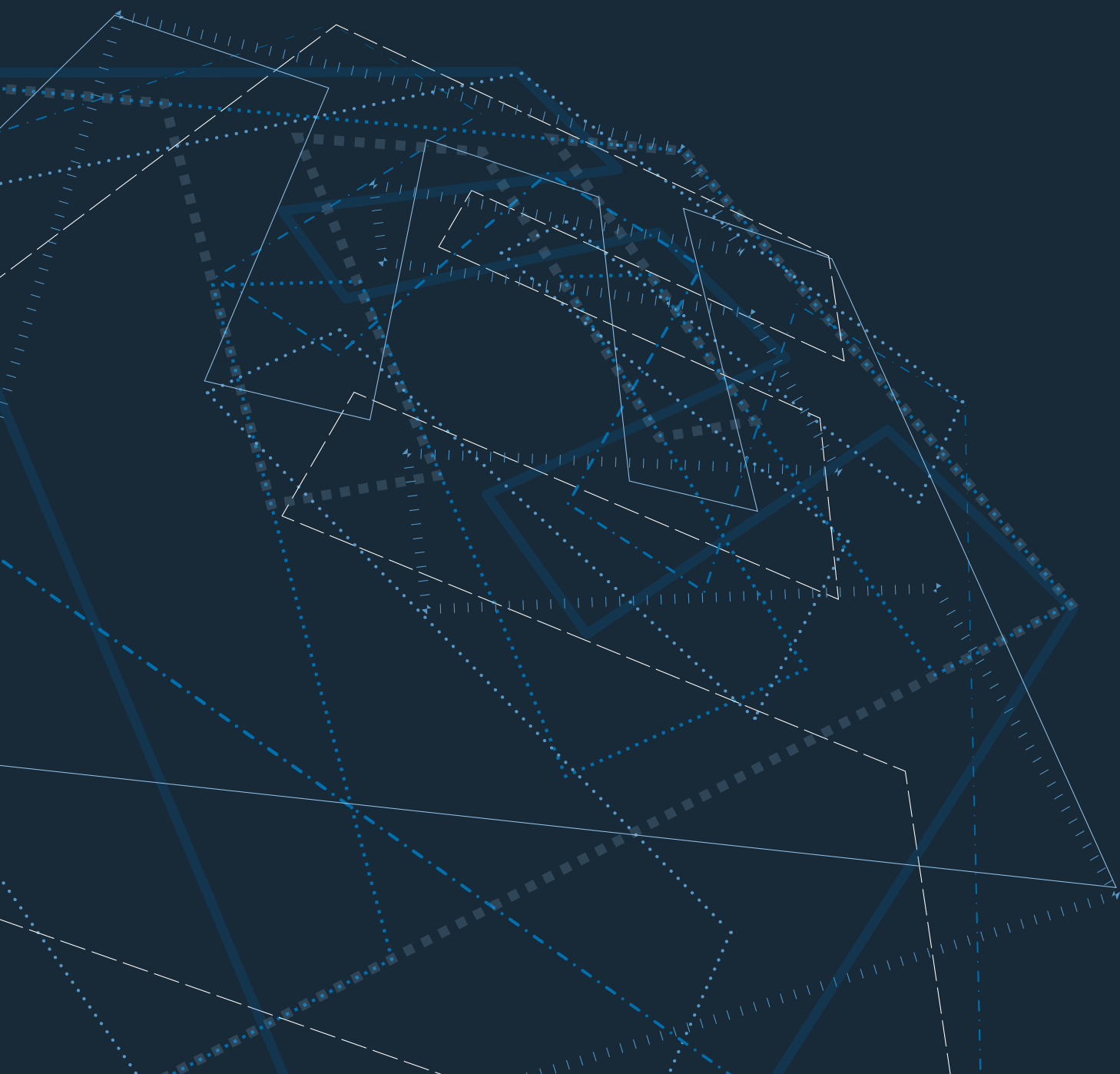


TUM.Energy

Energieforschung an der Technischen
Universität München im Rahmen der
TUM AGENDA 2030



