hier befindet sich das Team im Austausch mit Wissenschaftlern des Helmholtz-Zentrums Geesthacht, wo ebenfalls an Wasserstoffspeichersubstanzen geforscht wird und wo Schwingungsspektren simuliert werden können. Insbesondere konnte die breite Bande zwischen ca. 1800 und 2000 cm^{-1} bisher keiner Schwingungsmode zugeordnet werden. Es scheint vielmehr so, als könne man sie auf sich stark ändernde Werte des Brechungsindex bei Änderung der Stärke der benachbarten Absorptionsbande zurückführen, also auf den Einfluss der anomalen Dispersion in diesem Bereich auf die Reflexionseigenschaften nahe dem kritischen Winkel der Totalreflexion. Da gerade diese „Bande“ sehr gut für den Sensoreffekt genutzt werden kann, sollen hier in Zusammenarbeit mit der Geesthachter Gruppe Modellrechnungen durchgeführt werden.

Die technische Realisierung des Sensors befindet sich mittlerweile am Übergang vom Konzept zur Realisierung. Derzeit wird ein Sensor-Tank-Demonstrator fertiggestellt, der in ein temperaturkontrolliertes Ölbad eingelassen werden kann (Bilder 23a-c).

- 2 Tankröhren
 - Länge für max. Befüllung 160mm
 - Durchmesser 21mm
- Sensorrohr
 - Vorbereitet für Sensor mit max. 20mm Durchmesser
- Sensor
 - Sensorkopf mit Sender, Empfänger und Umlenkspiegeln
 - Sensorelement mit Pellet, ATR-Kristall und Anpressmechanik



Bild 23a: Tank-Sensor-Kombination zum Eintauchen in ein temperiertes Ölbad

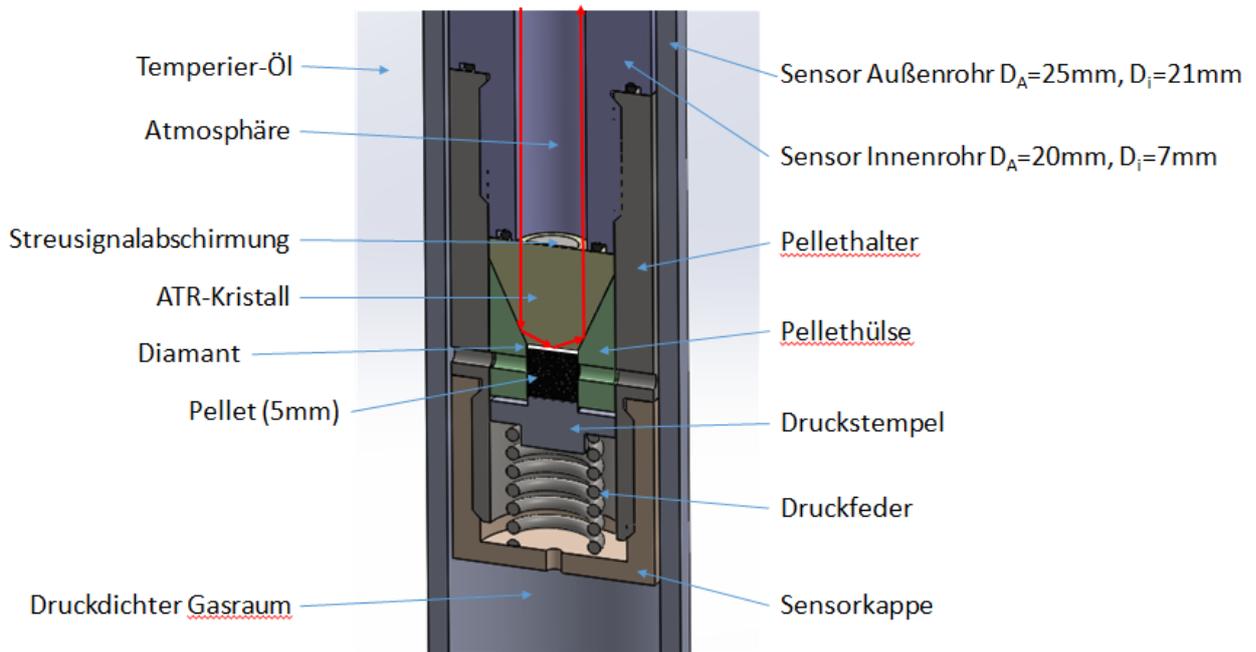


Bild 23b: *Detailansicht: Sensorkopf mit ATR-Element*

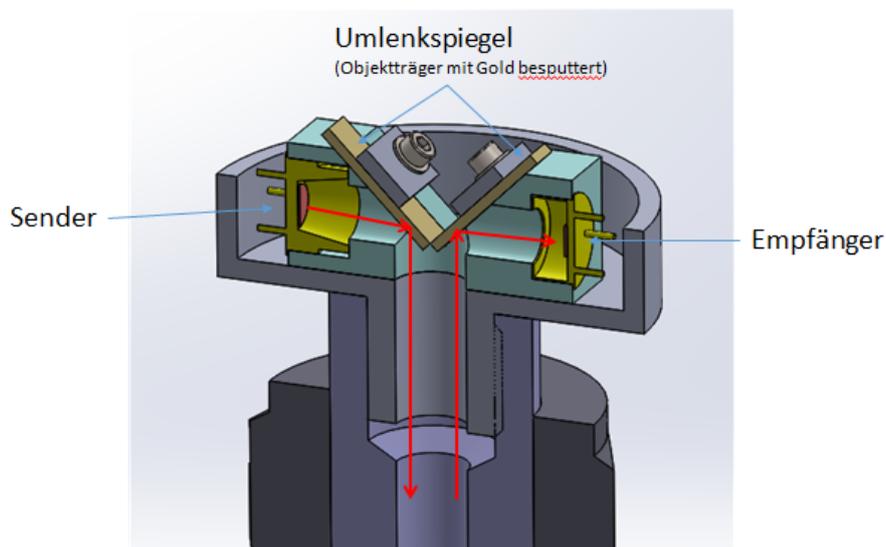


Bild 23c: *Detailansicht: Sende- und Empfangseinheit des Sensors (außerhalb des temperierten Tankbereichs)*

Eine detaillierte Publikation über die optischen Messungen und die erzielten Ergebnisse wurde bei *Applied Optics* eingereicht (siehe Kapitel 5.2), weitere Veröffentlichungen sind geplant, insbesondere zu den Oberflächenmessungen, bei denen uns das Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz unterstützte, und zur technischen Realisierung.

4.11 PRIPHOR

Projekttitle: PRIPHOR - Primäre Photoreaktionen bei der UV-Strukturierung von FOTURAN II® Glas

In diesem Projekt wird die Prozessierung des photosensitiven und photoätzbaren Spezialglases FOTURAN II® von SCHOTT näher untersucht. Erste umfangreiche Ergebnisse stellte der IMtech-Jahresbericht 2017/18 vor. FOTURAN II® enthält u.a. Ce^{3+} - und Ag^+ -Ionen. Bei UV-Belichtung werden die Cerionen zu Ce^{4+} oxidiert und die Silberionen zu atomarem Silber reduziert. Tempert man das Glas dann bei mehreren Hundert Grad Celsius, bilden die entstandenen Silberatome Cluster, die zu Nanopartikeln heranwachsen. Bei Temperaturerhöhung kristallisiert das die Partikel umgebende Glas aus, wodurch die belichteten Bereiche in eine polykristalline Glaskeramik übergehen. Die polykristallinen Materialbereiche lassen sich mit guter Selektivität gegenüber dem amorphen Glas ätzen. Auf diese Art werden kommerziell z.B. mikromechanische und mikrofluidische Strukturen hergestellt. Die Wände dieser geätzten Mikrostrukturen haben eine Rauigkeit im Mikrometerbereich, was sie für (mikro)optische Zwecke unbrauchbar macht.

Ziel des Projekts PRIPHOR ist die Untersuchung der **primären Photoreaktionen** von FOTURAN II®. Durch Belichten und Tempern wird die Absorption des Glases im UV und im blauen Spektralbereich verändert. Dadurch sollte sich auch der Brechungsindex im sichtbaren Spektralgebiet ändern. Dies lässt hoffen, dass (ohne Beteiligung eines Ätzprozesses) diffraktiv-optische Strukturen in das Glas eingeschrieben werden können, etwa optische Gitter. Solche Strukturen könnten die Palette der Anwendungen des Glases deutlich erweitern.

Während in der Vergangenheit mit der Methode der Interferenzlithographie gezeigt wurde, welche Auflösung und welche Beugungseffizienz erzielt werden können, sollen weitere Untersuchungen Informationen darüber liefern, welcher Anteil an Cer-Ionen zur Keimbildung genutzt wird und wie dieser Anteil ggf. vergrößert werden kann. Anlass zu dieser Fragestellung geben Fluoreszenzmessungen während der UV-Belichtung. Bild 24 zeigt ein Fluoreszenzspektrum, gemessen während der Belichtung des Glases mit einem HeCd-Laser (Wellenlänge 325nm).

