

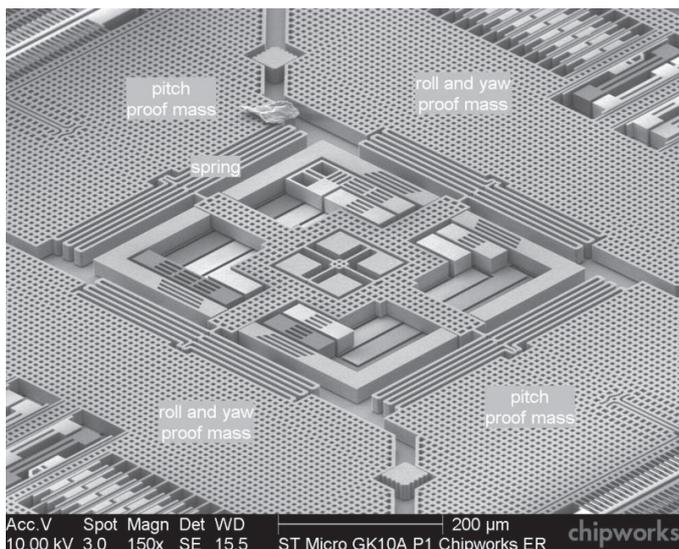
# Steuerbare Simulation komplexer Mikrosysteme (MicroApp)

Prof. Dr.-Ing. Steffen Strehle / Fachgebiet Mikrosystemtechnik  
Technische Universität Ilmenau / Fakultät für Maschinenbau/Fachgebiet Mikrosystemtechnik  
Institut für Mikro- und Nanotechnologien MacroNano®

## 1. Motivation der geplanten Lehrinnovation

### 1.1. Vorstellung des Themenfelds

Die Mikrosystemtechnik ist seit nunmehr mehreren Jahrzehnten einer der Innovationstreiber im Bereich der Sensorik und Aktorik für ein breites Anwendungsfeld. Ohne miniaturisierte Systeme, wie Drucksensoren, Antennen, Mikrooptik, Mikroschalter, Mikrophone, Beschleunigungssensoren, Rotationssensoren und Kameras wäre allein ein Smartphone undenkbar (**Abb. 1**). Mikrosysteme ermöglichen „smartHome“ und „smartWatch“ ebenso wie Fahrerassistenz und -sicherheit (z.B. ESP, Airbag-Kontrolle), sie erlauben „smarte“-Robotik, erfassen Umweltparameter und sind Basis der Industrie 4.0 sowie des „Internet-of-Things“. Auch in der biochemischen und medizinischen Diagnostik (z.B. Krebs-Früherkennung, „point-of-care“-Diagnostik) als auch bei der minimal-invasiven Chirurgie können Mikrosysteme eingesetzt werden. Miniaturisierte 3D-Zellkultursysteme könnten sogar Tierversuche in Zukunft überflüssig machen.



**Abb. 1:** Mikro-3-Achsen-Gyroskop (Rotations-Bewegungssensor), wie es z.B. für die Umsetzung des elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) in Kraftfahrzeugen erforderlich ist aber auch im iPhone 4 zum Einsatz kam (Elektronenmikroskopische Aufnahme) *Quelle:* <https://www.memsjournal.com/2011/01/motion-sensing-in-the-iphone-4-mems-gyroscope.html>

Obwohl uns Mikrosysteme quasi permanent umgeben, so entziehen sich deren Grundlagen, wie die erforderlichen Mikrotechnologien, die Designregeln als auch die material-physikalischen und chemischen Effekte unserem täglichen Erleben. Der ausgeprägt interdisziplinäre Charakter der Mikrosysteme kann daher oft nur schwer und eingeschränkt an Außenstehende und damit auch in der Lehre in der erforderlichen Komplexität vermittelt werden. Mikrosysteme werden außerhalb der Forschung auch nicht diskret angesteuert, sondern mit modernen integrierten Schaltkreisen gekoppelt, was die Komplexität der Systeme weiter steigert.