TUM.Energy

Vorwort	5
Zusammenfassung	7
1. Motivation	8
2. Agenda TUM.Energy	12
3. Kompetenzfelder an der TUM	16
3.1 Solarenergie	18
3.2 Windenergie	20
3.3 Biomasse	22
3.4 Wasserkraft	24
3.5 Geothermie	26
3.6 Batterie	28
3.7 Wasserstoff und Power-to-X (PtX)	30
3.8 Elektrisches Energiesystem	32
3.9 Sektorkopplung	34
3.10 Energie und Stadt	36
3.11 Energie und Ernährung	38
3.12 Systemanalyse und Energiemärkte	40
3.13 Energie und Nachhaltigkeit	42
3.14 Kerntechnik	44
4. Gemeinsam gestalten wir die Zukunft der Energie	46
Zukunftsfähige Lehre	48
Exzellente Forschung	50
Integrative Forschung	54
Impressum	56

Vorwort



Derzeit befindet sich die globale Energiewelt im Umbruch. Die nächsten Stufen der Energiewende stehen an, welche nicht nur Effizienz und Flexibilität erfordern, sondern auch Nachhaltigkeit sicherstellen müssen. Auf der anderen Seite greifen Energietechnologien und Energiekosten mittlerweile tief in bestehende Sozialgefüge und die Wettbewerbsfähigkeit energieintensiver Industriebereiche ein.

Nur eine preiswerte Energieversorgung ist langfristiger Garant für Deutschlands Wohlstand und die Lebensqualität. Auch ist sie Schlüsselkomponente der globalen Herausforderungen. Innovationen in diesen Bereichen sichern Deutschland als Industrienation nicht nur seine Position im globalen Wettbewerb, sondern letztlich auch Arbeitsplätze.

Der Schlüssel hierfür liegt nicht nur in einzelnen Technologien oder deren Zusammenspiel, sondern auch in den damit verbundenen gesellschaftlichen Herausforderungen und den notwendigen Mentalitätswechseln. Um hierfür ganzheitliche Lösungen zu denken, verknüpft das Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP) als ein Integrative Research Institute innerhalb der TUM die notwendigen Disziplinen und Forschungsbereiche und verbindet diese mit regionalen, nationalen und internationalen Partnern.

Wir brauchen hierfür neue Impulse aus der Forschung. Um den dynamischen Entwicklungen unserer Gesellschaft voraus zu sein, beschreiten wir nicht nur in unserer Forschung neue Wege (TUM Agenda 2030). Um hier langfristig erfolgreich zu sein, benötigt es nicht nur Grundlagenforschung auf höchstem Niveau, wie sie beispielsweise im Exzellenzcluster e-conversion erfolgt, sondern auch eine enge Verzahnung mit unternehmerischen Angeboten auf allen Ebenen der universitären Forschung – hierfür unterstützen UnternehmerTUM und die TUM Venture Labs Wissenschaftler:innen und Studierende der TUM bei Ausgründungen.

