

TUM.Additive

Memorandum zur Additiven Fertigung
an der Technischen Universität München
im Rahmen der TUM AGENDA 2030



Inhalt

Vorwort	2
1. Zusammenfassung – Executive Summary	3
2. Motivation, Chancen	4
3. Perspektiven für den Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Bayern	5
4. Agenda »TUM.Additive«	7
5. Kompetenzfelder der Technischen Universität München im Bereich Additive Fertigung	10
5.1 Materialien · Grenzflächen · Thermodynamik	10
5.2 Design · Gestaltung · Funktionsgeometrien	12
5.3 Fertigungsverfahren	13
5.4 Sensorik	14
5.5 Numerische Mechanik und Simulation zur Prozessoptimierung	15
5.6 Cyber-Physische Systeme · Maschinenintelligenz · IT-Sicherheit	16
5.7 Verifikation · Qualitätssicherung (Werkstoffprüfung)	17
5.8 Geschäftsmodelle für Additive Fertigung	18
6. Potenzialbereiche und Applikationsfelder	19
6.1 Bau und Konstruktion	19
6.2 Luft- und Raumfahrt	20
6.3 Automotive	22
6.4 Medizintechnik & Gesundheitstechnologien	23
6.5 Biofabrication & Regenerative Medizin	24
6.6 Chemische Stoffumwandlung durch Katalyse	26
Abkürzungsverzeichnis der Fakultäten und Zentren	27
Impressum	28

Vorwort

Im Zeitalter der „Industry 4.0“ eröffnet der schichtweise Aufbau komplexer Werkteile und Formkörper völlig neuartige Wege zu geometrisch komplexen Systemen mit Funktionseigenschaften, die über klassische Fertigungsmethoden nicht erreichbar waren. Das bisher unzureichend erschlossene Methodenspektrum birgt ein Forschungspotenzial, das praktisch alle technischen, naturwissenschaftlichen und medizinischen Areale in fach- und fakultätsübergreifenden Ansätzen herausfordert. Gefordert ist hier der gesamte Forschungsapparat einer Technischen Universität, die über ein breites, differenziertes Portfolio von Disziplinen verfügt und in der Lage ist, die unterschiedlichen Forschungskulturen interdisziplinär miteinander zu verbinden.

Eine SWOT-Analyse hat gezeigt, dass die Technische Universität München (TUM) bei koordinierter Bündelung der schon heute vorhandenen Fachkompetenzen eine Führungsposition in der „Additiven Fertigung“ erreichen kann, wenn aktuelle Entwicklungen in den einschlägigen Industrien in eine kohärente Forschungsprogrammatik integriert werden. Auf diese Weise kann die TUM Schlüsseltechnologien der Zukunft maßgeblich befruchten und die Wirtschaftlichkeit industrieller Produktionsprozesse disruptiv verbessern. Über Skalenbereiche mehrerer Zehnerpotenzen durchstimmbare, weisen additive Fertigungsverfahren methodische Gemeinsamkeiten aus bisher zusammenhanglos nebeneinander stehenden Teildisziplinen auf. Dabei kommt den cyber-physikalischen Systemen eine zentrale Integrationskraft zu. Präzision und Reproduzierbarkeit gehören zu den besonderen Stärken der additiven Fertigungstechnologien.

Im Kontext ihrer Zukunftsstrategie **TUM.THE ENTREPRENEURIAL UNIVERSITY. Innovation by Talents, Excellence, and Responsibility** vom 6. Dezember 2018 ist das Kompetenzfeld „Industry 4.0 · Additive Manufacturing“ für die *Industry on Campus*-Allianz „**Additive Manufacturing Campus Bavaria**“ definiert*.

Das vorliegende Memorandum zeigt als Teil der TUM AGENDA 2030 exemplarisch und gleichzeitig schwerpunktmäßig jenes Profilpotenzial auf, zu dessen Entfaltung die TUM im 150. Jahr ihres Bestehens angetreten ist.

München · Garching · Freising-Weihenstephan,
1. März 2019



Wolfgang A. Herrmann
Präsident

* Vgl. TUM White Paper „Additive Manufacturing/Industry of the Future – Made in Bavaria“ (Dezember 2018)

1. Zusammenfassung – Executive Summary

Die Additive Fertigung wird die produzierenden Industriesektoren grundlegend revolutionieren:

- Digitale Transformation der industriellen Produktion funktionsoptimierter Bauteile mit komplexen Geometrien auf Basis von 3D-Konstruktionen in den Kernsektoren Automotive · Luft- & Raumfahrt · Bau & Konstruktion · Medizintechnik & Gesundheitstechnologien · Biofabrikation & Regenerative Medizin · Industrielle Katalyse;
- Nachhaltige Produktion durch Energie- und Ressourceneinsparung mit wichtigen Beiträgen zur Erreichung der Klimaziele;
- Sicherung des Wirtschaftsstandortes Bayern und Schaffung von neuen gewerblichen Arbeitsplätzen auch außerhalb der Metropolregionen.

Der Freistaat Bayern verfügt über sämtliche Ausgangsbedingungen, um die gesamte Prozess- und Wertschöpfungskette der Additiven Fertigung in einzigartiger Stärke abzubilden und sich zu einem der international führenden Wirtschaftsregionen im Bereich der additiven Fertigungstechnologien zu entwickeln, wenn fach- und branchenübergreifend gedacht und gehandelt wird.

Mit der Handlungsagenda TUM.Additive nutzt die Technische Universität München (TUM) die historische Chance, bestehende Kompetenzen in Forschung und Lehre sowie Infrastrukturen in folgenden Kernbereichen der Additiven Fertigung zusammenzuführen:

- Materialien · Grenzflächen · Thermodynamik
- Design · Gestaltung · Funktionsgeometrien
- Fertigungsverfahren
- Sensorik
- Numerische Mechanik und Simulation zur Prozessoptimierung

- Cyber-Physische Systeme · Maschinenintelligenz · IT-Sicherheit
- Verifikation · Qualitätssicherung (Werkstoffprüfung)
- Geschäftsmodelle für Additive Fertigung.

In Partnerschaft mit führenden Wirtschaftsunternehmen sollen im Industry-on-Campus-Forschungsverbund Bavarian Additive Manufacturing Cluster gesamtheitliche Lösungsansätze in den Kernbereichen Materialien und Werkstoffe, End-to-end Additive Fertigungsprozesse und Digitalisierung entwickelt werden, um die industrielle Nutzung der Additiven Fertigung und die zukunftsfähige Transformation produzierender Industriesektoren zu beschleunigen. Zur besonderen Stärkung der interdisziplinären Grundlagenforschung in Bereichen der Material-, Prozess- und Nachbearbeitungsentwicklung und deren Translation in die industrielle Anwendung wird das Additive Manufacturing Research Institute als wissenschaftlicher Kernbereich des Clusters eingerichtet.

Verstärkt wird die Handlungsagenda TUM.Additive durch internationale Kooperationen, insbesondere mit der German-French Academy for the Industry of the Future, dem Imperial College London, und dem Skolkovo Institute of Science and Technology (Moskau).

Durch innovative Studien- und Fortbildungsangebote wird die TUM eine neue Generation an Spezialisten für das Zukunftsfeld der Additiven Fertigung ausbilden und eine nachhaltige Breitenimplementierung von Additiven Fertigungstechnologien im produzierenden Gewerbe erreichen, das überwiegend der mittelständischen Privatwirtschaft angehört.

2. Motivation, Chancen

Unter den „emerging technologies“ hat die Additive Fertigung das höchste Potenzial, die produzierenden Industriesektoren in den kommenden Jahren grundlegend zu revolutionieren:

- Automotive
- Luft- & Raumfahrt
- Bau & Konstruktion
- Medizintechnik & Gesundheitstechnologien
- Biofabrication & Regenerative Medizin
- Industrielle Katalyse

Durch Einsatz neuer Rohstoffe, innovativer Materialien und intelligenter Kombinationen lassen sich durch neue Verfahrenstechnologien auf Basis digitaler 3D-Konstruktionen verschiedenste Bauteile maximal komplexer Geometrien last- und funktionsorientiert gestalten und schichtweise („additiv“) aufbauen. Im Gegensatz zu subtraktiven Fertigungsprozessen (z.B. Fräsen, Drehen) und ohne formgebende Werkzeuge (z.B. Druck-, Spritzguss) lassen sich Metalle, Keramiken und Kunststoffe bei maximaler Gestaltungsfreiheit zu komplexen Bauteilen mit einer hohen Funktionsintegration urformen. Die Lösungsräume im Fertigungsumfeld werden dadurch beträchtlich erweitert.

Additive Fertigungsprozesse (Pulverbettfusion, Vat Photopolymerisation, Binder Jetting, Materialextrusion, Directed Energy Deposition, Material Jetting, Sheet Lamination) ermöglichen eine enorme Vielfalt im mehrschichtigen 3D-Druckkonzept unter Variation von Materialzustand (Pulver, Flüssigkeit, Glühfaden), Wärme- oder Lichtquellen (Laser, thermische Strahlung, Elektronenstrahl, Plasmabogen), Anzahl der Druckachsen, Vorschubsysteme und Baukammereigenschaften. Dabei eignen sich pulver- und strahlbasierte Verfahren insbesondere für industrielle Anwendungen, da diese die Herstellung von Bauteilen aus technischen Werkstoffen mit vergleichsweise komplexen mechanischen Eigenschaften ermöglichen.

Gänzlich aufgehoben werden technische Limitationen wie z.B. Hinterschnitte, Hohlräume und große Überhänge, denen Designer bei klassischen Fertigungsverfahren unterliegen.

Die Additive Fertigung (AF) bietet enorme Vorteile im Vergleich zu klassischen Produktionstechnologien:

- AF individualisiert Produkte und dezentralisiert die Produktion;
- AF verkürzt die heutige Entwicklungs- und Produktionskette drastisch vom digitalen Modell zum fertigen Produkt;
- AF erlaubt enorme Designfreiheit bei signifikant erhöhter Funktionsdichte („form follows function“) der generierten Artefakte, die leichter und stabiler sind als die Produkte herkömmlicher Fertigungsmethoden;
- AF ist zur Erreichung der Wirtschaftlichkeit nicht auf große Stückzahlen angewiesen, sondern eignet sich auch für die „maßgeschneiderte“ Einfeldfertigung;
- AF erschließt bionische Strukturen für den Leichtbau und ermöglicht den Aufbau von sonst nicht realisierbaren Werkstoffkombinationen wie zum Beispiel gradierte Werkstoffe zur Steigerung der Werkstoffeffizienz („design of materials“).