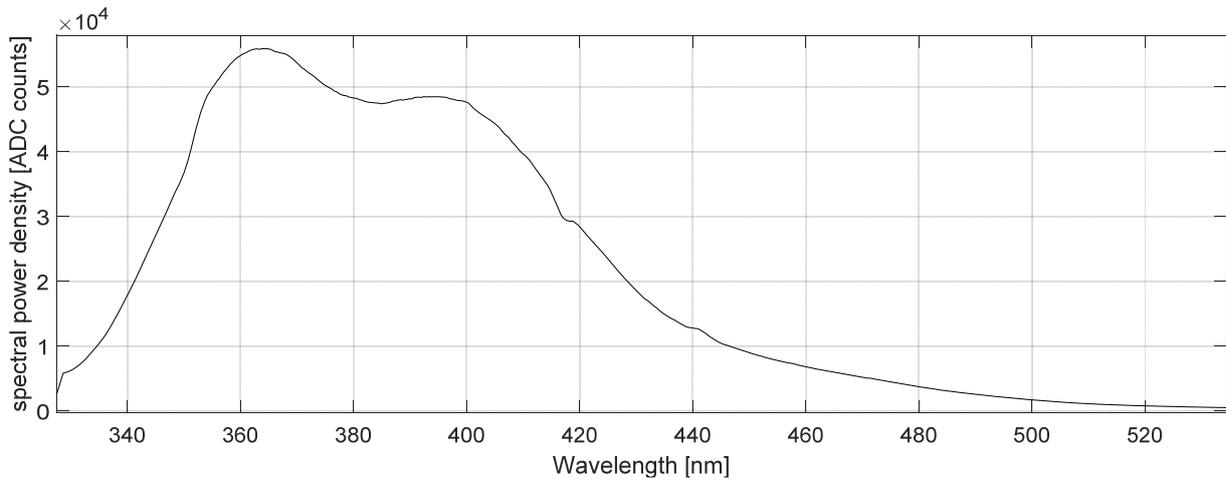


Bild 24: Fluoreszenzspektrum während der Belichtung mit 325nm

Verfolgt man die Intensität der beiden markanten Peaks mit der Belichtungszeit, so stellt man eine Abnahme fest, was in Bild 25 gezeigt wird.

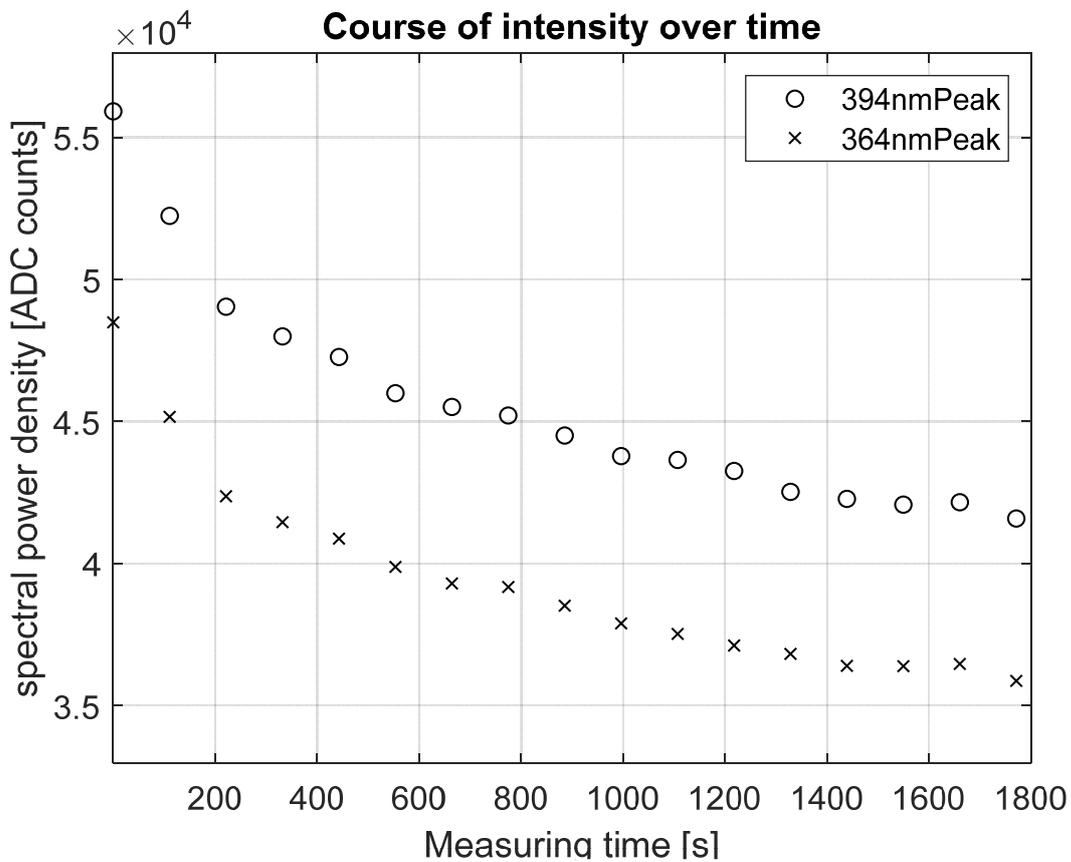


Bild 25: Abnahme der Peakintensität mit der Belichtungsdauer. Beachte: Abszisse beginnt nicht bei Null

Während sich an die gezeigten Messdaten hier gut eine Abhängigkeit gemäß

$$I(t) = I_{\text{sat}} + I_C \exp(-at)$$

anpassen lässt, legen Langzeitmessungen über mehrere Stunden ein Verhalten gemäß

$$I(t) = I_{C1} \exp(-a_1 t) + I_{C2} \exp(-a_2 t)$$

mit einer „schnellen“ und einer „langsamen“ Exponentialfunktion nahe. Dies scheint auf zwei unterschiedliche Spezies von Ce^{3+} Ionen hinzudeuten.

Weiter galt das Interesse der Reversibilität der Photoreaktion. Dazu wurde der zeitliche Fluoreszenzverlauf beim Belichten einer Probe vermessen und die Probe dann mehrere Tage lang im Dunkeln verwahrt. Eine erneute Belichtung mit Messung der Fluoreszenz ergab eine fast vollständige Reversibilität: Die Anfangsfluoreszenz war geringfügig schwächer, der exponentielle Abfall aber fast unverändert. Dies spricht für eine weitgehende Reversibilität der Photoreaktion im ersten Bearbeitungsschritt.

Das Fluoreszenzspektrum lässt sich sehr gut durch zwei Gaußkurven anpassen, eine breitere und höhere für den langwelligen Peak, eine schwächere schmalere für den kurzwelligen. Führt man die Anpassung zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Belichtung durch, so bleiben die Positionen der beiden Peaks innerhalb der Messfehler unverändert, es findet also keine Peakverschiebung statt.

Ausschlaggebend für das weitere Strukturieren des Glases ist das Tempern des latenten Bildes. Führt man die übliche Wärmebehandlung einer belichteten Probe durch (langsames Hochrampen der Temperatur und dann Halten bei 500°C für 2 Stunden) und vermisst dann die Fluoreszenz bei weiterer Belichtung, so stellt man fest, dass der kurzwellige Peak nach wie vor vorhanden ist, wenn auch mit geringerer Intensität, wohingegen der langwellige Peak bis auf eine schwache Schulter fast verschwunden ist.

Es kann zum jetzigen Stand der Untersuchungen festgehalten werden, dass eine hohe Belichtungszeit, die einer über den üblichen Wert hinausgehenden Dosis entspricht, zu weiterer Keimbildung führt. Raman-Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten des Prozesses und Folgen der Anwendung des Intervall-Temperns auf die optischen Eigenschaften sind noch nicht letztendlich ausgewertet.

Die weitere Projektplanung sieht vor, eine auf Temperwerte heizbare Probenhalterung zu realisieren und Belichtungen (später auch Interferenzlithographie) direkt an heißen Glasproben vorzunehmen, um die Reversibilität des ersten Belichtungsschrittes zu vermeiden und ggf. Diffusionsprozesse der Keime in der Glasmatrix zu unterbinden.

Letztendlich soll aus den Messungen ein Modell abgeleitet werden, das das Auftreten der unterschiedlichen Spezies und dessen Beeinflussbarkeit erklärt und eine bessere Vorhersage der Keimgrößen und damit der Strukturauflösung ermöglicht

4.12 ZIRCON

Projekttitle: ZIRCON – Refraktometer zur Messung von hohen Brechzahlen bei Flüssigkeiten

Dieses Projekt schließt an eine Abschlussarbeit an, in der ein Refraktometer zur Messung des Brechungsindex' von Flüssigkeiten entwickelt wurde. Der Sensorkopf (Bild 26) schließt mit einer U-förmig gebogenen Lichtleitfaser (POF: Polymer optical fiber) ab, deren Mantelmaterial entfernt wurde. Man benutzt also nur den Faserkern. Das Messprinzip ist einfach (Bild 27): In die Faser mit Brechungsindex n_G wird (in einen der Schenkel des U) Licht eingekoppelt. Taucht man das U in eine Flüssigkeit mit Brechungsindex n_F (wobei $n_G > n_F$ sein muss), so kann nur derjenige Anteil des Lichtes im U geführt werden, der auf der Grenzfläche Faser-Flüssigkeit mit einem Winkel auftrifft, welcher größer ist als der Winkel der Totalreflexion. Dieser Winkel hängt von der Größe der beiden Brechzahlen ab und deshalb ist der ausgekoppelte Anteil des Lichtes umso höher, je ähnlicher sich die beiden Indizes sind.