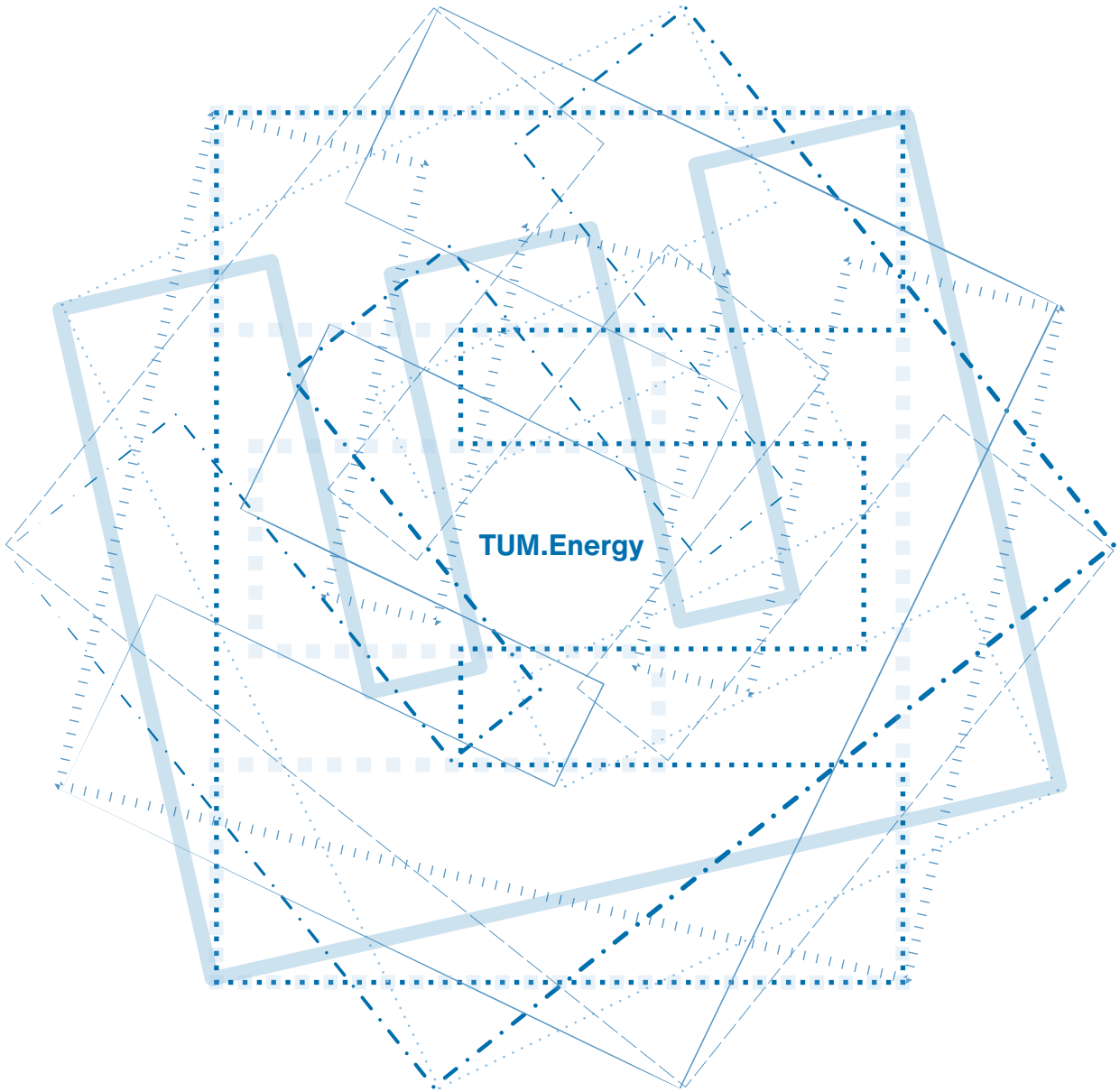
Sprechen Sie uns gerne an und gehen Sie mit uns gemeinsam den Weg zu einer nachhaltigen Energie!

München • Garching • Freising-Weihenstephan • Straubing • Heilbronn • Ottobrunn/Taufkirchen

Ihr

A handwritten signature in blue ink, which reads "Thomas F. Hofmann". The signature is fluid and cursive, written over a white background.

Thomas F. Hofmann
Präsident



Zusammenfassung

An der Technischen Universität München (TUM) forschen über 100 Professor:innen im Rahmen von TUM.Energy in 14 Themenschwerpunkten an der Energieversorgung der Zukunft. Nachhaltige Energieversorgung ist eine der großen Herausforderungen unserer Gesellschaft. Der Profildbereich „TUM.Energy“ ist daher ein wichtiger Teil des Zukunftskonzepts „TUM Agenda 2030“, das im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder umgesetzt wird.

Die Metropolregion München bietet als High-Tech Standort gemeinsam mit der TUM die idealen Voraussetzungen, um hier eine führende Rolle in der Technologieentwicklung einzunehmen – mit nationaler und internationaler Strahlkraft.