In Kombination mit der digitalen Konstruktion und Vernetzung („Cyber-Physische Systeme“) ist eine Revolution mit enormen Wertschöpfungsvorteilen in der Fertigungstechnik und Logistik mit Prägewirkung auf das Zeitalter der Industrie 4.0 zu erwarten.

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor der Additiven Fertigung in der industriellen Wertschöpfung ist ein gesamtheitlicher, integrierter und vernetzter Ansatz unter Einbindung aller wesentlichen Geschäftsbereiche der Liefer- und Wertschöpfungskette (Design, Konstruktion, Entwicklung, Einkauf, Lagerhaltung, Produktion,

Fertigungsauslegung, Qualitätskontrolle, Logistik). Erst diese Gesamtbetrachtung ermöglicht das enorme Potenzial Additiver Fertigung effizient zu nutzen und aus den Produktionsbereichen mit geringen Stückzahlen („rapid prototyping“) – trotz komplexer Geometrien und eines hohen Individualisierungsgrads – mittelfristig auf das Potenzial der Serienproduktion zu heben („mass customization“). Dabei müssen bei der Implementierung fest definierter Fertigungsprozesse, beim Umgang mit innovativen

Materialien, bei der Standardisierung der Fertigungsprozesse oder bei der Berücksichtigung geltender Normen die angestrebten kurzen Produktions- und Lieferzeiten mit einer gleichbleibend hohen Qualität der Produkte in Einklang gebracht werden. Dies setzt die Ausbildung von neuem Fachpersonal voraus, um die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen im Zuge der Transformation zur Industrie 4.0 sicherzustellen.

3. Perspektiven für den Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Bayern

Die nachhaltige industrielle Nutzung von AF-Technologien erfordert die Erforschung, Entwicklung und Optimierung der elementaren Prozessschritte und der Prozesskette im Gesamten. Weltweit haben führende Industrienationen daher AF-Leuchtturminitiativen in Stellung gebracht. So hat das Vereinigte Königreich erheblich in Advanced Manufacturing-Forschungseinrichtungen in Nottingham (80 Mio. GBP¹) und Sheffield (47 Mio. GBP²) investiert, deren Forschungsaktivitäten durch die Industrie mit weiteren 22 Mio. GBP unterstützt werden.³ Zur Koordination nationaler AF-Aktivitäten von Universitäten und Industrie wurde im Zuge der „America Makes“-Initiative der USA das „National Additive Manufacturing Innovation Institute“ gegründet (50 Mio USD). Verstärkt werden die Aktivitäten in den USA durch Verbünde zwischen nationalen Laboratorien (Lawrence Livermore, Los Alamos) und führenden Universitäten

im Rahmen strategischer Forschungsförderung (z.B. PSAAP). Teil des „Made in China 2025“-Plans ist ein nationales „Additive Manufacturing Technology Research Program“, das im Jahr 2016 mit einem Volumen von mehr als 50 Mio. Euro für 5 Jahre aufgesetzt wurde.⁴

Deutschland kann bislang keine strukturierten AF-Aktivitäten vorweisen, welche die Forschung lückenlos über die komplette Wertschöpfungskette vorantreiben und neu gewonnene Erkenntnisse in die industrielle Wertschöpfungskette der Additiven Fertigung einbringen.

Der Freistaat Bayern kann sich zur internationalen Speerspitze im industriellen Zukunftsfeld der Additiven Fertigung entwickeln; die Bedingungen hierfür sind einmalig:

1 <https://www.nottingham.ac.uk/news/pressreleases/2018/december/24m-nottingham-research-facility-opens-to-transform-uk-manufacturing-in-the-digital-age.aspx>.

2 <https://3dprintingindustry.com/news/47-million-facilities-established-in-the-university-of-sheffield-for-advanced-industrial-technologies-141507/>.

3 Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020: Report from the EC Workshop on AM, 18 June 2014.

4 https://www.merics.org/sites/default/files/2017-09/MPOC_No.2_MadeinChina2025.pdf.

- Mit der Technischen Universität München (TUM) verfügt Bayern über eine international hochgeachtete Spitzenuniversität, die über führende Kompetenzen der Additiven Fertigung verfügt und in ihrer 150-jährigen Geschichte durch starke Allianzbildung mit Wirtschaft, Politik und Gesellschaft bereits ihren Beitrag zur Transformation des Freistaats vom Agrarland zum Hochtechnologiestandort mehrfach unter Beweis gestellt hat;
 - Bayern beheimatet Weltklasseunternehmen in den für die Additive Fertigung relevanten Anwendungsbranchen: Automobile (u.a. BMW, Audi, Brose) · Luft- & Raumfahrt (u.a. MTU, Airbus, GE Aviation, Aircraft Philipp) · Energie (u.a. Siemens, MAN, Turbo SE);
 - Marktführer mit komplementären Kompetenzen entlang der additiven Fertigungskette sitzen in Bayern: GE Additive – führende Expertise in Material- und additiven Fertigungstechnologien; Linde AG – Marktführer für Industrie-, Prozess- und Spezialgase und den zugehörigen Anwendungstechnologien als Schlüsselkomponenten in jedem Schritt der Fertigungskette (von Metallpulverherstellung bis hin zur Oberflächenveredlung); Oerlikon AM – Marktführer bei modernen Werkstoffen und Oberflächentechnologien, umfassende Engineering-Expertise bei Schlüsselkomponenten der Additiven Fertigung;
 - Weltweit führende Anlagenhersteller für die Additive Fertigung haben ihren Firmensitz im Freistaat: Concept Laser GmbH (Laser-Strahlschmelzanlagen) · DMG Mori (Laser-Strahlschmelz- und Laser-Pulver-Auftragsmaschinen) · EOS Gruppe (Laser-Strahlschmelz- und Laser-Sinter-Anlagen) · ExOne (Binder-Jetting-Anlagen) · Kumovis (Extrusionsanlagen für Medizintechnik) · ProBeam (Elektronen-Strahlschmelzanlagen) · Voxeljet (Binder-Jetting-Anlagen). Bayerische Hersteller von Laser-Strahlschmelz-Anlagen sind mit einem Weltmarktanteil von ca. 50% die Gestalter der Branchenentwicklung;
 - Marktführende Softwaresystem-Unternehmen wie Siemens und SAP widmen sich intensiv der Daten- und Simulationskette und der Entwicklung integrativer Plattformen in der Additiven Fertigung und haben ihren Firmensitz in Bayern oder enge Verbindungen zu bayerischen Universitäten und Forschungseinrichtungen;
 - Führende Zertifizierungsdienstleister wie TÜV Süd und IABG bieten ein umfangreiches Service-Portfolio im Bereich der Additiven Fertigung und prüfen sowie zertifizieren Prozesse rund um den 3D-Druck;
 - Mit der Munich Technology Conference on Additive Manufacturing (MTC2) hat sich die Landeshauptstadt München bereits der internationalen Wissenschafts- und Wirtschaftswelt mit dem Thema AF vorgestellt und ihre Kompetenz nachhaltig demonstriert.⁵
- Im nationalen Vergleich (z.B. Aachen, Dresden) kann der Freistaat Bayern an seinem Kompetenzknotenpunkt München die komplette Prozess- und Wertschöpfungskette in einzigartiger Stärke abbilden und auf internationalem Spitzenniveau zukunftsfähig fortentwickeln. Die Ausgangsbedingungen eröffnen einmalige Entwicklungsperspektiven für den Freistaat:
- Die ganzheitliche Betrachtung der Wertschöpfungskette ermöglicht eine schnelle Industrialisierung und Industriedurchdringung der Additiven Fertigung, steigert die Innovationskraft und internationale Wettbewerbsfähigkeit bayerischer Unternehmen (speziell auch in der mittelständisch geprägten Zulieferindustrie) und sichert die Zukunftsfähigkeit des Wissenschafts- und Wirtschaftsstandorts Bayern;

⁵ <https://www.munichtechconference.com>.

- Der Transfer von klassischen, lokal konzentrierten Produktionskapazitäten hin zu einer neuen, dezentralen und digitalisierten Fertigung schafft neue Arbeitsplätze – auch außerhalb der Metropolregionen;
- Die Erschließung völlig neuer Geschäftsmodelle rund um die Wertschöpfungskette der Additiven Fertigung birgt enormes Potenzial für die bereits heute hochaktive Gründerszene in Bayern;
- Aus der Additiven Fertigung erwachsende Sekundäreffekte (z. B. Energie- und Ressourceneffizienz) unterstützen durch Gewichtersparnis und erhöhte Produktfunktionalität Deutschlands Ziele hinsichtlich Nachhaltigkeit und Gesellschaftsfähigkeit neuer Technologien;
- Mittelfristig werden die in hohem Maße digitalisierbaren Prozesse der Additiven

Fertigung auch die Rückverlagerung der Produktion nach Deutschland erleichtern, da in den neuen Wertschöpfungsketten weniger die Lohnkostenunterschiede, als vielmehr eine hohe Ausbildungsqualität, Spitzenforschung, wirtschaftliche Stabilität, exzellente Infrastruktur und die Nähe zum Kunden als primäre Standortkriterien entscheidendes Gewicht erlangen.

Durch den Transfer von klassischen Fertigungskapazitäten hin zu einer neuen, lokalen und digitalisierten Fertigung werden landesweit neue Arbeitsplätze generiert und die Innovationskraft, Agilität und somit Wettbewerbsfähigkeit bayerischer Unternehmen langfristig sichergestellt.