Bild 26: Sensorkopf mit entmantelter Polymerfaser, als U gebogen

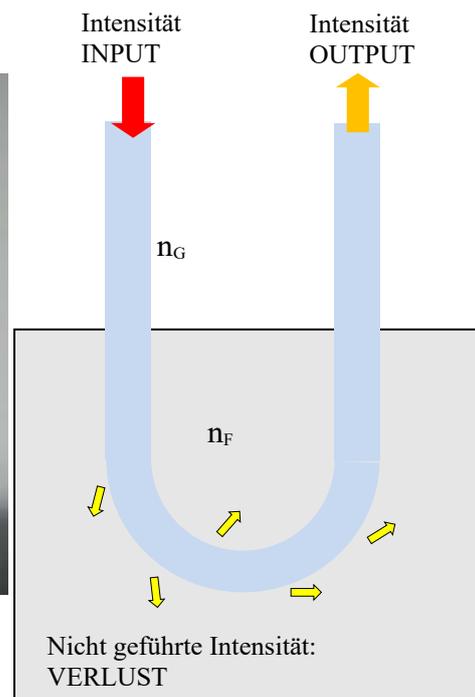


Bild 27: Schema des Messkopfes

Man sieht sofort, dass mit dieser Methode keine Flüssigkeiten vermessen werden können, deren Brechungsindex größer ist als der der Faser.

Für ein Projekt, in dem hochbrechende Flüssigkeiten für Cherenkov-Detektoren hergestellt werden sollen, ist es also nötig, den Messbereich eines solchen Refraktometers wesentlich zu erhöhen. Mit herkömmlichen Polymermaterialien, aber auch mit den meisten Gläsern, kann man dies nicht erreichen. Es sollen daher Materialien wie Lanthanschwerflint oder Zirkoniumdioxid („Zirconia“) getestet werden.

Im Projekt ZIRKON wird derzeit ein Zirconia-U mit quadratischem Querschnitt getestet (Bild 28). Die Messergebnisse sollen dann mit den (vorher durchgeführten) Simulationen (Ray-Tracing-Prinzip, siehe Bild 29) verglichen werden.

Kernaufgabe des mit dem Projekt betrauten Studierenden (Bachelorarbeit) ist die Anfertigung von Kalibrierkurven (Quotient I_{out}/I_{in} als Funktion von n_F) bei verschiedenen Materialien (n_G) und Sensorgeometrien. Es sollen geeignete Materialien und Geometrien gefunden werden, deren Kalibrierkurve im Bereich hoher n_F möglichst steil verläuft und somit hohe Empfindlichkeit bei hohen Brechungsindizes gewährleistet.



Bild 28: Ein Zirconia-U mit Querschnittsfläche $2\text{mm} \times 2\text{mm}$

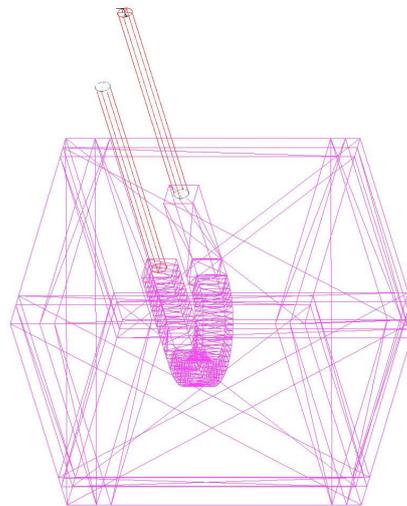


Bild 29: Ray-Tracing Simulationsansatz für das in Bild 28 gezeigte U aus Zirconia

4.13 Engineering 4.0, Teilvorhaben im Themenfeld „Medizintechnik“

Projekttitle: Weiterentwicklung der Forschungsstrukturen und der Förderung des Wissenschaftlichen Nachwuchses im profilbildenden Forschungsschwerpunkt Engineering 4.0

Projektlaufzeit: 15. 05. 2018 – 31. 3. 2022

Projektförderung: Gefördert durch zentrale Mittel der Hochschule RheinMain im Rahmen des internen Doktorandenprogramms

Projektthema und Ziel: Das Forschungsprojekt hat die Entwicklung neuer Mikrowellen-Methoden für die medizinische Diagnostik zum Ziel. Das Grundprinzip besteht darin, dass unterschiedliche Gewebetypen aufgrund ihrer spezifischen elektromagnetischen Parameter gewebetypisches Transmissions- und Reflexionsverhalten für Mikrowellenstrahlung zeigen. Das kann zur Darstellung innerer Strukturen mit einer räumlichen Auflösung im Millimeterbereich ausgenutzt werden. Der hier betrachtete Anwendungsfall ist das in-situ-Monitoring der Leberablation mit Bestimmung der Ausdehnung der Ablationszone. Bei der Leberablation werden starke Mikrowellenfelder in das Tumorgewebe appliziert. Durch deren Wechselwirkung vor allem mit dem Zytoplasma und der interstitiellen Flüssigkeit kommt es zur Zellenaturierung durch Überhitzung. Vom erhitzten Gewebe geht gegenüber der Umgebung verstärktes thermisches Rauschen aus, das mittels radiometrischem Messverfahren erfasst werden kann. Aus der Kombination der Rauschleistung bei drei verschiedenen Messfrequenzen kann grundsätzlich die Tiefe und das Temperaturprofil der Rauschquelle berechnet werden. Es bestehen hier aber besondere Herausforderungen: zum einen ist die Rauschleistung gering und die messtechnische Kontrastierung gegenüber der Umgebung schwierig, zum anderen ist die Gewebestruktur zwischen Quelle und Empfangsantenne stark inhomogen, was bei der mathematischen Rekonstruktion des Temperaturprofils aus den Messsignalen zu berücksichtigen ist. Ein weiterer Effekt der Ablation ist die Veränderung der elektromagnetischen Parameter des erhitzten Gewebes. Das ist in erster Linie auf den einhergehenden Schwund an wässrigen Gewebeanteilen zurückzuführen, die relative Permittivität und die Leitfähigkeit sind gegenüber zuvor stark reduziert. Deshalb ändert sich mit Ausdehnung der Ablationszone die Wellenausbreitung zwischen der Ablationsantenne (Sender) und einem Antennen-Array auf der Körperoberfläche (Empfänger). Kontinuierliche Transmissionsmessungen bieten die Möglichkeit, aus der zeitlichen Änderung des Empfangssignals die räumliche Änderung der Übertragungsstrecke zu berechnen.

Projektstand: Für das Transmissionsverfahren wurden mathematisch-numerische und physikalische Modelle entwickelt und daran die Machbarkeit nachgewiesen. Bild 30 zeigt das Design von Empfangsantenne und Mikrowellen-Katheter sowie deren S_{11} -Charakteristik. In Bild 31 ist das Temperaturprofil um den Mikrowellen-Katheter bei Anwendung von 50W Mikrowellenleistung nach 300s zu sehen. Durch die Erhitzung in unmittelbarer Nähe des Katheters um bis zu 100°C ändern sich Permittivität und HF-Leitfähigkeit des Gewebes (siehe Bild 32). Beide Abbildungen wurden durch numerische Simulation mit der Software CST erzeugt. Die Veränderung der Gewebeparameter führt in diesem Fall zu einem Anstieg des S_{21} -Werts (Transmissionsstreuparameter) um ca. 3dB. Die Ergebnisse der numerischen Simulation konnten am physikalischen Modell bestätigt werden. Als nächste Schritte werden Mehrschichtmodelle simuliert und ein mathematisches Verfahren zur Rekonstruktion der Ablationszone bei Verwendung mehrerer Empfangsantennen entwickelt.

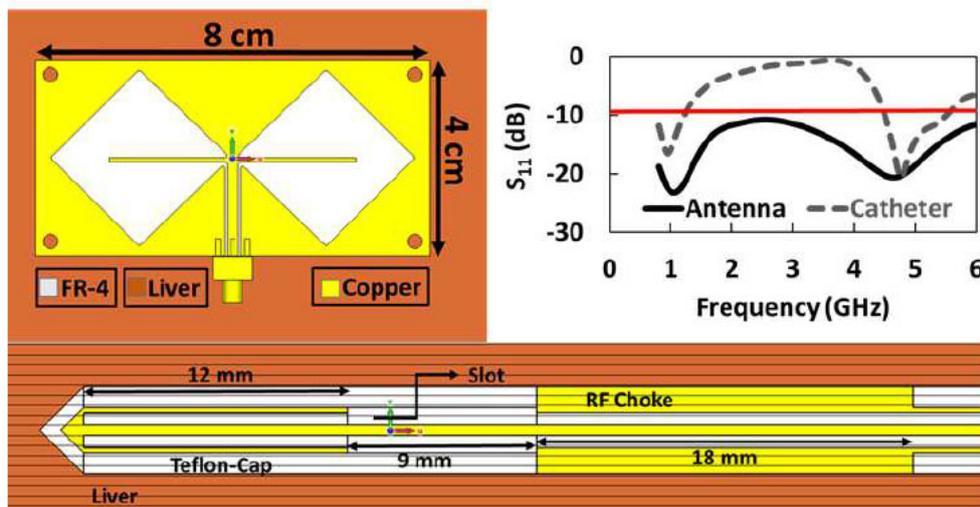


Bild 30: Design und S_{11} -Parameter der Bowtie-Empfangsantenne (oben) und des Mikrowellen-Katheters (unten)