Das disziplinenübergreifende Zusammenwirken wird im Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP) gebündelt, welches in den Schwerpunktbereichen „Sustainable Energy Systems“, „Biomufacturing and Process Engineering“ und „4D Materials and Additive Technologies“ multidisziplinär forscht. Dieser einzigartige Ansatz hat das Ziel

- einer bezahlbaren, nachhaltigen und sicheren Energieversorgung, sowohl regional als auch global,
- einer engen Verzahnung wissenschaftlicher Lösungsansätze mit deren großflächigen technischen Umsetzung,
- eines partizipativen Prozesses zur Verbesserung der Technologieakzeptanz und des regulatorischen Rahmens,
- der Implementierung des „Human-Centered Engineering“ in Energiefragen bei Forschung und Lehre,
- einer emissionsfreien und lebenswerten Zukunft, ermöglicht durch interdisziplinäre Forschung im Sinne unserer Exzellenzstrategie.

TUM.Energy baut dabei auf zahlreichen interdisziplinären Großforschungsprojekten auf und integriert Grundlagenforschung und Ingenieurwissenschaften mit ihrem Anwendungsbezug.

TUM.Energy umfasst dabei vierzehn Themenschwerpunkte:

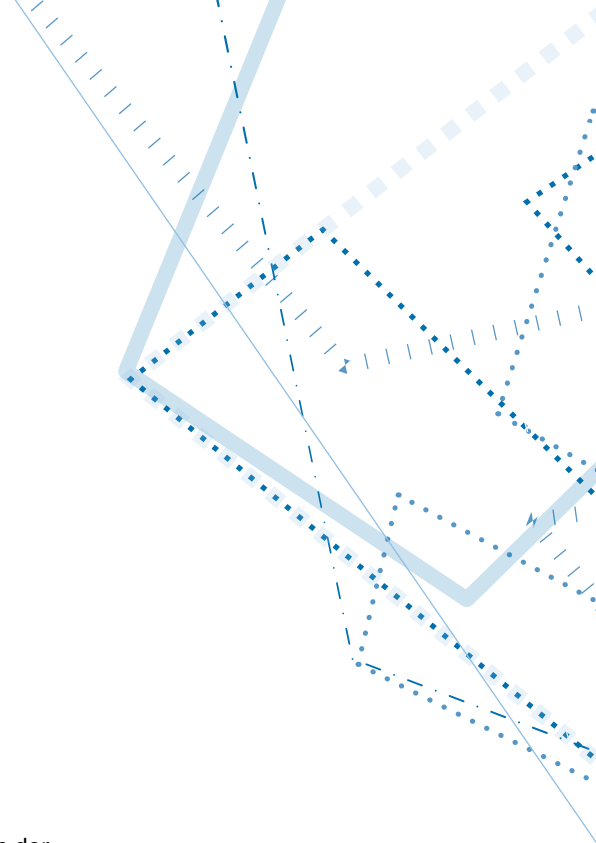
- | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| → Solarenergie | → Elektrisches Energiesystem |
| → Windenergie | → Sektorkopplung |
| → Biomasse | → Energie und Stadt |
| → Wasserkraft | → Energie und Ernährung |
| → Geothermie | → Systemanalyse und Energiemärkte |
| → Batterie | → Energie und Nachhaltigkeit |
| → Wasserstoff und Power-to-X (PtX) | → Kerntechnik |



Motivation

Seit 2010 hat die TUM ihre strategische Ausrichtung im Bereich der Energieforschung erheblich verstärkt und gleichzeitig auf wichtige Bereiche fokussiert. Der Ausbau der erneuerbaren Energien zu Beginn des neuen Jahrhunderts und neue Anwendungstechnologien wie die langsam aufkommende Elektromobilität hatten neue Herausforderungen geschaffen, die auch in der Forschung stärker berücksichtigt werden mussten. Mit dem Reaktorunfall in Fukushima und dem Beschluss zum Ausstieg aus der friedlichen Kernenergie wurde die Dringlichkeit eines Transformationsprozesses insbesondere in Deutschland noch verstärkt. Dabei stand der Wunsch nach mehr Klima- und Ressourcenschutz nicht in Einklang mit dem Ausstieg aus der Kernenergie, sondern hat die Problematik noch weiter verschärft. Auch haben geopolitische Veränderungen unsere Energiepolitik eingeholt und uns gezeigt, dass Resilienz, die Abkehr von fossilen Energieträgern und die Verfügbarkeit alternativer Technologien schnell erreicht werden müssen.