4. Agenda »TUM.Additive«

Basierend auf erfolgreichen Forschungsverbundprojekten⁶ zum Themenkomplex Additive Fertigung/Industrie 4.0 mündet die vom Maschinenwesen ausgehende Entwicklungsstrategie TUM.Additive unter Einbindung der Kompetenzen aus insgesamt 12 Fakultäten in einer umfassenden Handlungsagenda. Diese wird unterstützt durch einen derzeit in Garching entstehenden Industry-on-Campus Forschungsverbund Bavarian Additive Manufacturing Cluster (Gründungspartner: TUM · Oerlikon · GE Additive · Linde) und dem Schulterchluss mit der Fraunhofer Additive Manufacturing Alliance durch das Institut für Gießerei-,

Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV, Augsburg).⁷

Als integraler Teil des Clusters wird das Additive Manufacturing Research Institute mit Fokus auf die interdisziplinäre Forschung gegründet; es bündelt neue Grundlagenforschung mit relevanten Fakultäten der TUM entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Additiven Fertigung. In dieser Konstellation erstreckt sich die Technologieentwicklung über alle technologischen Reifegrade hinweg und entlang einer lückenlosen Entwicklungs- und Prozesskette: Materialien und Werkstoffe ·

⁶ Verbundprojekte: SFB 768: Zyklusmanagement von Innovationsprozessen – Verzahnte Entwicklung von Leistungsbündeln auf Basis technischer Produkte (Sprecherin Prof. Vogel-Heuser); TRR 40: Technologische Grundlagen für den Entwurf thermisch und mechanisch hochbelasteter Komponenten zukünftiger Raumtransportsysteme (Sprecher Prof. Adams); Industrieprojekte (Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Profs. Zäh/Reinhart); Bayerische Forschungsstiftung: ShapeAM (Befähigung additiver Fertigungstechnologien zur Herstellung von Funktionsbauteilen mit hohen Qualitätsanforderungen für den industriellen Einsatz), FORobotics (Ad-hoc-kooperierende Roboterteams).

⁷ Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik: Fokus auf die automatisierte Fertigung in den Bereichen Leichtbaugusstechnologien und Faserverbundwerkstoffe; Leitung durch die TUM-Professoren Reinhart, Drechsler und Volk; <https://www.tum.de/die-tum/aktuelles/pressemitteilungen/detail/article/33441/>.

Fertigungsverfahren, Anlagenbau und Prozessführung · Sensorik und Analyse · Cyber-Physische Systeme und Maschinenintelligenz · Verifikation/Qualifikation der Produkte · Entwicklung neuer Geschäftsmodelle für die Additive Fertigung.

Diese enge Verschränkung von Grundlagenforschung und industrieller Anwendungsforschung ist ein nationales Alleinstellungsmerkmal des Bavarian Additive Manufacturing Cluster, der in dieser Konstellation entscheidende Beiträge zur beschleunigten Industrialisierung von additiven Fertigungstechnologien leisten wird.

Strategische Ziele

Die Agenda TUM.Additive verfolgt die Ziele,

- durch neue integrative Forschungs- und Entwicklungsansätze die Transformation des gesamten Engineering-Prozesses in Schlüsselsektoren (Automotive · Luft- & Raumfahrt · Bau & Konstruktion · Medizintechnik & Gesundheitstechnologien · Biofabrikation & Regenerative Medizin) hin zu Design- und Fertigungsweisen zu beschleunigen;
- durch Allianzbildung mit führenden Wirtschaftsunternehmen⁸ und internationalen akademischen Partnern⁹ sowie durch Ausgründung innovativer High-Tech-Startups¹⁰ einen signifikanten Beitrag zur Industrialisierung der Additiven Fertigung zu leisten;
- durch innovative Ausbildungs- und Fortbildungskonzepte eine neue Generation an Spezialisten für das Zukunftsfeld der Additiven Fertigung hervorzubringen.

Transdisziplinärer, gesamtheitlicher Forschungsansatz

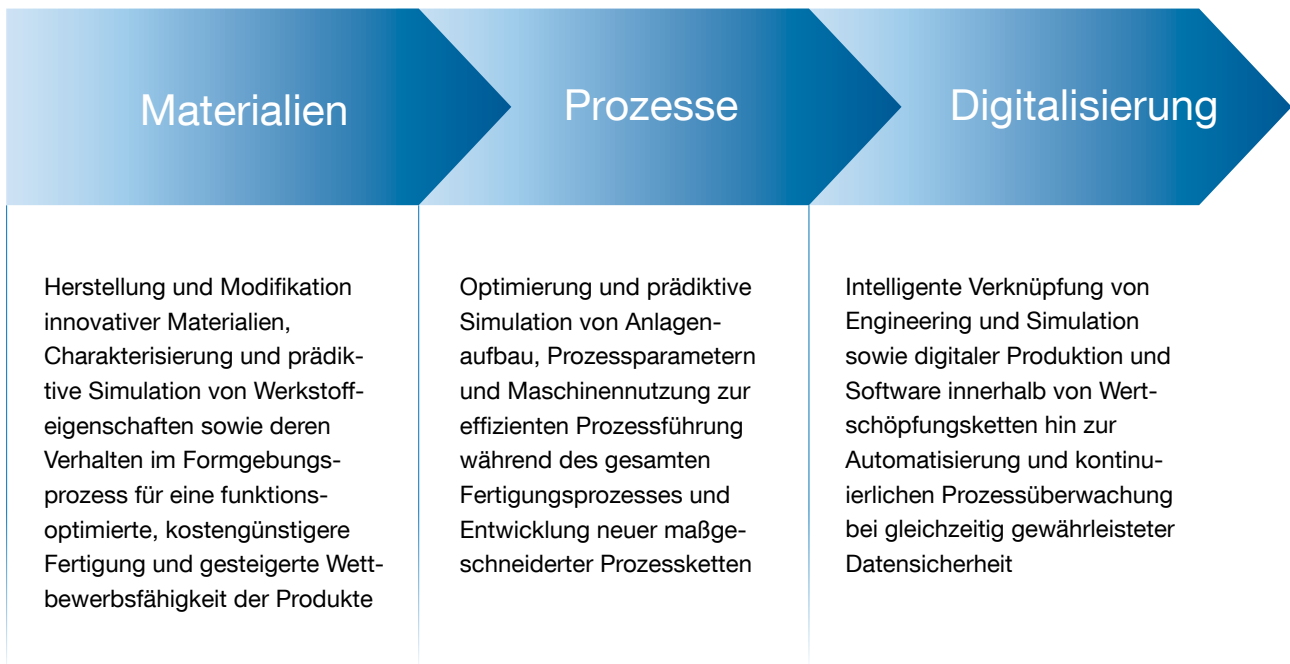
TUM.Additive fokussiert in einem domänen- (Werkstofftechnik, Prozesstechnik, Maschinenbau und Simulationstechnik) und material- übergreifenden Forschungsansatz (Metalle, Kunststoffe, Keramiken, Beton, Verbundmaterialien, Füllstoffe, Biomaterialien) auf drei Schwerpunkte:

1. AM-Materialien und AM-Werkstoffe (advanced materials): Herstellung und funktionsorientierte Modifikation innovativer Materialien wie z.B. Hochleistungsmetalle (z.B. nicht/schwer schweißbare Nickelbasislegierungen, nicht/schwer schweißbare Stähle Kupfer), Hochleistungskunststoffe (z.B. anisotrope Verstärkung, Flammenschutz, Kostenreduktion) und Keramikwerkstoffe; Charakterisierung, prädiktive Simulation und Validierung mikro-, meso- und makroskopischer Werkstoffeigenschaften sowie deren Verhalten im Formgebungsprozess für eine funktionsoptimierte, kostengünstigere Fertigung und gesteigerte Wettbewerbsfähigkeit der Produkte;
2. End-to-end Additive Fertigungsprozesse: Optimierung und prädiktive Simulation von Anlagenaufbau und Maschinengestaltung (z.B. Automatisierbarkeit der Pulverversorgung, -verteilung und Entpulverung), Prozessparametern und Maschinennutzung zur effizienten Prozessführung (z.B. Kalibrierbarkeit, minimaler Werkstoffeinsatz) während des gesamten Fertigungsprozesses und Entwicklung neuer funktionsoptimierter Prozessketten;

⁸ Airbus/Ariane Group, GE Additive, Linde AG, Oerlikon, SAP, Siemens, TÜV-Süd, Clariant.

⁹ Kooperation mit dem Skolkovo Institute of Science and Technology (Moskau) und dem Skoltech Center for Design, Manufacturing and Materials; <https://www.skoltech.ru/en/>.

¹⁰ Die TUM nimmt unter deutschen Universitäten die Spitzenstellung mit sprunghafter Erfolgswentwicklung ein: 29 → 76 Gründungen (2011 bzw. 2017) • > 800 von TUM-Mitgliedern seit 1998 gegründete Unternehmen (derzeit > 15.000 Arbeitsplätze) • Bisher 8 TUM-Spinoffs börsennotiert, z. B. Celonis AG (gegr. 2011) > 1 Mrd. US-\$ Unternehmenswert („Unicorn“). Gründungsbeispiele aus dem Bereich Additive Fertigung: Voxeljet (industrielle 3D-Drucksysteme für Kunststoff und Sand), Vectoflow GmbH (Strömungssonden für 3D-Druck), Kumovis (3D-Druck für Medizintechnik; Schädelplatten- oder Wirbelsäulenimplantate).



Integrative Forschung und Lehre entlang der gesamten Prozess- und Wertschöpfungskette

3. Digitalisierung: Intelligente Verknüpfung von Engineering und Simulation, digitaler Produktion und Software innerhalb von Wertschöpfungsketten zur Automatisierung und kontinuierlichen Prozessüberwachung bei gleichzeitig gewährleisteter Datensicherheit (Virtualisierung der gesamten Prozesskette).