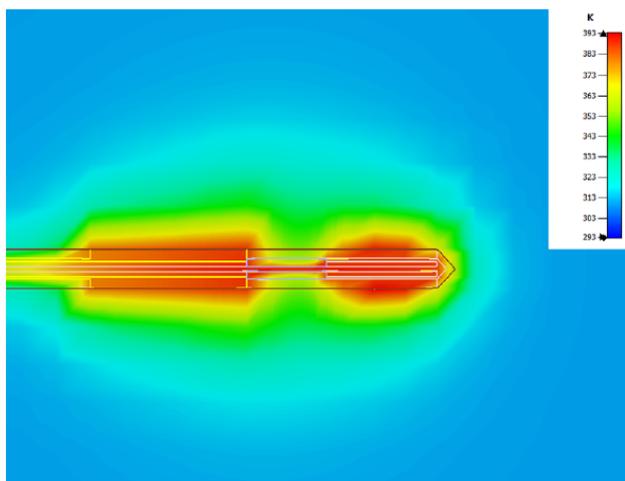


Bild 31: Temperaturprofil nach 300s Anwendung mit 50W in Lebergewebe

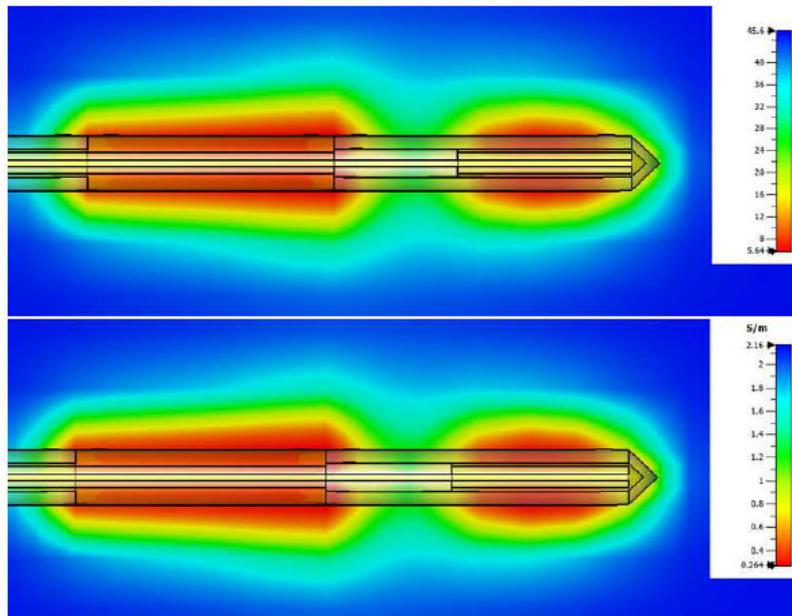


Bild 32: Permittivität (oben) und Hochfrequenzleitfähigkeit (unten) nach 300s Anwendung mit 50W in Lebergewebe

4.14 Forschungsk Kooperation „Dragonfly“ der HSRM (IMtech) mit dem NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), Greenbelt, MD (USA)

Nachdem bereits im NASA-Marsrover „Perseverance“ ein IMtech-Vakuumsensor (Typ VAC_03k) als Teil des **Mars Organic Molecule Analyzer (MOMA)** zum Einsatz kommt, will die NASA auch im neuen Projekt „Dragonfly“ mit IMtech-Sensoren zum Saturnmond Titan fliegen.

Mit der Mission „Dragonfly“ läutet die NASA eine neue Epoche der Suche nach den Ursprüngen des Lebens ein. Es handelt sich zwar nicht um die erste Expedition zum Titan, doch der für 2026 geplante Flug könnte die Suche nach extraterrestrischer Intelligenz wieder mehr in den Fokus rücken.

Bei Dragonfly setzt die NASA erstmals die Drohnentechnologie ein. Die Sonde, deren Name übersetzt „Libelle“ bedeutet, soll nach dem Start 2026 im Jahr 2034 auf dem Saturnmond landen. Dragonfly ist ein Quadcopter mit doppelten Rotoren. Diese Konstruktion garantiert, dass die Drohne auch dann zuverlässig weiterarbeitet, wenn einer der 8 Rotoren (Durchmesser 1 m) beschädigt wird. Die 450 kg schwere Sonde kann sich mit einer Geschwindigkeit von 36 km/h über die Titan-Oberfläche bewegen. Während der 32 Monate andauernden Mission wird sie von einer Batterie versorgt, deren Aufladung über einen thermoelektrischen Generator (TEG) erfolgt. Ein TEG wandelt die beim Zerfall radioaktiver

Substanzen entstehende Wärme direkt (ohne bewegliche Teile, nur durch die Kombination p- und n-leitender Halbleitermaterialien) in Elektrizität um. Während der Titannacht, die 8 Nächten auf der Erde entspricht, bleibt die Drohne am Boden und analysiert Proben. Dazu stehen der Sonde ein Massenspektrometer (in dem auch IMtech-Sensoren genutzt werden) und ein Gamma-Strahlen-Spektroskop für chemische Untersuchungen, diverse meteorologische Instrumente, ein Seismograf sowie die mit Mikroskop und Panoramakamera ausgestattete „DragonCam“ zur Verfügung.

Dragonfly wird am Titan-Äquator in einem „Shangri-La“ genannten Dünengebiet landen, das Ähnlichkeit mit der Landschaft Namibias aufweist. Die Mission startet zunächst in kurzen Flügen und wird sich auf jeweils 8 Kilometer lange Strecken ausdehnen. Ziel der Sonde ist der Selk-Krater mit seinem 90 km Durchmesser. Dort sollen sich die rötlich-braunen Tholine befinden - komplexe organische Makromoleküle, die sich aus Kohlenstoff, Stickstoff und Wasserstoff zusammensetzen und die als Vorformen zur Entwicklung belebter Materie angesehen werden. Frühere Messungen hatten bereits ergeben, dass in dieser Gegend gefrorenes Wasser vorhanden sein könnte, was die Theorie von Titan als Lebensraum untermauern würde. Nicht nur aufgrund der geplanten 175 km langen Reiseroute, die alle bislang von Marssonden zurückgelegten Strecken verdoppelt, ist die in das New Frontiers-Programm eingebettete Mission ein Meilenstein in der Geschichte der NASA. Zu dem Programm gehören ebenfalls die „New Horizons“-Mission zum Pluto, das Projekt „Juno“, das den Jupiter untersuchen wird, und „OSIRIS-REx“ mit Ziel Bennu-Asteroid. Geleitet wird die Mission von Elizabeth Turtle vom Institut für Angewandte Physik der John Hopkins University in Maryland.

Titan liegt 10mal weiter entfernt von der Sonne als die Erde, mit Oberflächentemperaturen bis -179 Grad Celsius. Er verfügt über eine Atmosphäre, vorwiegend aus Stickstoff, Kohlenwasserstoffen und anderen organischen Verbindungen, die Ähnlichkeit mit der frühen Erdatmosphäre hat und deren atmosphärischer Druck 50% höher als auf der Erde ist. Zudem finden sich auf seiner Oberfläche Seen und Flüsse, wobei diese „Gewässer“ aus den Kohlenwasserstoffen Methan und Ethan bestehen. Der Saturnmond ist von einer Eisschicht umgeben, unter der ein Ozean aus Wasser vermutet wird. Die außergewöhnlich komplex strukturierte Oberfläche gibt Anlass zur Hoffnung, Antworten darauf zu finden, wie einst das Leben auf der Erde entstanden sein könnte. Dragonfly stützt sich auf Daten, die im Rahmen der Weltraummission Cassini-Huygens gesammelt wurden. Die Raumsonde Cassini war von 2004 an um den Saturn unterwegs und schaffte es 2017, mehrfach in die Lücke zwischen dem Planeten und seinen Ringen einzudringen. 2005 landete die Sonde Huygens auf dem Titan und sendete Daten von der Oberfläche. Aufgrund der Resultate dieser Erkundungsflüge wurde 2010 an der University of Arizona im Labor die Titan-Atmosphäre nachgebildet

und einer starken kosmischen Strahlung ausgesetzt. Es entstanden mit den Aminosäuren Alanin und Glycin die essenziellen Proteingrundbausteine, was Anlass zu neuen Theorien über die Entstehung von Proteinen und Leben auf der Erde gab.

Wie schon bei der aktuellen NASA-Marsmission mit IMtech-Sensor im Massenspektrometer (MS) des MOMA sollen auch bei Dragonfly MEMS-Vakuumsensoren als wichtige Komponenten im MS-System zum Einsatz kommen. Bis zum geplanten Start stehen uns noch sehr interessante Untersuchungen zur Sensor-Charakterisierung bevor, z.B. hinsichtlich der Frage, wie sich unsere Mikrosensoren unter dem Einfluss kosmischer Strahlung bei einer immerhin mehr als 10jährigen Reise- und Nutzungszeit verhalten. Auf YouTube finden sich einige sehr interessante NASA-Videos zur Dragonfly-Mission, z.B.