## 1.2. Relevanz der Lehre im Bereich Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik kann mit ihren zugehörigen Technologien ein breites interdisziplinäres Anwendungsspektrum aufweisen und ist in der Lage zur Bewältigung zahlreicher gesellschaftlicher Herausforderungen und Erfordernisse innovativ beizutragen (z.B. Alterung der Gesellschaft, Robotik, autonomes Fahren, Digitalisierung, Energieproblematik). Mikrosystemtechnische Hochtechnologien sind in Europa, Deutschland als auch regional in Thüringen sehr gut etabliert (z.B. Bosch, Infineon, X-FAB). Die Nachfrage nach Mikrosystemen ist nicht nur anhaltend, sondern steigend. Ursache sind neben Smartphone-Herstellern insbesondere auch Automobilhersteller, die in ihren Fahrzeugen in zunehmendem Maße Mikrosensorik verbauen (z.B. Bewegungs-, Bild-, Druck-, Abstands und Lage-Sensoren). Des Weiteren kommen Trendprodukte wie Smartwatch, Wearables, VR- und AR-Technologie sowie auch Anlagen, Luft- und Raumfahrt, Robotik und Systeme der Industrie und sogar die Landwirtschaft hinzu. In diesem Zusammenhang möchte ich auf einen Aufsatz von W. Schulz verweisen: „MEMS, die Hoffnungsträger der europäischen Chipindustrie“. (VDI Nachrichten, 2014, Ausgabe 46). Eine Marktanalyse der Firma „BlueWeave Consulting“<sup>1</sup> prognostiziert z.B. einen internationalen Anstieg des Marktvolumens im Bereich der Mikrosystemtechnik von ca. 14,3 (2022) auf 23,5 Mrd. USD bis 2029 (Compound Annual Growth Rate ca. 7,5 %)! Um der Nachfrage und Steigerung gerecht zu werden ist es auch erforderlich, die benötigten Fachkräfte im Bereich der Mikrosystemtechnik bestmöglich auszubilden.

## 1.3. Persönliche Motivation und Standort TU Ilmenau

Als Lehrender im Bereich der Mikrotechnik, Mikrosensorik und Mikroaktorik auf Bachelor- und Masterniveau (in Deutsch und Englisch) ist es mein Anspruch die Komplexität des Themenfelds Mikrosystemtechnik bestmöglich und mit minimierten Hürden zu vermitteln. Leider zeigt aber z.B. das Prüfungsergebnis oder die Arbeitsweise bei Abschlussarbeiten und Projekten, dass Wissen zwar vorhanden ist, aber nicht im erforderlichen Maße verstanden wurde und auch nicht interdisziplinär verknüpft werden kann.

In der Lehre im Bereich Mikrosystemtechnik wird, unabhängig vom Einsatz der digitalen Lehrplattform-Moodle, primär auf konventionelle Medien zurückgegriffen, was nicht den Anforderungen der Themenkomplexität gerecht wird. Bei den konventionellen Medien handelt es sich primär um Bildmaterial aus Fachbüchern und wissenschaftlichen Aufsätzen, eigene Schemazeichnung und fremdes Videomaterial (z.B. von Youtube). Um die Wissensvermittlung insbesondere im Bereich der Mikrotechnologie zu verbessern, wurde 2020 bereits durch mich initiiert an einer 3D-Digitalisierung von Mikrotechnologielaboren als VR-Tour gearbeitet (Abb. 2 links)<sup>2</sup>, die kontinuierlich in mehreren Lehrveranstaltungen, die Doktorandenausbildung und auch bei der Öffentlichkeitsarbeit (z.B. Studieninfotag) sehr erfolgreich bereits eingebunden ist.

---

<sup>1</sup> [www.blueweaveconsulting.com/finance.yahoo.com/news/micro-electro-mechanical-systems-mems-150000066.html](http://www.blueweaveconsulting.com/finance.yahoo.com/news/micro-electro-mechanical-systems-mems-150000066.html)

<sup>2</sup> gefördert durch den Stifterverband

Zusätzlich wurden auch mehrere Videos zur Darstellung von komplexen Technologieabläufen gemeinsam mit studentischen Gruppen und dem Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien (Abb. 2 Mitte) als auch 3D-Druckmodelle (Abb. 2 rechts) für das haptische Erleben und „Spielen“ mit „Mikrosystemen“ im makroskopischen Raum erstellt, was durchweg positiv bzgl. Verständnis und Interessenbildung von den studentischen Gruppen bewertet wurde.



**Abb. 2:** (links) Bildausschnitt aus der virtuellen Reinraumlabortour; (Mitte) Ausschnitt aus einem Mikrotechnologie-Prozesstechnik-Video: UV-Lithographie; (rechts) Beispiel für ein stark vereinfachtes 3D gedrucktes Modell eines Beschleunigungssensors mit kapazitiver Auslesung und ein Modell zur Visualisierung der Kristallebenen und -richtungen bei einem Silizium-Einkristall.

Auch wenn sich die Kombination aus digitalem Lehrmaterial und haptischen 3D-Vorlesungsmodellen insgesamt sehr bewährt, so sind all diese Elemente zu passiv und lassen auch keine aktive Variation von Systemparametern in unmittelbarer Reflexion zur Funktionsänderung zu. Ich bin davon überzeugt, dass eine deutliche effizientere und anschaulichere Wissensvermittlung komplexer Sachverhalte durch das aktive Erleben gegeben ist und mit Bezug auf die Mikrosystemtechnik so „spielerisch“ Optimierungen, Designregeln, der Einfluss von Realstruktureffekten und Technologien als auch das Zusammenspiel mehrerer Domänen (z.B. elektro-mechanisch-thermisch) veranschaulicht werden kann.