Forschungspartnerschaften

Die TUM nutzt die etablierten und erfolgreichen Industriepartnerschaften mit Airbus/ Ariane Group, GE Additive, Linde AG, Oerlikon, SAP, Clariant, Siemens und TÜV Süd, um die Kompetenzen entlang der gesamten additiven Fertigungskette strategisch zu bündeln und unter Synergiebildung zukunftsorientiert auszurichten:

- Airbus/Ariane Group: Marktführer im Bereich Luft- und Raumfahrt sowie Triebwerkstechnologien;
- GE Additive: führende Expertise in Material- und additiven Fertigungstechnologien (z.B. Acram EBM, Concept Laser GmbH);

- Linde AG: Marktführer für Industrie-, Prozess- und Spezialgase als Schlüsselkomponente in jedem Schritt der Fertigungskette (von Metallpulverherstellung bis hin zur Oberflächenveredlung);
- Oerlikon: Marktführer bei modernen Werkstoffen und Oberflächentechnologien, umfassende Engineering-Expertise bei Schlüsselkomponenten der Additiven Fertigung;
- SAP: Marktführer in Unternehmenssoftware für digitale Fertigung und Vernetzung von Fertigungsunternehmen mit Anbietern von 3D-Druck, Dienstleistern sowie Materiallieferanten und OEMs;
- Siemens: Marktführer für integrierte Software- und Automatisierungslösungen für die Additive Fertigung im industriellen Einsatz;
- TÜV-Süd: Prüfung und Zertifizierung für die additive Serienfertigung in den Bereichen Hard- & Software, Feedstock & Material Properties, Process Chain Certification, Product Testing, Certification & Approval, Company Certification und Training & Standards;

- Clariant: Im Rahmen der strategischen Allianz Munich Catalysis (MuniCat), einer themenorientierten Verbundforschung zur Katalyse, werden im TUM Catalysis Research Center seit Ende 2014 neuartige 3D-Drucktechniken auf dem Gebiet der heterogenen Katalyse entwickelt. Dieser avantgardistische Ansatz ist international ohne Vorbild und macht Katalysatorformkörper-Geometrien zugänglich, die mit keiner anderen derzeit technisch anwendbaren Technologie erreichbar wären. Aus den Basiskenntnissen ist der Forschungscluster 3DKat der Bayerischen Forschungsförderung entstanden.

Internationale Allianzen

Verstärkt werden die Partnerschaften mit Wirtschaftsunternehmen durch die im Jahr 2015 von der TUM und dem Institut Mines-Télécom (IMT) gegründete German-French Academy for the Industry of the Future, welche im deutsch-französischen Forschungsverbund mit ca. 20 Industriepartnern Forschungs- und Ausbildungsprogramme rund um das Thema Industrie 4.0 fördert. In Kooperation mit dem Skolkovo Institute of Science and Technology (Moskau) und dem Skoltech Center for Design, Manufacturing and Materials ist an der TUM ein Sonderforschungsbereich/Transregio (Sprecher: Prof. Adams) in Beantragung.

5. Kompetenzfelder der Technischen Universität München (TUM) im Bereich Additive Fertigung

5.1 Materialien · Grenzflächen · Thermodynamik

Additive Fertigungsprozesse bauen auf ein tiefgreifendes Verständnis von Materialien, deren Eigenschaften und Modellierung bis hin zur Entwicklung von Herstellungsverfahren von der atomaren Ebene bis zum fertigen Produkt. Dazu gehören unter anderem die Bereiche Tribologie, Oberflächenstrukturierung, keramische Schichten, Polymerverarbeitung, Nanometallurgie, Biomaterialien und Lebendzellensysteme.

Die TUM verfügt über interdisziplinäre Expertise in sechs Fakultäten (CH, PH, MW, BGU, WZW, ME), zwei Zentralinstituten (Catalysis Research

Center¹¹, Walter Schottky Institut¹²) und zwei integrativen Forschungszentren (Campus Straubing¹³, Munich School of BioEngineering¹⁴) im Bereich der Materialforschung von Feststoffen, Fluiden und Biomaterialien, deren physikalisch-chemischen Eigenschaften und Funktionalitäten bis hin zu deren Anwendung im Maschinenbau, Automobile, Luft- und Raumfahrt, Bau und Konstruktion, Medizintechnik und Lebensmitteln. TUM.Additive schafft neue Kenntnisse, um künftig die enormen Anwendungspotenziale für Baumaterialien, Metalle, strukturlose (fluide) und glasartige Materialien, Polymere sowie Materialkombinationen (z.B. anorganisch-organische Hybride) zur Generierung bestmöglicher Produktfunktionalität

11 Catalysis Research Center (CRC): neue Reaktions- und Synthesewege zur Herstellung funktionaler Materialien; <http://www.crc.tum.de>.

12 Walter Schottky Institut - Center for Nanotechnology and Nanomaterials (WSI): Erzeugung und Strukturänderungen von Nanomaterialien; <https://www.wsi.tum.de/>.

13 TUM Campus Straubing: Biomaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen; <https://www.cs.tum.de/de/>.

14 Munich School of BioEngineering (MSB): Synthetische Biologie und Biomaterialien; <https://www.bioengineering.tum.de>.

zu nutzen. Aufbauend auf der materialwissenschaftlichen Expertise der TUM soll eine „Material-Genom“-Datenbank erstellt werden, die Materialfamilien entsprechend ihrer Eigenschaften und Interaktionen sowie möglichen

Anwendungsgebieten klassifiziert und die im Zuge von Fertigungsverfahren ablaufenden Materialveränderungen im finalen Produkt berücksichtigt.

Professur/Expertise	Name	Fakultät
Biochemical Engineering	Dirk Weuster-Botz	MW
Biomechanics	Oliver Lieleg	MW
Medical Materials and Medical Implant Design	Petra Mela	MW
Micro Technology and Medical Device Technology	Tim Lüth	MW
Materials Engineering of Metals	Peter Mayr	MW
Materials Science and Mechanics of Materials	Ewald Werner	MW
Aerodynamics and Fluid Mechanics	Nikolaus A. Adams	MW/LRG
Computational Thermo-Fluid Dynamics	Wolfgang Polifke	MW
Interface Materials Engineering	N.N.	MW
Multi-scale Modeling of Fluid Materials	N.N.	MW
Plasma Material Interaction	Rudolf Neu	MW
Thermodynamics	Thomas Sattelmayer	MW
Metal Forming and Casting	Wolfram Volk	MW
Carbon Composites	Klaus Drechsler	MW/LRG
Concrete Structures	Oliver Fischer	BGU
Materials Science and Testing	Christoph Gehlen	BGU
Metal Structures	Martin Mensinger	BGU
Mineral Engineering	Detlef Heinz	BGU
Synthesis of Innovative Materials	Tom Nilges	CH
Macromolecular Chemistry	Bernhard Rieger	CH
Functional Materials	Peter Müller-Buschbaum	PH
Biopolymer Chemistry	Dieter Langosch	WZW
Biothermodynamics	Mirjana Minceva	WZW
Fluid Dynamics of Complex Biosystems	Nathalie Germann	WZW
Chemistry of Biogenic Ressources	Volker Sieber	TUMCS
Biogenic Polymers	Cordt Zollfrank	TUMCS

Weitere Professuren (geplant):
 Additive Materials (MW) · Composite Materials (TUMCS) · Unconventional Materials (CH) · Biogenic Functional Materials (TUMCS) · Food Material Science (WZW).

Neben Metall, Keramik und Polymeren liegt ein besonderer Fokus auf funktionalen Biomaterialien, denn erneuerbare Rohstoffe und funktionsoptimierte Biopolymere erlauben innovative Anwendungsgebiete in der Medizintechnik (z.B. personalisierte Implantate, poröse 3D-Scaffolds, kontrolliert abbaubare Stents), im Food Design & Engineering sowie für unterschiedlichste biokompatible Material- und Werkstoff(verbund)strukturen. Der 3D-Druck von Lebendzellverbänden („tissue engineering“) und nanoskaliger Biostrukturen stellt besondere multi-physikalische Herausforderungen an die Fertigungstechnologien und erfordert ein besonderes Verständnis des Verhaltens von Flüssigkeiten und Gasen auf engstem Raum (Mikrofluidik). Beispielsweise ist die exakte und höchstpräzise Nährstoffzugabe für die Gefäßbildung in Zellen und Zellgewebe bislang nicht gelöst.

5.2 Design · Gestaltung · Funktionsgeometrien

Während Designaspekte im klassischen Ingenieurwesen weitgehend auf fertigungsgerechtes Konstruieren begrenzt waren, stellen diese bei der Additiven Fertigung einen integralen Bestandteil des gesamten Entwicklungs- und Produktionsprozesses dar. Additive Fertigungstechnologien heben diverse Design-Einschränkungen bestehender Fertigungsverfahren auf und erlauben die Herstellung hochkomplexer Bauteile. Im Zentrum steht künftig die Funktionalität des Produkts; daraus lassen sich in einem zweiten Schritt die physikalischen Eigenschaften und Strukturen ableiten, diese wiederum geben das Material vor. Durch Additive Fertigung wird es möglich, Designänderungen flexibel und schnell durchzuführen, da diese Verfahren lediglich Geometriedaten benötigen und eine schnelle Geometrieerfassung

bestehender Produkte durch 3D-Scanning-Verfahren (z.B. Computertomographie) möglich ist (Reverse Engineering). Dabei eröffnet insbesondere die Kombination unterschiedlicher Skalen und Materialien sowie der Einsatz von Simulationsmodellen ungeahnte Designfreiheiten und Funktionsgeometrien (Micro-Scale Engineering), um gewünschte Funktionen des Endprodukts in die Fertigung zu integrieren. Die Vielfalt der eingesetzten Anlagentechnik und Werkstoffe erlaubt neben der reinen Erstellung angepasster Geometrien auch die modifizierte Ausführung werkstofflicher Strukturen, wie etwa Hohl- und Leichtbaustrukturen, mit variierender Dichte oder Porosität des Werkstoffs über den Querschnitt des Bauteils und speziellen konstruktiv vorbestimmten Aufbaueigenschaften.

Im Sinne eines Umdenkens in den konventionellen Design- und Konstruktions-Workflows, eröffnet die TUM im Leitbild des „Human-Centered Engineering and Future Design“ (TUM Zukunftskonzept 2018/19) dem Design Thinking daher eine neue Handlungsdimension. Als neues Integrative Research Center, bündelt das TUM Technology Design Center¹⁵ führende Kompetenzen aus den Natur-, Ingenieur-, Computer- und Wirtschaftswissenschaften, der Architektur und dem Industrial Design und ermöglicht dem wissenschaftlich rückverankerten Design in der Additiven Fertigung völlig neue, wertschöpfende Wirkungen auf die Prozess- und Produktgestaltung in deren gesamten Breite. Entlang der Agenda TUM.Additive werden geeignete Bauteile analysiert und solche identifiziert, bei denen die Additive Fertigung und ein funktionsgerechtes Re-Design technologische oder wirtschaftliche Vorteile verspricht. Die entsprechenden Designmöglichkeiten an der TUM erstrecken sich von der Nachbildung biologischer Vorbilder (Leonardo

¹⁵ Partner: Dyson School of Design Engineering (IC London); Design Academy Eindhoven; Singapore University of Technology and Design; Stanford Institute of Design.

da Vinci Zentrum für Bionik¹⁶) bis hin zur angepassten Ausführung eigens konzipierter Ansätze eines Strukturaufbaus. Die Potenziale dieser Strukturen werden werkstoff- und

prozessspezifisch untersucht, entsprechende Prozesse konzipiert und simuliert und anhand realer Anforderungen erprobt.