- The Science of Dragonfly (NASA-Goddard)
- Announcing a New Mission to Saturn's Largest Moon on this Week (NASA, June 28, 2019)
- Chasing Life on Saturn's Moon: NASA's Dragonfly Mission to Titan
- The Dragonfly Mission to Titan: Exploration of an Ocean World (John Hopkins University, Applied Physics Laboratory)
- Titan: Saturn's Largest Moon – An Alternative Earth?

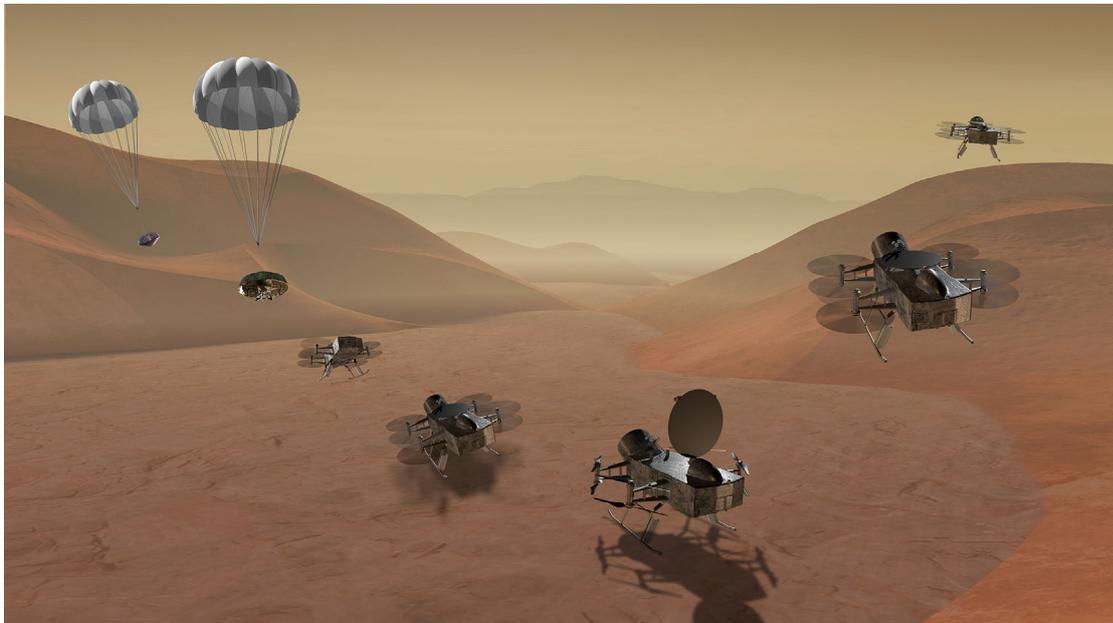


Bild 33: Einsatzkonzept der Dragonfly-Drohne auf der Titan-Oberfläche (Quelle: NASA)

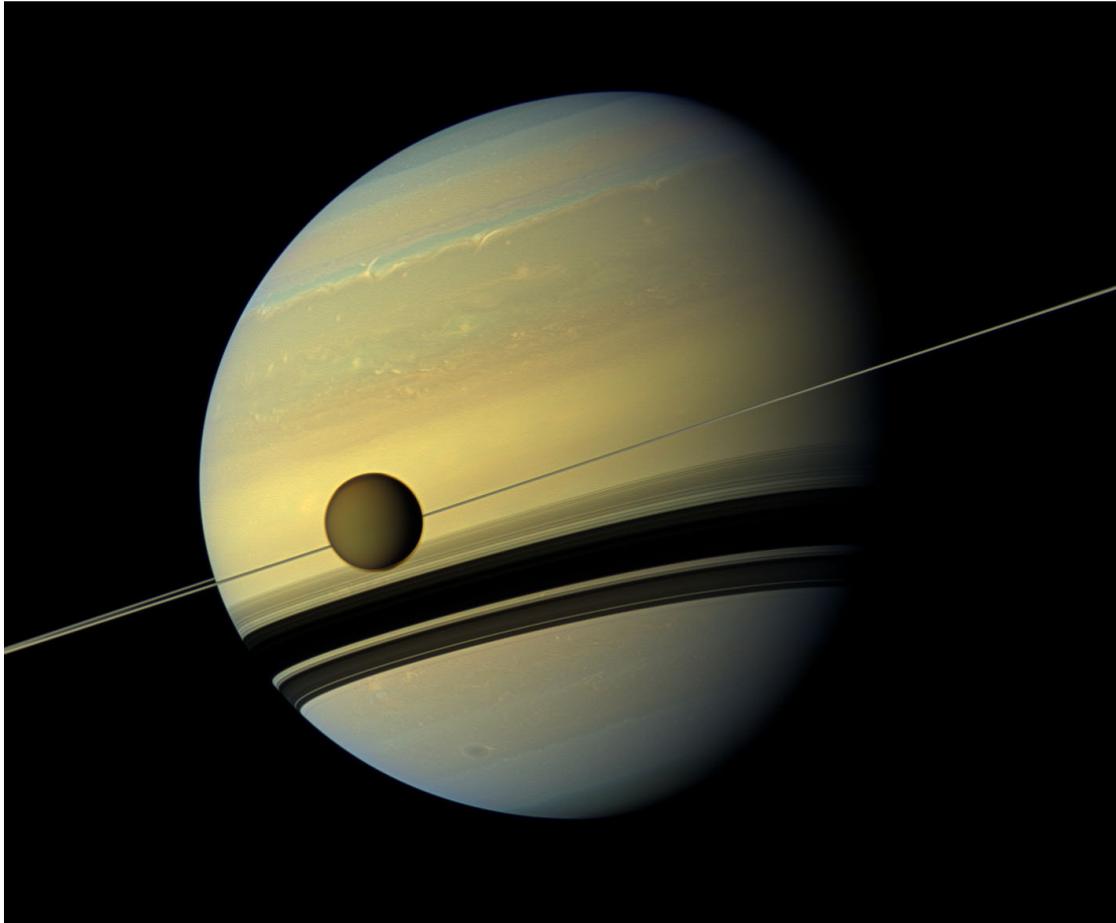


Bild 34: Saturn mit dem Saturnmond Titan (Aufnahme der Cassini-Sonde, Quelle: NASA)

4.15 Forschungsk Kooperation „WEFF-Mikroskopie“ der HSRM (IMtech) mit der University of Western Ontario, London, Western Ontario (Canada)

Bei der Waveguide Evanescent Field Fluorescence- (WEFF) Mikroskopie wird ein Laserstrahl mit Hilfe eines optischen Gitters in einen planaren Wellenleiter eingekoppelt. Das an der Oberfläche des Wellenleiters entstehende evaneszente Feld einer sich in diesem Wellenleiter ausbreitenden Mode wird zur Beleuchtung von biologischen Proben verwendet, die mit Fluoreszenzfarbstoffen eingefärbt wurden. In diskreten Koppelwinkeln können verschiedene Moden eingekoppelt werden, die eine unterschiedliche Eindringtiefe des evaneszenten Feldes in die Zellen ermöglichen. Durch Verwendung von zwei Aufnahmen des mit unterschiedlichen Moden angeregten Fluoreszenzfarbstoffes kann der Abstand der Zellen von der Wellenleiteroberfläche nanometergenau ermittelt werden. Wenn diese beiden Moden abwechselnd automatisiert eingekoppelt werden und jeweils ein Bild aufgenommen

wird, kann die Bewegung der Zellen in allen drei Raumdimensionen mit einer z-Auflösung im Nanometerbereich beobachtet werden. In Bild 35 ist die Funktionsweise des WEFF-Mikroskops schematisch dargestellt.

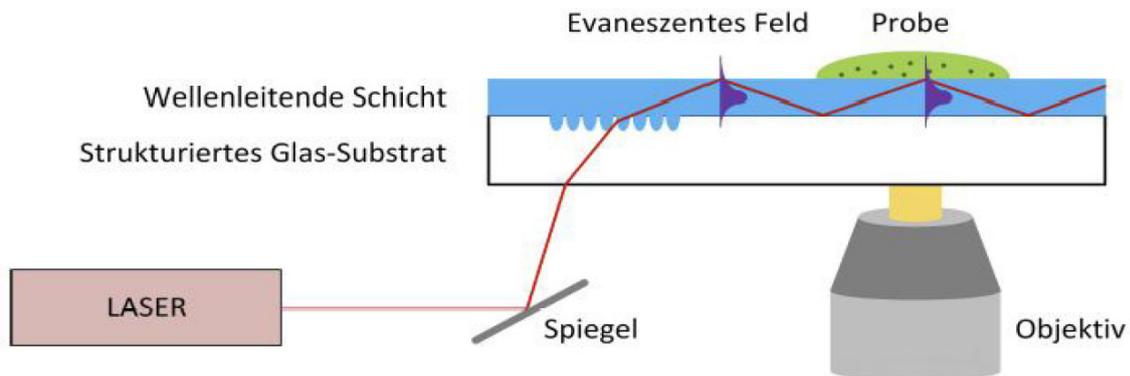


Bild 35: Schematische Darstellung der WEFF-Mikroskopie

a) Erweiterung des WEFF-Mikroskops um eine automatische Justage der Einkopplung

Um das Einkoppeln der Moden zu erleichtern und zu beschleunigen, wurde das WEFF-Mikroskop um eine automatische Justage der Einkopplung erweitert. Hierbei wird sowohl der optimale Einkoppelwinkel, als auch der optimale Abstand des einzukoppelnden Lichtstrahls von der Gitterkante ermittelt. Die Intensität des eingekoppelten Lichtes wird mittels einer Photodiode am Ende des Wellenleiters gemessen. In Bild 36 ist der Verlauf der Photodioden-Spannung während des Einkoppelns dargestellt. Im ersten Schritt (bis 600 auf der x-Achse) wird der optimale Einkoppelwinkel ermittelt. Im zweiten Schritt wird dieser Winkel eingestellt und der Abstand des Lichtstrahls relativ zur Gitterkante variiert, um möglichst viel Licht in den Wellenleiter einzukoppeln.