Die Forschung an Mikrosystemen und der zugehörigen Technologie stellt nicht nur, wie zuvor bereits erwähnt, einen Kernaspekt für technische Innovationen und die Wirtschaftsentwicklung dar, sondern ist auch an der TU Ilmenau als Forschungsschwerpunkt mit mehreren Professuren und dem Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien ausgeprägt etabliert. Das Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien ist eine zentrale Einrichtung der TU Ilmenau und verfügt über Reinräume und Labore mit ca. 2.000 m<sup>2</sup> Gesamtfläche und mehr als 200 prozesstechnische und analytische Anlagen (Wert ca. 30 MioEUR). Hinzu kommt die Kooperation mit regionalen Firmen wie z.B. 5Microns GmbH (Ilmenau), X-FAB (Erfurt), MicroHybrid (Ilmenau), eCeramik GmbH und Carl Zeiss Jena und Forschungseinrichtungen wie z.B. CIS (Erfurt), IMMS (Ilmenau), IBA Heiligenstadt und Fraunhofer IDMT (Ilmenau). Zur Stärkung des Standorts und der Ausbildung im MINT-Bereich ist eine hochwertige und effiziente Wissensvermittlung in der Ausbildung junger Menschen unumgänglich, was mit Hilfe des Vorhabens bzw. der Lehrinnovation für die Mikrosystemtechnik erfolgen soll. Die nachfolgend detaillierter beschriebenen Ansätze die erarbeitet und evaluiert werden sollen, können grundsätzlich auf weitere Fachdisziplinen problemlos übertragen werden. Es ist daher davon auszugehen, dass das Vorhaben durch andere Fachgebiete schnell „nachgeahmt“ werden wird, um z.B. auch komplexe makroskopische Funktionsgruppen bei Maschinen oder auch mechatronische Systeme besser vermitteln zu können.

## 2. Geplante Maßnahmen und Umsetzung

### 2.1. Ziele der geplanten Lehrinnovation

Das Ziel der geplanten Lehrinnovation ist die Erstellung von steuerbaren Simulationen im Bereich komplexer Mikrosysteme. Hierbei sollen verschiedenste Parameter, wie Geometrien, Materialkenngrößen, Eingangssignale, u.s.w., frei eingestellt und kombiniert werden können, um das sich ändernde Systemverhalten bewerten zu können. Die Simulationen sollen hierbei nicht nur die idealisierte Funktion einzelnen Komponenten und ganzer Mikrosysteme beinhalten, sondern insbesondere technologiebedingte Realstruktureffekte und parasitäre Effekte (z.B. Rauschen) miteinschließen. Als Beispiele seien hier z.B. Abweichungen von Flankenparallelität bei planaren Federn genannt, welche aus der Ätzung der Strukturen resultieren können und zu unerwünschten Torsions- und Vertikalschwingungen (aus der Ebene heraus) führen können. Auch die Dämpfung bei Resonatoren durch Energieeinleitung in die Einspannung (sog. Anker) kann ebenso verdeutlicht werden, wie das fluidische Strömungsverhalten verschiedener Medien in Mikrokanälen. Für Systeme und Komponenten können damit auch Skalierungseffekte bei der Systemminiaturisierung deutlich verbessert veranschaulicht werden, da die Simulationen auf den material-physikalischen Differentialgleichungen beruhen. Des Weiteren lässt sich auch die Bedeutung von Ähnlichkeitskennzahlen (z.B. Reynold-Zahl) direkt visualisieren, statt abstrakte Formalismen zu bemühen. Im Rahmen der Förderung sollen auf Basis der Simulationen auch neuartige digitale Übungen, „Praktika“ und Prüfungsszenarien mit erarbeitet werden.