Professur/Expertise	Name	Fakultät
Architectural Design and Participation	Francis Kéré	AR
Architectural Design and Building Envelope	Tina Wolf	AR
Architectural Design and Conception	Uta Graff	AR
Architectural Design, Rebuilding and Conservation	Andreas Hild	AR
Digital Fabrication	N.N.	AR/BGU
Spatial Art and Lightning Design	Hannelore Deubzer	AR
Structural Design	Rainer Barthel	AR
Urban Architecture	Dietrich Fink	AR
Urban Design	Benedikt Boucsein	AR
Architectural Design and Timber Construction	Hermann Kaufmann	AR
Building Technology and Climate Responsive Design	Thomas Auer	AR
Industrial Design	Fritz Frenkler	AR
Product Development and Light-Weight Design	Markus Zimmermann	MW/LRG

Weitere Professuren (geplant):

Bio-Nanoprinting (PH/ME) · Design for Additive Manufacturing · Building Product Design (AR/BGU).

5.3 Fertigungsverfahren

Zur Realisierung weitreichender Designfeatures und Funktionalitäten baut die TUM im Rahmen von TUM.Additive ihre breite Verfahrenspalette für unterschiedliche Applikationen unter Verwendung von metallischen und intermetallischen Werkstoffen, Kunststoffen, Multimaterial- und Biosystemen aus:

- 3D-Druckverfahren (z.B. zur Generierung komplexer Elektronikstrukturen);
- Düsenbasierte Verfahren (z.B. zur zeit- und werkstoffeffizienten Fertigung von Mikrostrukturen bis hin zu großvolumigen Bauteilen);
- Pulverbettverfahren (z. B. zur Herstellung von Bauteilen mit hoher Geometriefreiheit sowie sehr feinen Strukturen und Oberflächen).

¹⁶ Leonardo da Vinci Zentrum für Bionik: Übertragung evolutionärer Lösungen aus der Natur und die hinter den biologischen Systemen stehenden Auslegungsprinzipien und Organisationsaspekte in revolutionäre technische Systeme; <http://www.bionik.tum.de>.

Professur/Expertise	Name	Fakultät
Micro Technology and Medical Device Technology	Tim Lüth	MW
Metal Forming and Casting	Wolfram Volk	MW
Carbon Composites	Klaus Drechsler	MW/LRG
Automatic Control	Boris Lohmann	MW
Bioseparation Engineering	Sonja Berensmeier	MW
Vibroacoustics of Vehicles and Machines	Steffen Marburg	MW
Industrial Management and Assembly Technologies	Gunther Reinhart	MW
Automation and Information Systems	Birgit Vogel-Heuser	MW
Machine Tools and Industrial Management	Michael Zäh	MW
Materials Handling, Material Flow, Logistics	Johannes Fottner	MW
Machine Elements	Karsten Stahl	MW
Laser-based Additive Manufacturing	N.N.	MW

Weitere Professuren (geplant):

Metal-based Additive Manufacturing (MW) · Hybrid Additive Manufacturing (MW) · Additive Machine Digital Twins (MW) · Manufacturing Systems and Assembly Solutions (MW) · Tissue Engineering (WZW/ME).

Mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) verfügt die TUM über eine der größten produktionstechnischen Forschungseinrichtungen in Deutschland mit Kernexpertise in den Bereichen Additive Fertigung, Werkzeugmaschinen, Montagetechnik und Robotik, Füge- und Trenntechnik sowie auf dem Gebiet Produktionsmanagement und Logistik.

5.4 Sensorik

Bereits geringe Veränderungen einzelner Prozessparameter sowie Umgebungseinflüsse (z.B. Wärmestau, Aufheizung, Verschmutzung) können wegen ihres komplexen Zusammenspiels zu einer signifikanten Veränderung der Produktqualität führen. TUM.Additive fokussiert daher auf die Entwicklung von maßgeschneiderten Prozessbeobachtungssensoren in Kombination mit intelligenten Bildverarbeitungssystemen für generative Prozesse.

Dadurch können neue Informationen über Schlüsselprozesse gewonnen, auftretende Effekte bei Fehlparametrierungen verstanden und Qualitätssicherungsmethoden bzw. eine aktive Prozessregelung entwickelt werden, um insbesondere bei komplexen Bauteilen einen defektfreien und exakten Aufbau zu ermöglichen. Moderne Sensorsysteme bilden auch die elektronischen Schnittstellen neuer Cyber-Physischer Systeme. Mittels elektrochemischer Sensorfelder können zudem chemische Signale von Zellen in Echtzeit aufgezeichnet werden. An der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik richten sich Neuberufungen auf die Erforschung innovativer Sensortechnologien aus.

Professur/Expertise	Name	Fakultät
Circuit Design	Ralf Brederlow	EI
Electronic Design Automation	Ulf Schlichtmann	EI
Hybrid Electronic Systems	Franz Kreupl	EI
Micro- and Nanosystems Technology	N.N.	EI
Neuroelectronics	Bernhard Wolfrum	EI
Nano- and Quantum Sensors	N.N.	EI
Sensor Systems	N.N.	EI

5.5 Numerische Mechanik und Simulation zur Prozessoptimierung

Im Rahmen von TUM.Additive verstärkt die TUM ihre Aktivitäten zur Verknüpfung

mathematischer Expertise mit moderner Anlagentechnologie und eröffnet dem gemeinsamen Schwerpunkt der Fakultäten Maschinenwesen und Mathematik neue Profilierungs- und Anwendungsmöglichkeiten.

Professur/Expertise	Name	Fakultät
Aerodynamics and Fluid Mechanics	Nikolaus A. Adams	MW/LRG
Applied Mechanics	Daniel J. Rixen	MW
Continuum Mechanics	Phaedon Koutsourelakis	MW
Mechanics and High Performance Computing	Michael W. Gee	MW
Numerical Mechanics	Wolfgang A. Wall	MW
Applied Numerical Analysis	Felix Krahmer	MA
Applied Numerical Analysis	Massimo Fornasier	MA
Numerical Mathematics	Barbara Wohlmuth	MA
Numerical Mathematics / Scientific Computing	Folkmar Bornemann	MA
Numerics of Complex Systems	Oliver Junge	MA
Optimal Control	Boris Vexler	MA
Scientific Computing	Elisabeth Ullmann	MA
Structural Mechanics	Gerhard Müller	BGU

Zum besseren Prozessverständnis in der Additiven Serienfertigung und um in Abhängigkeit von Werkstoff und Geometrie des zu erstellenden Produktes Material- sowie Aufbaufehlern im Prozess entgegenzuwirken, werden anhand von Simulationen Kenntnisse zu Temperaturfeldern, Phasenzuständen, Spannungen, Dehnungen und Verzug gewonnen.

5.6 Cyber-Physische Systeme · Maschinenintelligenz · IT-Sicherheit

Mit dem Ziel, funktionsfähige Endprodukte zu erhalten, die keiner manuellen Nachbearbeitung bedürfen, werden sog. Digitale Zwillinge generiert; als „data blueprints“ stellen diese ein digitales Abbild des gesamten zu einem Produkt führenden Produktionsprozesses dar. Digitale Zwillinge sind hochpräzise und nahezu exakte virtuelle Simulationsmodelle der Endprodukte. Cyber-Physische Systeme kombinieren Softwarelösungen und Digitale Zwillinge über Hochleistungs-Dateninfrastrukturen mit elektronischen und mechanischen Komponenten, um alle Systeme und Maschinen entlang der Phasen des Lebenszyklus – von der Idee eines Produkts über die Entwicklung bis zur Fertigung – vernetzt zu steuern. Damit werden nicht nur einzelne Produktionsschritte optimiert, sondern die gesamte Wertschöpfungskette; Produktionsmittel und -materialien können exakt sortiert und priorisiert, die Produkte individuell angepasst werden. Steigende Vernetzung und Digitalisierung fördern zudem das Zusammenspiel zwischen Mensch und Roboter sowie den gezielten Einsatz ihrer individuellen Stärken. Neue Methoden des Maschinellen Lernens und künstlicher Intelligenz runden das Portfolio für produktzentrierte und informationsbasierte Fragestellungen ab.

Dazu nutzt die Munich School of Robotics and Machine Intelligence (MSRM, 2017; Leitung: Prof. Haddadin) die internationale Reputation der TUM in der KI-Forschung (#1 in der THE-Review 2018) und verbindet diese mit der Robotik und der Perzeption, um innovative und nachhaltige technologische Lösungen in der künftigen Produktion zu entwickeln. Als Anwendungsplattform assoziiert ist die fortiss GmbH. Die TUM erschließt Potenziale der Automatisierung unter Nutzung cyber-physischer Messroboter zur 3D-Digitalisierung und des Einsatzes mobiler autonomer Roboter als wandlungsfähige Produktionsressourcen (Werkerassistenzsysteme). Digitale Produktionsprozesse erfordern aber auch völlig neue Anforderungen an die Datensicherheit. Die Abwehr von unautorisierten Zugriffen und Manipulationen erfordert neue technische Lösungen in Bezug auf digitale Verschlüsselungstechnologien. Diesen Herausforderungen stellt sich TUM.Additive in einer fakultätsübergreifenden Aufstellung. Unterstützt durch das TUM Data Science Institute (im Aufbau) und das Leibniz-Rechenzentrum¹⁷ am Campus Garching werden interaktive Visualisierungs-Software, Big Data-Plattformen und Methoden zum Management großer Mengen an Prozessdaten (Log aus Roboter, Laser, CAM, Sensorik-Bussignalen) und digitaler Bilddaten (z.B. aus Temperaturmessung, Diagnose) erarbeitet, um die angemessene Interpretation von Prozessdaten, eine erleichterte Fehleranalyse und eine Nachweisdokumentation zu ermöglichen.