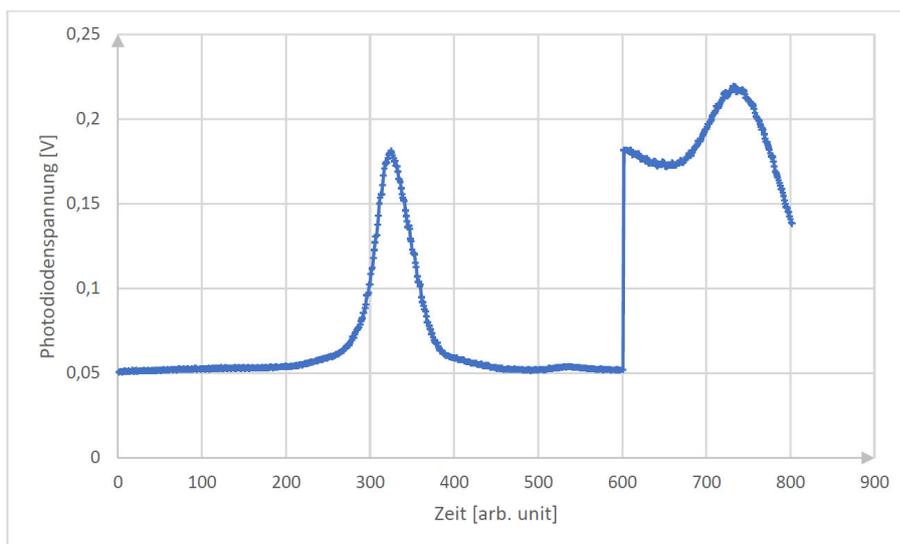


Bild 36: Photodioden-Spannung im Verlauf einer automatischen Einkoppelmaximierung

b) Aufnahmen von evaneszent beleuchteten Zellen

In Kooperation mit dem Institut für molekulare Biologie (IMB) in Mainz wurden Zellen des Typs U2OS mit dem Farbstoff Dil eingefärbt und auf einem Wellenleiter fixiert. Bild 37(a, c) zeigt das Mikroskopie-Bild mit Transmissionsbeleuchtung und Bild 37(b, d) das zugehörige WEFF-Bild. In den WEFF-Aufnahmen ist auf der linken Bildhälfte ein Artefakt, bestehend aus zwei hellen Streifen, sichtbar. Der Ursprung dieses Artefakts wird aktuell untersucht. Weiterhin ist die Intensität des Fluoreszenzlichtes relativ gering, weshalb für zukünftige Experimente ein leistungsstärkerer Laser verwendet wird.

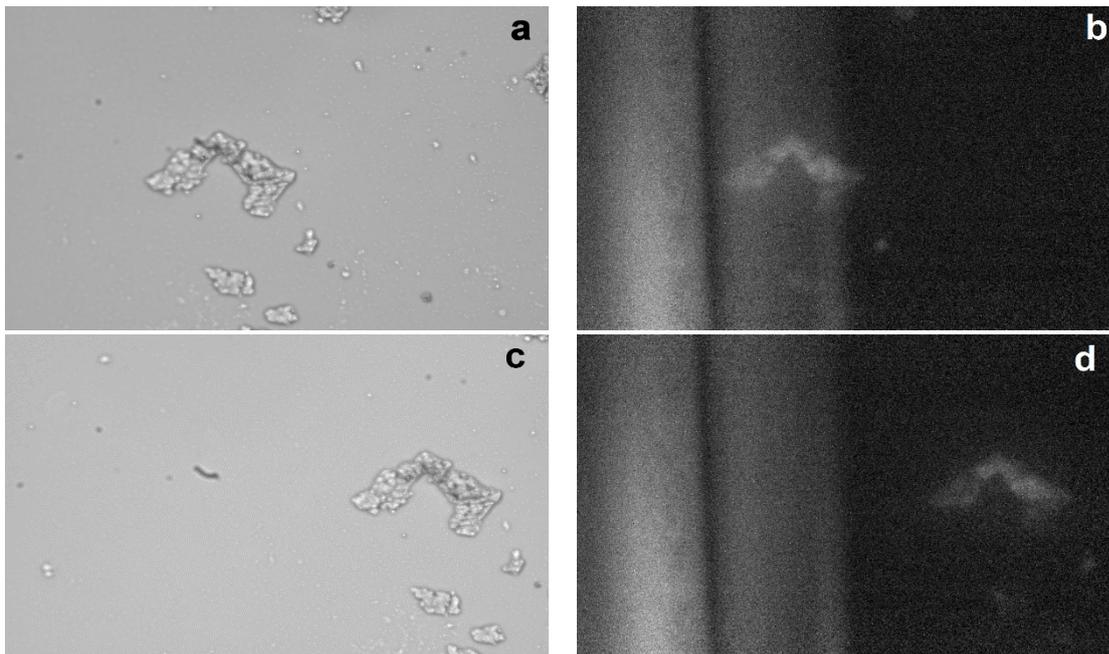


Bild 36: U2OS Zellen 40-fach vergrößert, (a,c) mit Transmissionsbeleuchtung, und (b,d) bei Beleuchtung mit dem evaneszenten Feld der TM_0 Mode

5 Öffentlichkeitsarbeit und Publikationen

5.1 Öffentlichkeitsarbeit

Das **Hessen-Technikum** ist eine Kooperation zwischen hessischen Hochschulen und Unternehmen mit dem Ziel, mehr junge Frauen mit Abitur oder Fachhochschulreife für MINT-Studiengänge zu gewinnen. In diesem Programm absolvieren die Teilnehmerinnen an vier Tagen pro Woche ein vergütetes Unternehmenspraktikum und durchlaufen an einem Tag in der Woche ein „Schnupperstudium“ in den MINT-Fachbereichen einer Hochschule. Für die Praktika gibt es seitens der Unternehmen eine entsprechende Praktikumsbescheinigung. Junge Frauen erhalten so eine Entscheidungshilfe für ihre Berufsorientierung, indem sie MINT in der Praxis erproben und in der Theorie begreifen. Gefördert wird das Projekt durch den Europäischen Sozialfonds und das Hessische Ministerium für Wissenschaft und Kunst. Im Rahmen dieses Programms absolvierte Frau Kunz ein „Schnupperstudium“ mit 5 Abiturientinnen (Bild 38) zum Hessentechnik-Tag (27. Nov. 2019) am IMtech.



Bild 38: Die Teilnehmerinnen Ina, Livia, Cara, Yasamin und Quinju im Reinraum

Ziel des „Schnupperstudentages“ war die Einführung der Teilnehmerinnen in einige Aspekte der Reinraum- und Mikrotechnologie im Rahmen eines **Projektes** zur Herstellung von Mikrostrukturen auf Silizium- bzw. Glaswafern. Dabei sollten die „Mikrostrukturen“ einen sehr individuellen Charakter haben, um die Teilnehmerinnen besonders zu motivieren. Es

konnten deshalb persönliche Fotos als Vorlagen für den Mikrostrukturierungsprozess verwendet werden (siehe Bild 39).



Bild 39: Bildvorlagen der Teilnehmerinnen

Vorbereitung und Durchführung der Arbeiten im Reinraum (Arbeitsschritte):

- Übertragung des individuellen Bildes (Fotos) in eine für die Lithographie geeignete Graustufenmaske
- Reinigung der Substrate (Glas BF33 mit Cr-Schicht oder Silizium-Wafer mit einer 150 nm Siliziumoxid-Schicht)
- Belackten,
- Softbake,
- Belichten am Mask-Aligner
mit Graustufenmaske (Folie, individuelle Bildvorlagen) auf Glaswafer mit Cr-Schicht oder mit IMtech Multiuser-Maske auf Siliziumwafer mit Siliziumoxid-Schicht
- Entwickeln des Fotoresists
- Nasschemisches Ätzen der Cr-Schichten auf Glaswafer
- Trockenätzen der Siliziumoxid-Schicht durch Reactive Ion Etching (RIE) im SF₆-Plasma
- Entfernen des Fotoresist
- Trockenschleudern der Wafer und Begutachtung der Strukturierung am Mikroskop

Die Ergebnisse des „Schnupperstudientages“ (Mikrostrukturen auf den verschiedenen Wafern) konnten die Teilnehmerinnen mit nach Hause nehmen (Bild 40).