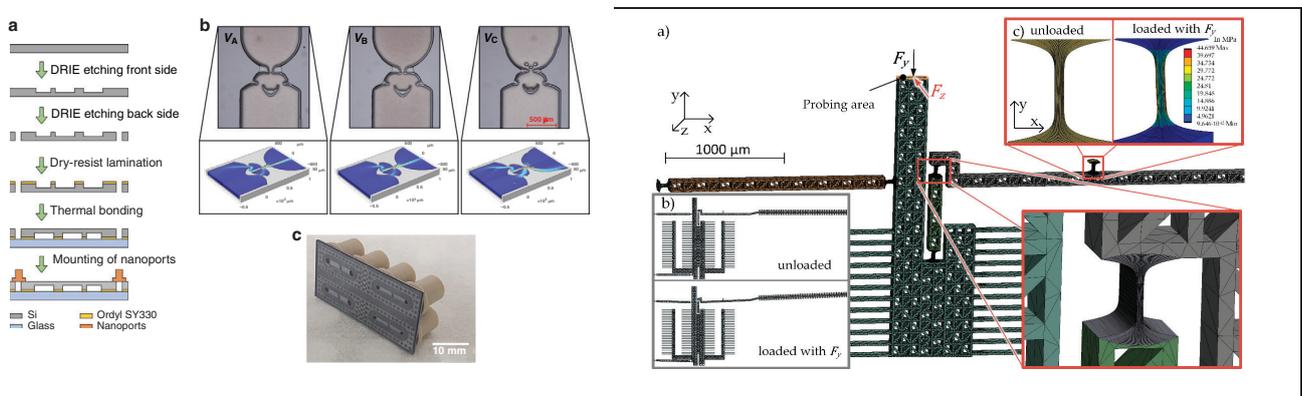
### 2.2. Lösungsansatz über Finite-Elemente-Methode mit Comsol-Multiphysics

Die in den Ingenieurwissenschaften langjährig etablierte Finite-Elemente-Methode (kurz: FEM) verwendet die zur Systembeschreibung erforderlichen Differentialgleichungen und löst diese kombiniert für quasi-beliebige Systemgeometrien und Materialkombinationen mit Hilfe numerischer Algorithmen. Hierdurch können Systeme in der Charakteristik (z.B. dynamisches Verhalten) bewertet werden, welche nicht mit einfachen analytischen Gleichungen beschrieben werden können. Das Problem wird bei der FEM-Simulation durch Unterteilung des Gesamtsystems in kleinere Elemente gelöst, wobei auch Lösungen durch Kombination von Domänen möglich sind. Als Beispiel sei hier auf einen elektrischen Heizdraht verwiesen, der auch seinen Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur ändert. Hierbei würde für eine Lösung z.B. die elektrische mit der thermischen Domäne gekoppelt werden. Der Einsatz von FEM ist im Bereich der Mikrosystementwicklung etabliert und wird auch in der Lehre von mir bereits als kurze Einführung vermittelt. Die Umsetzung von komplexen Systemen erforderlich jedoch eine langjährige Erfahrung im Umgang mit dieser Art von Simulationen und ein sehr fundiertes Grundwissen der Mikrosystemtechnik. Je nach Komplexität des Systems und der Anzahl der verknüpften physikalischen Domänen kann eine Simulation allein in der Berechnung angefangen von wenigen Minuten bis hin zu Tagen dauern. Das bedeutet, dass eine unmittelbare Durchführung einer Simulation innerhalb einer Lehrveranstaltung für komplexere Funktionsgruppen und Systeme kaum sinnvoll ist.

Im Rahmen der Lehrinnovation soll die an der TU Ilmenau eingesetzte FEM Software Comsol Multiphysics<sup>3</sup> zum Einsatz kommen, mit der wir als Fachgebiet Mikrosystemtechnik langjährig Erfahrung haben. Als Beispiel seien hier zwei kürzliche Veröffentlichungen genannt (**Abb. 3**).

1. Bohm, S., Phi, H.B., Moriyama, A. et al. *Highly efficient passive Tesla valves for microfluidic applications*. (Nature) *Microsyst Nanoeng* 8, 97 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41378-022-00437-4Fgfdgfg>
2. Wedrich, K., Cherkasova, V., Platl, V. et al. *Stiffness Considerations for a MEMS-Based Weighing Cell*. *Sensors* 23, 3342 (2023). <https://doi.org/10.3390/s23063342>

Die Software gestattet es, zahlreiche Domänen (z.B. elektrisch, fluidisch, thermisch, optisch) zeitabhängig miteinander zu verknüpfen und funktionelle Situationen auch für komplexe Geometrien und Materialkombinationen zu lösen. Aus diesem Grund können Einflüsse von Realstrukturen, Materialien oder Eingangssignalen auf das Systemverhalten in einer Simulation sehr gut visualisiert und untersucht werden. Das Systemdesign kann dabei auch auf bestimmte Kenngrößen optimiert werden (vgl. o.a. Publikation 1.). Während im Bereich der Forschung FEM-Simulationen einen großen Stellenwert besitzen, fehlt bislang die didaktische Aufbereitung für die Lehre, was Bestandteil der Lehrinnovation ist. Die für den Antrag relevante Software Comsol Multiphysics und auch einige weitere Softwareanwendungen (z.B. für einfache Animationen, Videoschnitt, Erstellung von Anleitung, Bildbearbeitung, CAD) stehen bereits mit allen erforderlichen Lizenzen zur Verfügung. Um die Forschungsrechenkapazität des Fachgebiets bei der FEM zu entlasten, ist einzig die Anschaffung eines eigenen Computers zzgl. Zubehör für das Vorhaben geplant.