¹⁷ Leibniz-Rechenzentrum (LRZ): SuperMUC: 26,7 Petaflops/sec, #8 im weltweiten Ranking; High Performance Computing wird schnellere und vor allem verlässlichere Ergebnisse für Big Data-Fragestellungen, Visualisierungen und Virtueller Realität hervorbringen. Die rechenintensiven Simulationen und Modellierungen von Digitalen Zwillingen werden damit eine bisher unerreichte Präzision erhalten.

Professur/Expertise	Name	Fakultät
Automatic Control Engineering	Martin Buss	EI
Embedded Systems and Internet of Things	Sebastian Steinhorst	EI
Human-Machine Communication	Gerhard Rigoll	EI
Robotics and System Intelligence	Sami Haddadin	EI/IN
Cyber Physical Systems	Matthias Althoff	IN
Information Systems	Helmut Krcmar	IN
Data Mining and Analytics	Stephan Günnemann	IN
Large-scale Data Analytics and Machine Learning	N.N.	IN
Network Architectures and Services	Georg Carle	IN
Robotics and Embedded Systems	Alois Knoll	IN
Scientific Computing	Hans-Joachim Bungartz	IN
Software and Systems Engineering	Alexander Pretschner	IN
Hardware-aware Algorithmics and Software for High Performance Computing	Michael Bader	IN
IT Security	Claudia Eckert	IN
Theoretical Foundations of Artificial Intelligence	N.N.	IN
Cyber Physical Systems in Production Engineering	Marco Caccamo	MW
Automation and Information Systems	Birgit Vogel-Heuser	MW
Safe Embedded Systems	Julien Provost	MW

Weitere Professuren (geplant):
Digital Twins and Virtual Products (LRG).

5.7 Verifikation · Qualitätssicherung (Werkstoffprüfung)

Analog zu herkömmlichen Produktionsverfahren, setzt die additive Herstellung kostengünstiger und qualitativ hochwertiger Produkte die strikte Einhaltung von Qualitätsstandards in jedem Teilschritt der Prozesskette voraus. Kritische Qualitätsparameter bei der Additiven

Fertigung von Bauteilen sind insbesondere Maßhaltigkeit, Rissfreiheit, Gefüge- und Materialhomogenität, Dichte, Festigkeit, Härte, Oberflächengüte und Eigenspannungsverhalten.

Unter Nutzung der Synergien mit der Physik, Elektrotechnik und Informatik hält sich TUM. Additive mit der Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz¹⁸, dem Metall-Analyse

¹⁸ Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II): Zentralinstitut der TUM (Gemeinschaftsfinanzierung Bund/Land). Wissenschaftliche Nutzung als Heinz Maier-Leibnitz Zentrum (MLZ) in Kooperation mit Helmholtz Jülich/Geesthacht, Mitwirkung MPG/mehrere Universitäten; u.a. Strukturanalyse funktioneller Materialien; <https://www.frm2.tum.de>.

Labor¹⁹ an der Fakultät für Maschinenwesen, sowie dem Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung alle zerstörungsfreien Prüfverfahren für die Untersuchung von Werkstoffen, Bauteilen, Anlagen und Bauwerken in den Kerndisziplinen Bauwesen und Maschinenbau sowie auf dem

Gebiet der Architektur, der Geophysik und der Medizintechnik vor. Neben der Überprüfung der werkstofflichen Eigenschaften werden Kenntnisse über die geometrischen Abmessungen sowie den Materialaufbau der additiv erstellten Struktur geschaffen.

Professur/Expertise	Name	Fakultät
Non-disruptive Testing	Christian Grosse	BGU/MW
Materials Science and Testing	Christoph Gehlen	BGU
Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rock Mechanics and Tunneling	Roberto Cudmani	BGU
Traffic Route Construction	Stephan Freudenstein	BGU
Machine Tools and Industrial Management	Michael Zäh	MW

5.8 Geschäftsmodelle für Additive Fertigung

Im Rahmen von TUM.Additive werden unter Nutzung der Expertise der TUM School of Management in München sowie am Bildungscampus Heilbronn neue Wirtschaftsmodelle für die Bereiche Additive Fertigung und Digitalisierung entwickelt. Exemplarisch werden Geschäftsmodelle der dynamischen Gründerszene in der Metropolregion München mit mittelständischen Familienunternehmen in Baden-Württemberg (sog. „Hidden Champions“) am neuen TUM-Standort in Heilbronn verglichen. Besonderes Interesse der praxisorientierten Forschung liegt darauf, welche Strategien in Bezug auf den digitalen Wandel verfolgt werden und wie innovativ, flexibel oder reaktiv die verschiedenen Unternehmensstrukturen sind.

¹⁹ Metall-Analyse Labor – Fakultät für Maschinenwesen: u.a. Computertomographie-System für hochauflösende Strukturuntersuchungen, fokussierte Ionenstrahl-Mikroskopie für Materialuntersuchungen erhalten.

Professur/Expertise	Name	Fakultät
Controlling	Gunther Friedl	WI
Production and Supply Chain Management	Martin Grunow	WI
Operations Management	Rainer Kolisch	WI
Logistics and Supply Chain Management	Stefan Minner	WI
Operations Research	Andreas S. Schulz	WI
Corporate Management	Alwine Mohnen	WI
Science & Technology Policy	Ruth Müller	WI/WZW
Marketing and Consumer Research	Jutta Roosen	WI
Marketing	Christoph Ungemach	WI
Strategy and Organization	Isabell M. Welpé	WI
Technology and Innovation Management	Joachim Henkel	WI
Innovation Research	Sebastian Pfothhauer	MCTS

Weitere Professuren (geplant):

Additive Manufacturing for Companies (WI) · 3D Opportunity and Business Capability (WI).

6. Potenzialbereiche und Applikationsfelder

6.1 Bau und Konstruktion

Additiven Technologien wird enormes wirtschaftliches Potenzial im Bauwesen und zur Herstellung komplexer architektonischer Strukturen zugerechnet, die Dynamik der aktuellen Entwicklungen ist beeindruckend. Die weitreichenden Kompetenzen im Bau- und Konstruktionsbereich, sind in der Fakultät Architektur, der Ingenieur fakultät Bau · Geo · Umwelt, in der technischen Bauchemie und am Leonhard Obermeyer Center²⁰ angesiedelt. Dabei werden verschiedene innovative Materialien und Prozesse untersucht, ebenso wie deren Modellierung und Simulation. So wurden an der TUM in Anlehnung an die Prinzipien der Natur (Bionik)

erstmalig Fassaden aus dem 3D-Drucker entwickelt, in die dünnwandige Röhren eingelagert werden und dadurch eine verbesserte Luftzirkulation zur Optimierung des Gebäudeklimas ermöglicht wird.²¹

TUM.Additive nutzt die in den letzten Jahren aufgebaute Forschungsexpertise der Fakultäten BGU und AR. Die TUM verfügt über das Alleinstellungsmerkmal, ablegende (Extrusions-) Verfahren parallel und vergleichend zu selektiv bindenden (partikelbettbasierten) Verfahren betrachten zu können. Die Arbeiten zum selektiven Binden durch Cement Paste Intrusion, einem Verfahren mit äußerst hohem baupraktischem Potenzial, sind weltweit wegweisend.

²⁰ Leonhard Obermeyer Center: Das am TUM-Stammgelände verortete Zentrum widmet sich der Gestaltung, Schaffung und Instandhaltung der gebauten Umgebung. Durch den Einsatz digitaler Methoden und Technologien werden ökologisch und ökonomisch nachhaltige Bauwerke bzw. Betriebskonzepte angestrebt.

²¹ <https://www.tum.de/die-tum/aktuelles/pressemitteilungen/detail/article/34984/>

Auch in den Bereichen Building Information Modelling, Simulation von additiven Prozessen sowie auf dem Gebiet der Topologieoptimierung ist die TUM international wettbewerbsfähig. Eine Initiative für einen SFB/Transregio ‚Additive Manufacturing in Construction – The Challenge of Large Scale‘ gemeinsam mit der TU Braunschweig war in der Skizzenphase erfolgreich; der Vollartrag wird im Mai 2019 bei der DFG eingereicht.

TUM.Additive fokussiert darauf, bereits etablierte Spitzenexpertise, wie z.B. beim großformatigen Partikelbett-3D-Druck, weiter auszubauen. Insbesondere werden künftig innovative Materialien, Prozesse und digitale Werkzeuge auch in Hinblick auf ihre Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit neu- bzw. weiterentwickelt, um so die in der Baupraxis benötigte Qualitätssicherheit und Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Einschlägige Professuren zzgl. zu den in Kap. 5 genannten Fachexperten

	Name	Fakultät
Architectural Informatics	Frank Petzold	AR
Energy-efficient, Sustainable Building and Planning	Werner Lang	AR
Building Construction and Material Science	Florian Musso	AR
Building Realization and Robotics	Thomas Bock	AR
Building Technology and Climate Responsive Design	Thomas Auer	AR
Timber Structures and Building Construction	Stefan Winter	AR
Structural Mechanics	Gerhard Müller	BGU
Computation in Engineering	Ernst Rank	BGU
Computational Modeling and Simulation	André Borrmann	BGU
Construction Process Management	N.N.	BGU
Material Science and Testing	Christoph Gehlen	BGU
Structural Design	Kai-Uwe Bletzinger	BGU
Materials Handling, Material Flow, Logistics	Johannes Fottner	MW
Machine Tools and Manufacturing Technology	Prof. Michael Zäh	MW
Construction Chemistry	N.N.	CH

Durch strategische Kooperation mit führenden Industriepartnern beschleunigt TUM.Additive den Transfer der Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung in den industriellen Maßstab. Ein aktuelles Beispiel ist ein Projekt für eine dreigeschossige 3D-gedruckte, lichtdurchlässige Fassade für das provisorische Eingangsgebäude des Deutschen Museums während

der mehrjährigen Umbauarbeiten (Projekt: M. Mungenast, AR, geplanter Baubeginn 2019).