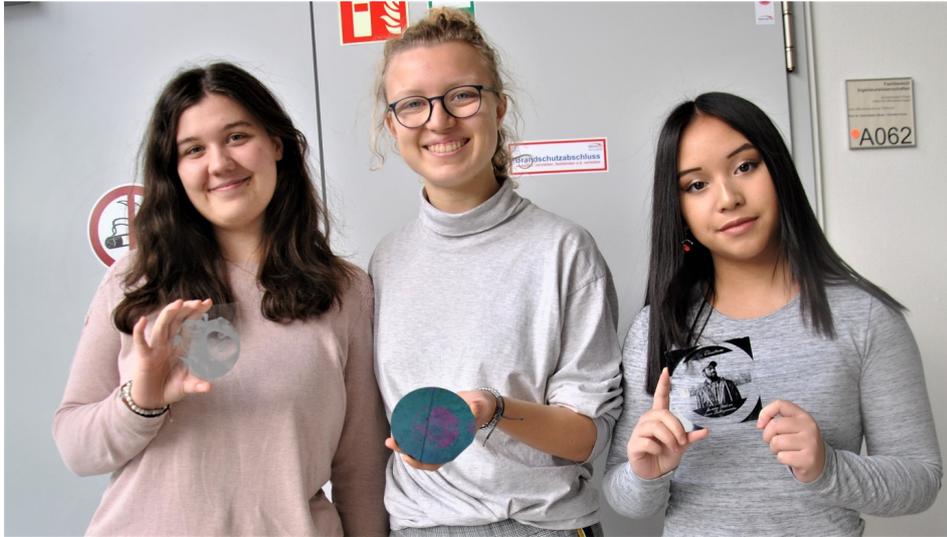


Bild 40: Ergebnisse des „Schnupperstudentages“ im Reinraum: in Glas geätzte Strukturen des Folienbildes, Siliziumoxid-Wafer mit Mikrostrukturen, Chrombild auf Glas

5.2 Wissenschaftliche Publikationen (Fachzeitschriften, Tagungen)

C. Warneke, J. Kuhl, I. Lebershausen, F. Völklein, and S. Kontermann
 Herstellung von Mikrogittern in optischen Gläsern mittels Ultrakurzpulslaserablation,
Proceedings 2019 der 120. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Angewandte Optik,
Darmstadt, Germany (2019), ISSN: 1614-8436

U. Hammerschmidt, C. Sosna, A. Benkert, A. Meier, F. Völklein
 A novel single-short-pulse MEMS upstream thermal flow sensor for gases also measuring
 thermal conductivity and thermal diffusivity
Sensors and Actuators A, 295C (2019) 23-30

U. Hammerschmidt, C. Sosna, A. Benkert, A. Meier, F. Völklein
 A Pulsed Thermal-Flow Sensor (PTF-Sensor),
Sensing and Imaging (SSTA-D-19-00066), to be published

F. Völklein, M. Dürndorfer, A. Meier, C. Kunz, M. Simon
 Thermische MEMS-Vakuumsensoren für den Grob- bis Hochvakuum-Bereich,
Sensormagazin 3, 2019, 31-33

V. Velthaus, B. Tietz, C. Trautmann, F. Völklein, M. Bender
A new setup for desorption measurements with different stimuli,
Rev. Sci. Instrum. (in progress)

M. F. P. Wagner, A.S. Paulus, J. Brötz, W. Sigle, C. Trautmann, K-O. Voss, F. Völklein, M. E. Toimil-Molares
Preparation of Bi nanowire networks and the effects of size reduction on their thermoelectric transport properties,
Advanced Electronic Materials (in progress)

Ch. Bischoff, E. Jäger, U. Umhofer, A. F. Lasagni, F. Völklein
Homogeneous intensity within the Rayleigh length and enhanced depth of focus for Gaussian beams,
Proc. of LPM2020 – the 21st International Symposium on Laser Precision Microfabrication Dresden, 2020

Mihoc D., Lupu L., Wiegand P., Kleinekofort W., Müller O., Völklein F., Glocker M.O., Barka F., Barka G., Przybylski M.
Antibody Epitope and Affinity Determination of the Myocardial Infarction Marker Myoglobin by SPR-Biosensor Mass Spectrometry,
J. Am. Soc. Mass Spectrom. 2020; DOI: <https://doi.org/10.1021/jasms.0c00234>

Przybylski M., Kleinekofort W., Wiegand P., Lupu L.
Den Antikörpern auf der Spur,
Transfer - das Steinbeis-Magazin; Ausgabe 1/2020; ISSN 1864-1768.
<https://transfermagazin.steinbeis.de>

Lupu L., Wiegand P., Hüttmann N., Rawer S., Kleinekofort W., Shugorevai I., Kichkailo A.S., Tomilin F.N., Lazarev A., Berezovski M.V., Przybylski M.
Molecular Epitope Determination of Aptamer Complexes of the Multi-domain Protein C₁Met by Proteolytic Affinity Mass Spectrometry,
ChemMedChem 2020; 15 (4), 363-369; DOI:10.1002/cmdc.201900489

W. Kleinekofort, M. Przybylski
Safety algorithms based on pattern recognition reduce false positive alarms during hemodialysis,
Int. J. Artif. Organs 2019; 42 (8): 415

B.A. Petre, L. Ion, C. Dimitriu, S. Maeser, W. Kleinekofort, C. Bulei, M. Przybylski
Clinical Diagnostics of Lysosomal Storage Diseases in DBS using new substrates by MRM-
MS,
Proceedings of the 67th ASMS Conference on Mass Spectrometry and Allied Topics, Atlanta
(06/2019)

M. Przybylski, L. Lupu, P. Wiegand, N. Hüttmann, S. Rawer, W. Kleinekofort, I.
Shchugoreva, A.S. Kichkailo, F.N. Tomilin, A. Lazarev, M.V. Berezovski
Epitope Structures Of Aptamer Complexes Of The Multi-Domain Protein C-Met Revealed By
Proteolytic Affinity- Mass Spectrometry,
Proceedings of the 67th ASMS Conference on Mass Spectrometry and Allied Topics, Atlanta
(06/2019)

L. Lupu, P. Wiegand, N. Hüttmann, S. Rawer, W. Kleinekofort, A. Lazarev, M. V. Berezovski,
M. Przybylski
Molecular Epitope Determination of Aptamer Complexes of the Multi-domain Protein C-Met
by Proteolytic Affinity- Mass Spectrometry,
Proceedings of the 52nd Annual DGMS Conference, Rostock (03/2019)

Matthias Enders, Maximilian Kleber, Georg Derscheid, Kathrin Hofmann, Hans-Dieter Bauer,
Birgit Scheppat
Parallel FTIR-ATR Spectroscopy and Gravimetry for the In-Situ Hydrogen Desorption
Measurement of Sodium Alanate (NaAlH_4) Powder Compacts,
Applied Optics, 2020 eingereicht

Ioannis Pantouvakis, Christian Warneke, Hans-Dieter Bauer
Change of the Optical Properties of FOTURAN II® after UV-exposure and Annealing as
investigated by Transmission Spectrometry, Total Reflection, and Interference Lithography,
Optical Materials, 2020 eingereicht

Matthias Enders, Georg Derscheid, Hans-Dieter Bauer, Birgit Scheppat
Analyse der Desorptionskinetik von NaAlH_4 für den Einsatz als Füllstandssensor für
Festkörper-Wasserstofftanks,
Vortrag beim REGWA Energiesymposium, Hochschule Stralsund, 2019

M. Saad Khan, Georg Rose, Bernd Schweizer, Andreas Brensing

EM-Thermal Co-Simulation of Microwave Ablation Applicator in Liver Tissue Phantom with Bowtie-Slot Surface Antenna,

14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2020.

Nicola D'Ascenzo, Emanuele Antonecchia, Min Gao, Xiangsong Zhang, Gerhard Baumgartner, Andreas Brensing, Zhen Li, Qiong Liu, Georg Rose, Xinchong Shi, Bo Zhang, Chien-Min Kao, Jiazuan Ni, and Qingguo Xie

Evaluation of a digital brain Positron Emission Tomography scanner based on the Plug&Image sensor technology,

IEEE; IEEE TRANSACTIONS ON RADIATION AND PLASMA MEDICAL SCIENCES, May 2020, 4(3), 327-334.

Nicola D'Ascenzo , Member, IEEE , Emanuele Antonecchia, Andreas Brensing, Werner Brockherde , Member, IEEE , Stefan Dreiner, Johannes Ewering, Marvin Kuhn, Andrei Schmidt , Peter vom Stein, Weidong Wang, Zhenliang Zhou, and Qingguo Xie

A Novel High Photon Detection Efficiency Silicon Photomultiplier with Shallow Junction in 0.35 μm CMOS,

IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 40, NO. 9, p. 1471, SEPTEMBER 2019

M. Saad Khan, Georg Rose, Bernd Schweizer, Andreas Brensing

Design and Simulation Analysis of a 17 Element Spiral Antenna Array for Brain Imaging,
41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2019.