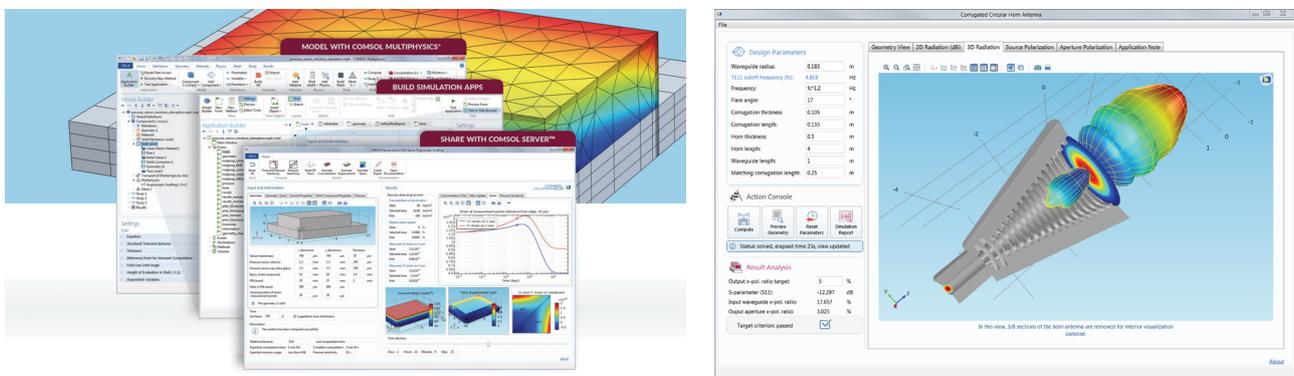


**Abb. 3:** (links) Beispiel aus Publikation 1. (Bohm et al. 2022) zur FEM-Optimierung von miniaturisierten Tesla-Ventilen in der Mikrofluidik mit Verknüpfung zur Mikrotechnologie und zum Experiment; (rechts) Beispiel aus Publikation 2. (Wedrich et al. 2023) für eine Mikrokompensationswaage mit kapazitiver Auslesung als FEM-Modell.

Im Rahmen der Lehrinnovation ist vorgesehen, dass die Studenten sich nicht primär mit der Software, sondern mit einem spezifischen System auseinandersetzen können und hier in „spielerischer“ Art und Weise das Systemverhalten steuern können. Über das Comsol Modul „Application Builder“ können dabei komplexe Simulationen als eine einfach steuerbare App realisiert werden, welche ohne Programm- und FEM-Kenntnisse ausgeführt werden kann.

<sup>3</sup> <https://www.comsol.de>

Bei Bedarf kann auch Zugriff auf das gesamte FEM-Modell gewährt werden, so dass prinzipiell auch die Umsetzung von Modellierungen in der FEM-Software studiert werden kann. Zur Erzeugung steuerbarer Simulationen wird als erstes ein System in den betreffenden Parameterbereichen umfassend simuliert, so dass die Ergebnisse der Simulation bereits vorliegen. Mit Hilfe des „Application Builder“ (Abb. 4) wird die o.a. App erzeugt, welche auf die Daten direkt zurückgreifen kann und über entsprechende Verknüpfungen und Softwareregler eine Steuerung des Systems in der Simulation gestattet. Diese App kann direkt über einen Server bzw. einen Link auf der Lernplattform Moodle zugänglich gemacht werden, so dass keine eigene Comsol-Version installiert werden muss oder eine größere Rechenleistung erforderlich ist. Comsol Multiphysics bietet darüber hinaus eine umfassende Palette der Datenvisualisierung, so dass für jeden Anwendungsfall geeignete Darstellungen auch für komplexe 3D-Modellierungen definiert werden können. Nebeneffekt der Visualisierungen ist, dass die studentischen Nutzergruppen auch in diesem Themenfeld der elektronischen Datenaufbereitung und Visualisierung neue Erkenntnisse und Kompetenzen erlangen können.



**Abb. 4:** (links) Beispiel für den Arbeitsablauf zur Erstellung einer App in Comsol Multiphysics: 1. FEM-Modell erstellen, 2. App mit erforderlichen Funktionen zusammenstellen, 3. Teilen; (rechts) Beispiel für eine App mit einer Simulation einer Hornantenne, wobei verschiedene Designparameter geändert werden können. (Quelle: Comsol Multiphysics).