6.2 Luft- und Raumfahrt

Als Schlüsselbranche muss die deutsche Luftfahrtindustrie innovative Fertigungsprozesse einsetzen, um ihre Konkurrenzfähigkeit

langfristig zu sichern. Die Luft- und Raumfahrtindustrie ist seit circa 20 Jahren eine der zentralen Treiberbranchen der Additiven Fertigung. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass sich die häufig eingesetzten Konstruktionswerkstoffe, wie Titan- oder Nickelbasislegierungen, nur mit hohem Kosteneinsatz zerspanen lassen. Das Handelsblatt (18.11.2018) prognostiziert ein Wachstum der additiven Fertigungsbranche in der Luft- und Raumfahrt um den Faktor 24: von 0,4 Mrd. Euro in 2015 auf 9,6 Mrd. Euro im Jahr 2030. Dieses starke Wachstum lässt sich nur dann realisieren, wenn das Potenzial des „Design for Additive“ bei der Neukonstruktion von Baugruppen zukünftiger Flugzeuggenerationen erschlossen wird. So sind komplexe, hochwertige Leichtbauteile mit neuen Eigenschaften und Funktionen kostengünstig realisierbar. Anwendung finden die Verfahren vor allem bei solchen Bauteilen, die aufgrund von Gewichtsreduktionen zu Treibstoffeinsparungen oder aufgrund neuer Konstruktionsweisen zur Reduktion von Lärmmissionen führen. In diesem Schwerpunkt stellt die Additive Fertigung eines der bedeutendsten Wachstumssegmente dar, wenn es gelingt, neue technologische Herausforderungen zu meistern. Mit der neuen Fakultät für Luftfahrt, Raumfahrt und Geodäsie (LGR, gegr. 2018) und der Agenda TUM.Additive nutzt die TUM die Chance, bisher über mehrere Einrichtungen verteilte Kernkompetenzen synergetisch zu bündeln und in Verbindung mit dem international herausragenden Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR, Helmholtz) zu einem neuen Profilbereich des „German Engineering“ an der TUM zu entwickeln.²²

Mit der Schwerpunktinitiative TUM.Additive nimmt sich die TUM den Herausforderungen für die Additive Fertigung in der Luft- und Raumfahrt an: Derzeit ist die Auswahl der für additive Fertigungsverfahren zur Verfügung stehenden Materialien zu eingeschränkt. Für

Anwendungen im Hochtemperaturbereich für sowohl Raumfahrzeuge als auch Triebwerke stehen heute noch nicht alle benötigten Werkstoffe zur Verfügung. Es bedarf beispielsweise hochtemperaturfester Nickelbasislegierungen für die Luftfahrt und Platinlegierungen für Brennkammern zur Lagesteuerung von Satelliten. Auch setzt die Reduktion der durch den weltweit ansteigenden Flugverkehr einhergehenden Umweltbelastungen sowie der Betriebskosten von Flugsystemen die Entwicklung effizienterer Flugmotoren mit leichteren Triebwerksteilen voraus. Zur Massereduktion dieser Bauteile bei gleichzeitiger Gewährleistung der geforderten Eigenschaften erforscht die TUM die Nutzung von Strahlschmelztechnologien zum Aufbau komplexer Strukturen im Schichtbauverfahren. Eine besondere Herausforderung für die Additive Fertigung in der Luft- und Raumfahrt stellt die Erfüllung höchster Qualitätsansprüche dar. Diese können nur erreicht werden, wenn die Prozesskette durchgängig von der Rohmaterialherstellung bis hin zur thermischen Nachbehandlung von Bauteilen beherrscht wird. Herausforderungen bestehen im Besonderen in der zuverlässigen und zugleich wirtschaftlichen Nachbehandlung von Oberflächen. Des Weiteren existieren heute keine robusten Prozessketten zur Herstellung metallischer Bauteile mit Abmessungen von bis zu mehreren Metern. Die hohen Qualitätsansprüche sollen durch branchenübliche Zertifizierungsvorgehen sichergestellt werden. Hierbei besteht die Herausforderung, dass prozessbedingte Fehler nach dem Aufbauprozess nur eingeschränkt detektierbar sind. Daraus resultieren Herausforderungen in der wirtschaftlichen Kombination von In- und Post-Prozess-Kontrollen sowie für die Weiterentwicklung von zerstörungsfreien Prüfverfahren. Die Einbindung von Simulationswerkzeugen wird für die wirtschaftliche Anwendung additiver Fertigungsverfahren eine wichtige Voraussetzung sein.

²² <https://www.tum.de/die-tum/aktuelles/pressemitteilungen/detail/article/34955/>.

Die heute vorherrschenden Standards in der Luft- und Raumfahrttechnik im Bereich simulationsgestützte Bauteilauslegung können bei bionischen Leichtbaustrukturen, wie sie nur mittels additiver Fertigungsverfahren hergestellt werden können, noch nicht erreicht werden. Um die Produktion der Triebwerksbauteile mit minimalem Ausschuss und ohne aufwändige, vorangehende Versuchsreihen zu erreichen, werden neue Simulationswerkzeuge entwickelt, mit deren Hilfe verzugsrelevante

Prozessschritte eines realen Fertigungsprozesses abgebildet und die an Bauteilen auftretenden Temperaturfelder und dadurch hervorgerufenen Verformungen sowie Eigenspannungen mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden können sowie die Triebwerksbauteile bauteilspezifisch optimiert werden können. Mittels simulationsgestützter Optimierung sollen auf Basis von Fertigungsdaten fertigungsbedingte Maßhaltigkeitsabweichungen kompensiert werden.

Einschlägige Professuren zzgl. zu den in Kap. 5 genannten Fachexperten

	Person	Fakultät
Aircraft Design	Mirko Hornung	MW/LRG
Aerodynamics and Fluid Mechanics	Nikolaus A. Adams	MW/LRG
Carbon Composites	Klaus Drechsler	MW/LRG
Helicopter Technology	Manfred Hajek	MW/LRG
Product Development and Light Construction	Markus Zimmermann	MW/LRG
Flight Systems Dynamics	Florian Holzapfel	MW/LRG
Astronautics	Ulrich Walter	MW/LRG
Rocket Propulsion	Oskar J. Haidn	MW/LRG
Space Transportation Systems	N.N.	LRG
Turbomachinery and Flight Propulsion	Volker Gümmer	MW/LRG

6.3 Automotive

Die Automobilindustrie zählt zu den wichtigsten Branchen Deutschlands. Die Einsatzgebiete für Additive Fertigungsverfahren im Automotive-Bereich sind heute überwiegend im Umfeld des Rapid Prototyping anzusiedeln. Vereinzelt werden Bauteile auch in Serie produziert.

Aufbauend auf der langjährigen Expertise in den Bereichen Fahrzeug und Mobilität, fokussiert die Handlungsagenda TUM.Additive nun auf die wesentlichen technischen Herausforderungen zur kostenkompetitiven Herstellung

additiv gefertigter Bauteile im Bereich Automotive. Bislang sind die additiv gefertigten Bauteile in diesem Bereich nur selten konkurrenzfähig, da sich die eingesetzten Werkstoffe (z.B. Aluminiumlegierungen) kosteneffizient mittels konventioneller Druckguss oder Zerspanungsverfahren herstellen lassen. Aus diesem Grund fiel die Wachstumsprognose des Handelsblatts (18.11.2018) für den Einsatz additiver Fertigungstechnologien in der Automobilbranche im Vergleich zur Luft- und Raumfahrt deutlich geringer aus. Ausgehend von 0,3 Mrd. Euro in 2015 wird ein Wachstum um den Faktor 9 auf 2,6 Mrd. Euro im Jahr 2030 erwartet. Dringend

benötigt wird hierfür eine Vervielfachung der Aufbauraten, was nur durch neuartige Maschinenkonzepte (z.B. Mehrfachlaserstrahlschmelzmaschinen) erreicht werden kann. Auch die Herstellung kostengünstiger Ausgangswerkstoffe wie z.B. Metallpulver und die Erarbeitung von qualitätssichernden Recyclingroutinen für die Pulver-Wiederverwendung stellen zentrale Herausforderungen dar. Zur Senkung

der Herstellungskosten sollen automatisierte Prozessketten gestaltet werden, welche die etablierten Anforderungen an Prozessstabilität und Overall Equipment Effectiveness (OEE) erfüllen. Im Bereich der Produktentwicklung sollen neue Potenziale des „Design for Additive“ im Besonderen mit Bezug zur Funktionsintegration erschlossen und zum bestmöglichen Kundennutzen eingesetzt werden.

Einschlägige Professuren zzgl. zu den in Kap. 5 genannten Fachexperten

	Person	Fakultät
Automotive Technology	Markus Lienkamp	MW
Ergonomics	Klaus Bengler	MW
Control Technology	Boris Lohmann	MW
Industrial Management and Assembly Technologies	Gunther Reinhart	MW
Machine Elements	Karsten Stahl	MW
Metal Forming and Casting	Wolfram Volk	MW
Internal Combustion Engines	Georg Wachtmeister	MW
Machine Tools and Manufacturing Technology	Michael F. Zäh	MW
Applied Mechanics	Daniel Rixen	MW
Vibroacoustics of Vehicles and Machines	Steffen Marburg	MW

6.4 Medizintechnik & Gesundheitstechnologien

Rapid-Technologien in der Medizintechnik sind heute schon nicht mehr wegzudenken – etwa in der Dentaltechnik. Individuelle Produkte wie Zahnersatz oder Gebisse lassen sich mit generativen Verfahren schneller und preisgünstiger fertigen. Doch enorme Entwicklungsperspektiven werden in der Additiven Fertigung in der Medizintechnik noch erwartet; damit sind hinsichtlich Gewicht und Festigkeitseigenschaften optimierte, individuell angepasste medizinische Hilfsmittel kostengünstig und innerhalb kurzer Zeit herstellbar. So können beispielsweise medizinische Geräte anatomisch und

biomechanisch an individuelle Patientenbedürfnisse angepasst oder hochfunktionsintegrierte Systeme für minimal-invasive chirurgische Eingriffe implementiert werden. Große Fortschritte sind bereits auf den Gebieten Orthopädiotechnik und Knochenersatzmaterialien zu verzeichnen: z.B. die Additive Fertigung poröser Titan- oder Titanlegierungsstrukturen für patientenspezifische Implantate mittels Selective Laser Melting, im Körper abbaubare Implantate und Scaffolds (Gerüste), und die Einbringung keramischer Nanopartikel ins Binder-System zur Verbesserung der mechanischen Stabilität bei 3D-gedrucktem Knochenersatz. In der nächsten Generation künstlicher Knochen werden resorbierbare Implantate

durch selektives Laserschmelzen hergestellt und mit feinen Porenkanälen durchzogen sein, welche eine Gitterstruktur schaffen, in die der angrenzende Knochen hineinwachsen kann. Auch die Entwicklung von Prothesen, bei denen an Stelle der aufwändigen Anprobe am Patienten die erforderlichen Daten und individuellen Maße direkt am Computer generiert und anschließend in die Konstruktion integriert werden, verspricht ein enormes Zukunftspotenzial für die generative Fertigung.