5.3 Masterarbeiten

Benjamin Thieme

Untersuchung des Mikrowellen-Transmissionsverhaltens bei Mikrowellen-Ablation,
Masterarbeit 2020, Hochschule RheinMain

Lisa Kohlmann

Entwicklung eines nicht-dispersiven Raman-Detektors zur Identifizierung von Mikroplastik in Wasser,
Masterarbeit 2020, angefertigt am Fraunhofer-Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme, Mainz

Jonas Kuhl

Rapid prototyping of diffractive optical elements embedded in optical glasses,
Masterarbeit 2020, Hochschule RheinMain, Institut für Mikrotechnologien, Arbeitsgruppe Photonik

Simon Paulus
Nachbehandlungsverfahren für femtosekundenlaserpuls schwefel-hyperdotiertes Silizium zur Steigerung der Kristallinität,
Masterarbeit 2020, Hochschule RheinMain, Institut für Mikrotechnologien, Arbeitsgruppe Photonik

Lukas Ruppel
Beleuchtungslösungen für die Spektroskopie,
Masterarbeit 2020, Hochschule RheinMain, in Kooperation mit der tec5 AG, Oberursel

Sven Thoma
Erfassen und Kompensieren von Wellenlängenfluktuationen mittels einer Referenzzelle aus Glas,
Masterarbeit 2020, Hochschule RheinMain, in Kooperation mit der AMETEK GmbH, Geschäftsbereich Lumphos, Weiterstadt

Christian Warneke
Prozess- und Experimentdesign zur Mikrostrukturierung optischer Gläser mittels UKP-Laserlithographie,
Masterarbeit 2019, Hochschule RheinMain, Institut für Mikrotechnologien, Arbeitsgruppe Photonik

Patrick McKearney
Entwicklung und Untersuchung prozessoptimierter Intensitätsverteilungen für die Lasermikrobearbeitung unter Einsatz eines diffraktiven Strahlformungssystems,
Masterarbeit 2019, Hochschule RheinMain, in Kooperation mit der Pulsar Photonics GmbH, Aachen

Christian Uz
Montage, elektrische Ansteuerung, Vermessung und Optimierung eines hochintegrierten mikrooptischen Sensors zur Online-Fluidcharakterisierung,
Masterarbeit 2019, angefertigt am Fraunhofer-Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme, Mainz

Manuel Mathes
Integration von piezoelektrischen Elektreten in Textilien als Energy Harvester zur Entwicklung von energieautonomen Smart Wearables,
Masterarbeit 2019, angefertigt am Fraunhofer-Institut LBF, Darmstadt

Verena Velthaus
Untersuchung von Beschleuniger-relevanten Oberflächen mittels Elektronen-induzierter Desorption,
Masterarbeit 2020, angefertigt am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt

Oliver Müller
Strukturierung und Untersuchung von Gittern für eine Oberflächenplasmonenkopplung,
Masterarbeit 2019, Hochschule RheinMain, Institut für Mikrotechnologien, Rüsselsheim

RicardoViola
Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung von sprödharten, transparenten Werkstoffen – Optimierung der Prozessstrategie zur Herstellung von Interposern,
Masterarbeit 2019, in Kooperation mit Schott AG, Mainz

Leon Kirsch
Ionenstrahl-induzierte Desorption von kryogenen Oberflächen,
Masterarbeit 2019, angefertigt am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH,
Darmstadt

Christian Zimmermann
Simulation von transienten Temperaturverteilungen eines Mediums bei hochenergetischer
Ionenbestrahlung,
Masterarbeit 2019, angefertigt am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH,
Darmstadt

Ingo Kaufeld
Weiterentwicklung, Aufbau und Funktionstest eines Ionisationskammer-Stacks zur
Bestimmung der Reichweite von Ionenstrahlen,
Masterarbeit 2019, angefertigt am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH,
Darmstadt

Marcel Eberius
Auslegung und Optimierung eines magnetischen Back-Bias Sensorsystems zur direkten
Zahnradabtastung,
Masterarbeit 2020, angefertigt am iC-Haus GmbH, Bodenheim

5.4 Bachelorarbeiten

Christian Marx
Abhängigkeit der Brechzahländerung von Femtosekundenlaser-Prozessparametern,
Bachelorarbeit 2019, Hochschule RheinMain, Institut für Mikrotechnologien, Arbeitsgruppe
Photonik

Matthis Boog
Herstellung und Charakterisierung von Wellenleitern für Waveguide Evanescent Field
Fluorescence Mikroskopie,
Bachelorarbeit 2019, Hochschule RheinMain, Institut für Mikrotechnologien, Arbeitsgruppe
Photonik

Sebastian Eicher
Herstellung und Untersuchung von, mittels laserinduzierten Gravierprozessen entwickelten,
optisch hochauflösenden Encodermaßverkörperungen,
Bachelorarbeit 2019, Hochschule RheinMain, in Kooperation mit dem iC-Haus, Bodenheim

Patrick Rose
Spektroskopische und interferenzlithographische Untersuchungen von FOTURAN® II-Glas
während UV-Belichtung und Temperprozess,
Bachelorarbeit, 2020, Hochschule RheinMain, Institut für Mikrotechnologien, Arbeitsgruppe
Photonik

Bianca Becker
Produktionsbegleitende Messungen von physikalischen Materialeigenschaften an
Glaskeramiken,
Bachelorarbeit 2020, Hochschule RheinMain, in Kooperation mit Schott AG, Mainz

Somia Zealouk

Bestimmung der komplexen Permittivität von Flüssigkeiten bei 2,45 GHz mittels Mikrowellen Reflexionsverfahren,
Bachelorarbeit 2020, Hochschule RheinMain

Patrick Rose

Spektroskopische und interferenzlithographische Untersuchungen von FOTURAN®II-Glas während UV-Belichtung und Temperprozess,
Bachelorarbeit 2020

Thorsten Geyer

Auslegung und Aufbau von fasergestützten Brechzahl- und Trübungssensoren,
Bachelorarbeit 2020, angefertigt am Fraunhofer-Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme, Mainz, und IMtech-intern

Marc Schönberger

Ermittlung einer Kennzahl zur Charakterisierung der Gaskonvektion im Durchlaufofen mittels hintergrundorientierter Kameramessung,
Bachelorarbeit 2019, angefertigt bei der SCHOTT AG, Mainz

Andre Ultes

Ionische Flüssigkeit in Nanoporen: Struktur und Phase aus Röntgenstreuung,
Bachelorarbeit 2019, angefertigt am Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Mainz

Markus Ketomäki

A study of complex coacervation of ovalbumin with alginate,
Bachelorarbeit 2019, angefertigt am Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Mainz

Marco-Jose Heyn

Bereitstellung von Kennzahlen zur Bestimmung von Konvektionszuständen in einem Industrieofen mittels einer abgewandelten BOS-Methode über eine OPC/UA-Datenübertragung,
Bachelorarbeit 2020, angefertigt bei der SCHOTT AG, Mainz

Philipp Kraft

Entwicklung einer chemometrischen Methode zur Materialerkennung in gemischten Mikroplastik Suspensionen basierend auf Raman-Spektrometrie,
Bachelorarbeit 2020, angefertigt am Fraunhofer-Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme, Mainz

Imke Adrian

Laserkantenbearbeitung von Glas und Glaskeramiken,
Bachelorarbeit 2020, angefertigt bei der SCHOTT AG, Mainz

Patrick Römer

Untersuchung eines MEMS-He-Sensors für die He-Leckdetektion,
Bachelorarbeit 2020, Hochschule RheinMain, Institut für Mikrotechnologien, Rüsselsheim

Martin Krebs

Abscheidung einer lichtundurchlässigen thermomechanisch und mechanisch stabilen Dünnschicht auf einer LED,
Bachelorarbeit 2020, in Kooperation mit iC-Haus GmbH, Bodenheim

Philipp Kaiser

Optimierung der Photolithographie am Direktbelichter (Heidelberg DWL66+) zum Schreiben von Strukturen auf KOH-geätzten Seitenwänden,
Bachelorarbeit 2019, angefertigt am Fraunhofer-Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme, Mainz

Chris Frick

Verbesserung eines UHV-LHe-Flussskryostaten in Bezug auf erreichbare Endtemperatur und Abkühlgeschwindigkeit,
Bachelorarbeit 2020, in Kooperation mit ScientaOmikron, Taunusstein

Eduard Betz

Untersuchung der Zuverlässigkeit eines (o)QFN32-Package in Abhängigkeit der Diegröße mittels Temperaturzyklen,
Bachelorarbeit 2019, in Kooperation mit iC-Haus GmbH, Bodenheim

Maximilian Hofmann

Optimierung eines Strömungskanals zur Bestimmung des aktinischen Flusses
Bachelorarbeit 2019, in Kooperation mit Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz

Marvin Zimmermann

Überwachung eines Hydrophobierungsprozesses über Kontaktwinkelmessungen und durch eine Teststruktur
Bachelorarbeit 2019, in Kooperation mit Würth-Elektronik, Niedernhall

Marius Heil

Mikrowellen-Reflexionsverfahren zur Bestimmung der Permittivität von verlustbehafteten Dielektrika,
Bachelorarbeit 2019, Hochschule RheinMain

Arnold Moukam

Untersuchung der Mikrowelleneigenschaften von wässrigen TX100-Lösungen,
Bachelorarbeit 2019, Hochschule RheinMain

Laura Sobisch

Auslegung, Konstruktion und Analyse von Mikrowellenresonatoren zur Bestimmung der Permittivität von Phantommaterialien,
Bachelorarbeit 2019, Hochschule RheinMain