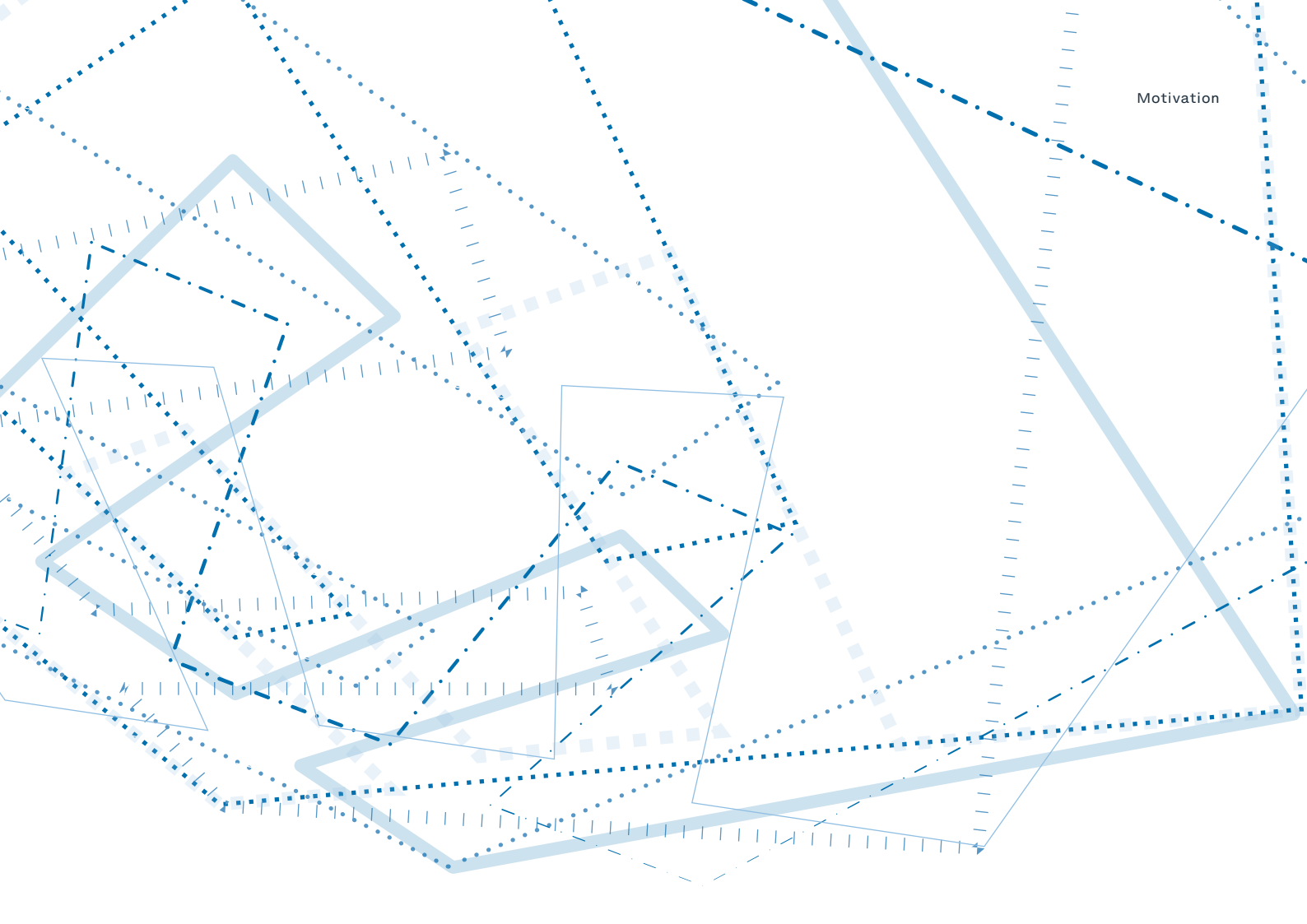
In diesem Kontext hat die TUM in enger Abstimmung mit den bayerischen Ministerien einen langfristigen Plan entwickelt, der in den letzten Jahren umgesetzt werden konnte. In Schlüsselbereichen wie der Elektrochemie konnten neue Professuren (für Elektrochemie, für Elektrische Energiespeichertechnik sowie für Funktionelle Materialien) geschaffen und erfolgreich etabliert werden. Parallel wurden strategische Projekte wie SolTech im Bereich der Solarforschung (vgl. Abschnitt 3.1), die Geothermie-Allianz Bayern (vgl. Abschnitt 3.5) und das Energy Valley Bavaria gemeinsam mit dem Freistaat Bayern initiiert. Im Projekt „Energy Valley Bavaria“ konnten wertvolle Arbeiten für die Transformation des europäischen Stromsystems – weg von fossilen hin zu erneuerbaren Energien – geleistet werden und Wissenschaftler:innen aus Maschinenwesen und Elektrotechnik konnten bereits früh und sehr erfolgreich interdisziplinär kooperieren. Heute hat die Universität diese Wissenschaftler:innen im Department of Energy and Process Engineering der TUM School of Engineering and Design noch näher zusammengebracht. →