Die Agenda TUM.Additive bündelt die Expertisen in den Fakultäten Maschinenwesen, Chemie, der Munich School of Bioengineering

und der Medizin im Bereich kunststoff- und biopolymerbasierter additiver Fertigungsverfahren. Bedingt durch den häufig direkten Kontakt der Medizinprodukte mit Bestandteilen des menschlichen Organismus ist die Auswahl an geeigneten Kunststoffen limitiert. Nur wenn es gelingt, Hochleistungspolymere prozesssicher unter Medical-Grade-Bedingungen zu verarbeiten, lässt sich das Potenzial der Additiven Fertigung für die Medizintechnik ausschöpfen. Ein Fokus liegt daher auf ihrer Körperverträglichkeit, Beständigkeit gegenüber den Einsatzbedingungen im und außerhalb des Körpers sowie guten mechanischen Kennwerten als Implantatwerkstoffe.

Einschlägige Professuren zzgl. zu den in Kap. 5 genannten Fachexperten

	Name	Fakultät
Biomedical Electronics	Oliver Hayden	EI
Biomedical Physics	Franz Pfeiffer	PH
Medical Materials and Medical Implant Design	N.N.	MW
Micro Technology and Medical Device Technology	Tim Lueth	MW
Orthopedics	Rüdiger Eisenhart-Rothe	ME
Plant and Process Technology	Harald Klein	MW
Sport Equipment and Sport Materials	Veit Senner	MW
Vibroacoustics of Vehicles and Machines	Steffen Marburg	MW

6.5 Biofabrication & Regenerative Medizin

TUM.Additive entfaltet seine Wirkungen ebenso in der regenerativen Medizin und den Lebenswissenschaften und verbindet Aktivitäten der Fakultäten Medizin, Sport und Gesundheit, der School of Life Sciences und dem TUM Campus Straubing. Aufbauend auf dem existierenden Fokus auf extrusionsbasierten 3D-Druck und 3D-Plotten von nachwachsenden, organischem Materialien und pastösen Biopolymer-Hydrogelen ergänzt TUM.Additive die Forschungsaktivitäten um das 3D-Bioprinting

von Lebensmitteln (pflanzliche Fleischanaloga) und „maßgeschneiderte Diäten“, basierend auf genetischen Informationen, des körperlichen Zustandes und des Lebensstils von Personengruppen.

Zudem widmet sich TUM.Additive dem wachsenden Problem fehlender Spenderorgane in der Transplantationsmedizin. Der Markt für Materialien, die beim Tissue Engineering benötigt werden, wächst. Schätzungen von Experten zufolge mit rund 30 Prozent pro Jahr und wird bis 2021 die drei Milliarden-\$-Marke

erreichen. Daher fokussiert die TUM auf die additive Biofabrikation von Zellgeweben. Hier baut die TUM auf einer Vielzahl von Erfolgen auf. Zu nennen sind vor allem die TUM-IAS Focus Group für Regenerative Medizin²³ und das Centrum für Angewandtes Tissue Engineering und Regenerative Medizin (CANTER) der TUM, LMU und der Hochschule München, in dem Experten aus den Bereichen Chirurgie/Regenerative Medizin, Zell- und Mikrobiologie, Bioingenieurwesen, Biophysik und Maschinenbau/Medizintechnik gemeinsam an der Herstellung von Gewebe aus körpereigenen Zellen im Labor arbeiten.

Perspektivisch scheint mithilfe von Stammzellen die schichtweise Erzeugung von Haut-, Herzmuskel- oder Knorpelgewebe und funktionsfähigen Organen möglich, wenngleich die Forschung hier noch am Anfang steht. In dem Kontext wird die Forschungsagenda an der TUM um ethische sowie sozial-, politik- und gesellschaftsrelevante Fragestellungen ergänzt und auf die Expertisen des Munich Center for Technology in Society²⁴ und der TUM School of Governance²⁵ zurückgegriffen.

Einschlägige Professuren zzgl. zu den in Kap. 5 genannten Fachexperten

	Name	Fakultät
Medical Materials and Medical Implant Design	Petra Mela	MW
Experimental Plastic Surgery	Arndt Schilling	ME
Biomechanics (MRI Orthopedics)	Rainer Burkart	ME
Synthetic Biosystems	Friedrich Simmel	PH
Experimental Biophysics	Henrick Dietz	PH
Biomechanics	Oliver Lieleg	MW
Biological Chemistry	Arne Skerra	WZW
Food Chemistry and Molecular Sensory Science	Thomas Hofmann	WZW
Livestock Biotechnology	Angelika Schnieke	WZW
Process Systems Engineering	Heiko Briesen	WZW
Brewing and Beverage Technology	Thomas Becker	WZW
Food and Bioprocess Engineering	Ulrich Kulozik	WZW
Wood Bioprocesses	Phillipp Benz	WZW
Biogenic Polymers	Cordt Zollfrank	TUMCS
Microbial Biotechnology	Bastian Blombach	TUMCS

23 <https://www.ias.tum.de/en/research-areas/medical-natural-sciences/alumni-focus-groups/regenerative-medicine/>.

24 Das Munich Center for Technology in Society (MCTS) ist ein Integrative Research Center der Technischen Universität München. Als eines der bedeutendsten Zentren für Wissenschafts- und Technikforschung in Europa zielt es darauf ab, die vielfältigen Wechselwirkungen von Wissenschaft, Technologie und Gesellschaft zu verstehen und zu gestalten; <https://www.mcts.tum.de>.

25 Die TUM School of Governance untersucht die Wechselwirkungen zwischen Politik, Gesellschaft, Wirtschaft und Technik und strebt ein interdisziplinäres und transdisziplinäres sozialwissenschaftliches Verständnis dieser Wechselwirkungen an; <https://www.gov.tum.de>.

6.6 Chemische Stoffumwandlung durch Katalyse

Die chemische Industrie gehört zu den tragenden Säulen der deutschen Volkswirtschaft. Nach einer Ära tiefgreifender Restrukturierung und expansiver Internationalisierung ist sie im weltweiten Wettbewerb erfolgreich geblieben. Energie- und ressourcenschonende Produktionsprozesse, verbunden mit dem Ausbau der Nachhaltigkeitsstrategie auf Basis nachwachsender (biogener) Rohstoffe werden als entscheidende Wettbewerbsfaktoren der Zukunft gesehen. Hier kann die wissenschaftlich verankerte deutsche Chemieindustrie im Bereich der katalytischen Stoffwandlung

wettbewerbliche Effizienzvorteile schöpfen, wenn ihr die Herstellung strukturell definierter Katalysatorsysteme gelingt. Das TUM Center for Catalysis Research (CRC) geht in der strategischen Allianz Munich Catalysis mit Clariant diesen Weg. Neuerdings durch die Bayerische Forschungsförderung gefördert, entwickelt der interdisziplinäre Forschungscluster 3DKat neuartige 3D-Drucktechniken für maßgeschneiderte Katalysatorformkörper-Geometrien. Mit ihnen lässt sich die bisher geringe Selektivität heterogener Katalysatoren um Größenordnungen verbessern, womit das Anwendungsspektrum und die Wirtschaftlichkeit katalytischer Stoffwandlungsprozesse in eine neue Ära eintreten (vgl. Abschnitt 5.2.).

Einschlägige Professuren zzgl. zu den in Kap. 5 genannten Fachexperten

	Name	Fakultät
Industrial Catalysis	Richard Fischer (Clariant/TUM)	CH/CRC
Inorganic and Metal-Organic Chemistry	Roland A. Fischer	CH/CRC
Synthetic Biotechnology	Thomas Brück	CH
Macromolecular Chemistry	Bernhard Rieger	CH/CRC
Inorganic Chemistry with Focus on New Materials	Thomas Fässler	CH
Molecular Catalysis	Fritz E. Kühn	CH/CRC
Synthesis and Characterisation of Innovative Materials	Tom Nilges	CH
Technical Electrochemistry	Hubert Gasteiger	CH/CRC
Chemical Physics	Katharina Krischer	PH/CRC
Chemical Technology I	Kai-Olaf Hinrichsen	CH/CRC
Chemical Technology II	Johannes Lercher	CH/CRC

München, 1. März 2019



Thomas F. Hofmann
Geschäftsführender Vizepräsident
für Forschung und Innovation

Abkürzungsverzeichnis der Fakultäten und Zentren

AR	Architektur
BGU	Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
CRC	Catalysis Research Center
EDU	TUM School of Education
EI	Elektrotechnik und Informationstechnik
IN	Informatik
LRG	Luftfahrt, Raumfahrt und Geodäsie
MA	Mathematik
MCTS	Munich Center for Technology in Society
ME	Medizin
MW	Maschinenwesen
PH	Physik
SG	Sport- und Gesundheitswissenschaften
TUMCS	TUM Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit
WI	Wirtschaftswissenschaften
WZW	Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

Impressum

TUM.Additive

Memorandum zur Additiven Fertigung
an der Technischen Universität München
im Rahmen der TUM AGENDA 2030

Herausgeber:

Technische Universität München
Prof. Dr. Thomas F. Hofmann
Präsident
Arcisstraße 21
80331 München
Tel. +49 89 289 25259
Fax +49 89 289 25260
falk@tum.de
www.tum.de

Layout und DTP-Reinzeichnung:

Britta Eriskat, München

Druck:

Druckerei Joh. Walch GmbH & Co KG,
Augsburg

Technische Universität München

Arcisstraße 21
80333 München
www.tum.de