Die jeweiligen Mikrosysteme und Modelle für die Startphase der steuerbaren Simulation gilt es innerhalb des Vorhabens zu Beginn zu evaluieren und festzulegen. Ausgehend von den derzeitigen Vorlesungsinhalten sind dabei aber die nachfolgenden Mikrosysteme speziell im Fokus, z.B.:

- Silizium-Biegebalken als Kraftsensor: *kann in einfacher Form auch analytisch beschrieben werden; ist bereits aus der technischen Mechanik bekannt; zusätzlich können 3D-Aufbauten (z.B. Piezoreistoren), nicht-ideale Effekte an der Einspannung, mechanische Verspannungen, und das Frequenzverhalten nachvollziehbar illustriert werden*
- Drucksensor mit piezoresistiver Auslesung: *Abhängigkeit geometrischer Parameter; Längs- und Querdehnungseffekte; Systemversagen; Auslesung mit Wheatstonebrückenschaltungen in verschiedenen Konfigurationen*

- Mikro-Beschleunigungssensor mit kapazitiver Auslesung: *einfaches Feder-Masse-System mit planaren Federn, z.B. Einfluss der Miniaturisierung, der Geometrie, Dämpfungsmechanismen und technologische Realstruktureffekte können anschaulich beschrieben werden*
- Mikro-Gyroskop: komplexeres Feder-Masse-System System mit orthogonalen Moden (sense/drive); simultane kapazitive Sensorik und Aktorik
- mikrofluidisches System: laminare Kanal-Strömungen, Mixerstrukturen, Tesla-Ventile
- weitere: ionensensitiver Feldeffekttransistor, Dynamik miniaturisierter Heizer, Skalierung von Elektromagneten, piezoelektrische Resonatoren, diffraktive optische Elemente, thermisches und mechanisches Rauschen, u.s.w.

Hierbei ist von Vorteil, dass im Fachgebiet Mikrosystemtechnik bereits umfassende Erfahrungen vorliegen und auch einige FEM-Grundmodelle über Datenbanken verfügbar sind. Damit ist insgesamt eine gute Basis zur Entwicklung der Apps für Lehrzwecke gegeben.

### **2.3. Einbindung in die Lehre**

Die steuerbaren Simulationen auf FEM-Basis haben den Vorteil, dass sie ohne Zeitverzug direkt in der Lehre eingesetzt werden können. Damit kann in moderierter Weise die Systemfunktion oder auch einmal das Systemversagen digital visualisiert demonstriert werden. Im Rahmen des Vorhabens sollen aber insbesondere auch neue Konzepte unter Einbindung der steuerbaren Simulationen als Lehrinnovation erarbeitet, erprobt und evaluiert werden.

Als erstes bieten sich hierbei Seminare als „flipped classroom“-Konzept an. Hierbei würden die Studenten anhand vorgegebener Simulationen, umfassender Anleitungen und Mikrosystembeschreibungen in Kombination mit dem vermittelten Wissen der Vorlesung verschiedene Aufgaben lösen bzw. Systeme im Design bewerten und optimieren. Die Ergebnisse können dann in Präsenz besprochen werden oder auch über eine automatisierte Auswertung zur Steigerung der Reflexion beim Selbstlernen erfolgen. Letzteres wird derzeit in Form eines elektronischen Quiz (Moodle) bereits in den Bachelorveranstaltungen erfolgreich eingesetzt. Auf Basis dieser Konzepte sind auch neue Prüfungsformen denkbar, die es hier mit Bezug auf die Mikrosystemtechnik und den steuerbaren Simulationen im Rahmen des Vorhabens zu erarbeiten gilt.

Die Simulationen der ausgewählten Mikrosysteme soll darüber hinaus mit den digitalen Inhalten zur Mikrotechnologie (VR-Reinraumlabor, Prozessvideos) direkt verknüpft werden. Zusätzlich sollen einfache Prozesssteckbriefe und grundlegende Animationen (z.B. bereits mit Powerpoint möglich) mit erstellt werden, um die Verknüpfung von Design, Technologie und finale Systemcharakteristik verbessert darstellen zu können. Durch diese Verknüpfungen und die erwartete Verbesserung der Wissensvermittlung sollen auch Quereinsteiger, die ggf. nicht die entsprechenden Bachelormodule vorweisen können, besonders unterstützt werden. Insbesondere im Masterbereich und speziell in internationalen Studiengängen ist die Divergenz im Eingangswissen ausgeprägt. Durch effiziente Wissensvermittlung sollten sich Lücken aber schnell schließen lassen. Hierbei werden auch Seminargruppen im Kenntnisstand insgesamt ausgeglichener. Eine insgesamt verbesserte Didaktik bei der Vermittlung komplexer Inhalte ist letztendlich für alle von Vorteil.

## 2.4. Umsetzung und Verstetigung der Lehrinnovation

Aufgrund der bereits weitgehend vorhandenen Grundausstattung und Erfahrung im Umgang mit der FEM-Software Comsol Multiphysics besteht die Herausforderung zur Umsetzung der geplanten Lehr-Innovation insbesondere bzgl. der Finanzierung des zur Umsetzung erforderlichen Personals. Hierbei sollen die Arbeiten durch einen wissenschaftlichen Mitarbeiter bzw. wissenschaftliche Mitarbeiterin und studentische Assistenten durchgeführt werden. Aufgrund der Komplexität, dem erforderlichen Grundwissen und der Erfahrung im Bereich der FEM-Simulation soll das Personal den Bereichen Mechatronik, Maschinenbau, Elektrotechnik oder Physik entstammen. Darüber hinaus wird das Vorhaben allgemein auch zusätzlich durch die weiteren wissenschaftlichen Mitarbeiter des Fachgebiets Mikrosystemtechnik unterstützt, wobei Simulationen und Funktionsgruppen aus laufenden Forschungsarbeiten unmittelbar mit einfließen sollen, was bislang in der Lehre stets sehr positiv aufgenommen wurde.

Auf Grund der Bereitstellung der Apps über einen Server bzw. über Links können grundsätzlich alle Interessenten von den Simulationen profitieren, da dieses nicht nur in einer lokal installierten Comsol Umgebung, sondern „remote“ ausgeführt werden können. Damit sind der Zugang und die Steuerung der Simulationen im Grunde mit jedem Smartphone möglich, was die Zugänglichkeit sichert. Die entsprechenden Links der steuerbaren Simulationen als auch die Anleitungen und Aufgaben werden über die digitale Lernplattform Moodle bereitgestellt und organisiert.

Neben den steuerbaren Simulationen können auch Videos mit den gewählten Parameter-Variationen unmittelbar aus Comsol Multiphysics oder über die steuerbare Simulation erzeugt werden. Diese Videos sollen wiederum über Moodle unmittelbar in die Lehre als mediales Material eingeführt werden und können auch auf der Website eingebunden und auch für die Öffentlichkeitsarbeit (z.B. Studieninfotag) mit zur Visualisierung und zur Begeisterung des studentischen Nachwuchses genutzt werden.

## 3. Bewertung des Konzepts aus Sicht der Lern-/Lehrforschung

Der Einsatz von digitalen Szenarien in der Hochschullehre wird als innovativ und als eine Schlüsselkomponente beschrieben.<sup>4,5</sup> Das Erleben von Inhalten in einer simulierten oder digitalen Realität soll dabei sogar einem realen Erleben vergleichsweise nahekommen. Vergleichbare Effekte können z.B. in anderen Wissenschaftsgebieten genutzt werden, um z.B. Phobien zu minimieren oder bestimmte Situationen zu trainieren.<sup>6</sup> Auch im Bereich der sog. „Massive Open Online Courses“ mit dem Vorreiter Harvard University können steuerbare Simulationen problemlos eingesetzt werden.

---

4 Bower, M., et al. (2014) Augmented Reality in education – cases, places and potentials. In Educational Media International, Vol. 51, No. 1, 1-15

5 HFD (2016a) Digitale Lernszenarien im Hochschulbereich. Arbeitspapier Nr. 15. Berlin: Hochschulforum Digitalisierung.

6 <https://www.zeit.de/2018/27/virtual-reality-angststoerung-psychotherapie-technik>

## 4. Einbindung der Lehrinnovation in das Studium an der TU Ilmenau

Der Antragsteller ist Leiter des Fachgebiets Mikrosystemtechnik (Fakultät Maschinenbau. Die im Rahmen dieses Vorhabens erzeugten steuerbaren Simulationen mit didaktischer Abstimmung werden daher natürlich konsequent und unmittelbar in die Lehre des Fachgebiets „Mikrosystemtechnik“ der TU Ilmenau eingebunden (s.u.). Die Inhalte werden dabei nicht nur in verschiedenen Komplexitätsgraden, sondern sowohl in Deutsch als auch in Englisch erzeugt, um den jeweiligen Zielgruppen gerecht zu werden. Die Inhalte sollen aber allen interessierten Dozenten als „open access“ zur Verfügung stehen. Ein geeignetes „sharing“-Konzept ist im Rahmen des Vorhabens zu erarbeiten. Darüber hinaus ist auch zu erwarten, dass die bestehenden bzw. derzeit überarbeiteten Austausch- und Doppelmasterprogramme z.B. mit der Universität Pontifica Universidad Católica del Perú, Lima sowie der École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques de Basancon (SUPMICROTECH-ENSMM, Frankreich) von den Lehrinhalten auch mit profitieren werden. Die Lehre des Fachgebiets Mikrosystemtechnik setzt sich derzeit wie folgt zusammen:

Lehrangebot FG Mikrosystemtechnik	Anmerkung
Einführung in die Mikrosystemtechnik	Bachelor (Pflicht): Maschinenbau, Mechatronik Bachelor (Wahl): Technische Physik, Biomedizintechnik
Microsystems Technology	Master (Pflicht, Englisch): Micro- and Nanotechnology
Microsensors and Microactuators	Master (Wahl): z.B. Micro- and Nanotechnology, Mechatronik, Maschinenbau
Mikrosystemtechnik	Master (Pflicht): z.B. Mechatronik, oder in anderen Studiengängen als Wahlfach
Projektseminar/Project with seminar	Master: Micro- and Nanotechnology, Mechatronik, Maschinenbau

Als quasi ein „Nebenprodukt“ der Erstellung von steuerbaren FEM-Simulationen entstehen simultan auch weitere Lehrinhalte wie Videos und Bildmaterial, welche zur verbesserten Illustration von Vorlesungsfolien und Skripten verwendet werden sollen. Hierdurch wird die Lehrqualität auch insgesamt betrachtet weiter verbessert. Es ist des Weiteren auch allgemein zu erwarten, dass die digitalen Lehrinhalte in einem breiteren Kontext auch in andere Fachgebiete einfließen, wobei das fakultätsübergreifende Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien (ZMN) von entsprechender Bedeutung ist.

## 5. Evaluation der Lehrinnovation

Die Evaluation der geplanten Lehrinnovation soll sowohl formativ als auch summativ erfolgen. Durch die direkte und kontinuierliche Einbindung der Apps in den verschiedenen Lerngruppen als auch durch die studentische Beteiligung bei der Erstellung der Apps ist eine unmittelbare interne studentische Evaluation und Qualitätskontrolle als formative Komponente direkt gegeben. Lernerfolgskontrollen, App-Nutzungsstatistiken und eigene Befragungen dienen ergänzend als summative Komponente. Hierbei kann auf entsprechende Erkenntnisse und Erfahrungen aus der sog. „Basic Engineering School“<sup>7</sup> an der TU Ilmenau zurückgegriffen werden.

---

7 BMBF gefördertes Projekt an der TU Ilmenau für neue Lehr- und Lernformen in der Ingenieurausbildung

## 6. Verstetigung, Übertragbarkeit und Reichweite der Lehrinnovation

Die im Rahmen der Lehrinnovation erstellten FEM-Simulationen und medialen Inhalte sollen sukzessiv aufgebaut und zugänglich gemacht werden. Die ideale Form der Zugänglichkeit soll im Rahmen des Vorhabens evaluiert werden, wobei mehrere Ebenen, wie intern, online mit Einschreibeschlüssel (z.B. über E-Learning-Plattform Moodle) sowie frei über universitäre Server, diskutiert werden müssen. Im Erfolgsfalle ist zu erwarten, dass weitere Studiengänge (intern/extern) und Fachgebiete das Material nutzen und auch erweitern.

Als ein Beispiel zur Verstetigung sei auch noch einmal auf das Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien verwiesen, welches durch eine Professionalisierung des Schulungs-, Nutzungs- und Managementkonzeptes auch unter Einsatz digitaler Formate geprägt ist. Eine Erweiterung digitaler Lehrangebote und -inhalte, wie die geplante Lehrinnovation, kann auch aktiv für Nutzerschulungen und im Umkreis von Trainings genutzt werden. Das Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien hat daher generell ein hohes Interesse an digitalen Lehrformen. Das kooperative Nutzungskonzept sowie die Kooperation mit anderen Einheiten (z.B. Zentralinstitut für Bildung) sind dabei auch entsprechend wertvoll.

## 7. Austausch mit anderen „Fellows“ des Programms

Im unmittelbaren Austausch den Teilnehmern des Förderprogramms wird ein intensiver Erfahrungsaustausch zum optimalen Einsatz und zur optimalen Gestaltung digitaler Lehrinhalte erwartet. Auf Basis eines Austauschs dürfen daher auch neue Impulse und Kooperationen erwartet werden, die primär aus der Interdisziplinarität, der Vernetzung sowie den unterschiedlichen Projektansätzen entstehen. Des Weiteren kann ein interdisziplinärer Austausch auch eine innovative Keimzelle für neue Forschungsvorhaben darstellen.