International hat das Projekt TUMCREATE in Singapur neue Formen der Mobilität und erneuerbarer Energie vorangetrieben. Ebenso wurde mit dem Master of Science in Power Engineering ein englischsprachiger Master in diesem Bereich an der TUM etabliert. Gerade bei den Fragen der Energieforschung ist die internationale Sicht wesentlich, da keines der Probleme mit nationalen Mitteln allein gelöst werden kann.

Mit dem Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP) ist ein Integrative Research Institute (IRI) entstanden, in dem die Energieforschung School-übergreifend im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Materialien und deren Transformation und der Verfahrenstechnik mit biologischem Schwerpunkt neu gebündelt wird. Das MEP dient als Plattform und Katalysator für den Austausch und die Entwicklung neuer Impulse durch Integration. Mit dem CoSES Labor im Zentrum für Energie und Information, das auch der Standort des MEP ist, wurde ein erstklassiges Labor geschaffen, um alle Fragen zum Thema Smart-Grid und Sektorkopplung zu klären.

Nun sind die Anforderungen an die Energieforschung in den letzten Jahren noch größer geworden. Die dringlichen Forderungen der Klimaforscher nach noch entschiedenerem Handeln verlangen nach noch mehr und noch effizienterer Energieforschung. Dabei entstehen immer mehr Themenkomplexe, wie die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger oder die Dekarbonisierung der Nahrungsmittelproduktion. Die damit verbundenen Herausforderungen sind größer und die Fragestellung komplexer geworden, ermöglichen es der TUM aber auch, ihre Stärke der interdisziplinären Vernetzung noch mehr zur Geltung zu bringen – beispielsweise durch die Kooperation mit der TUM School of Life Sciences und dem TUM Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit.



Vor dem Hintergrund der Vermischung von gesellschaftlichen mit wissenschaftlich-technischen Fragen müssen heute nicht zuletzt auch die politischen und gesellschaftlichen Dimensionen durch das Department of Science, Technology and Society (STS), das Teil der TUM School of Social Sciences and Technology (SOT) ist, noch einmal stärker ins Auge gefasst und in die Energieforschung integriert werden. Die letzten Jahre haben einen neuen Wettbewerb der Systeme hervorgebracht, der die liberalen Demokratien zunehmend in die Defensive drängt – Energiefragen bleiben davon natürlich nicht unberührt. Hier ist ein gesellschaftspolitischer Weckruf mehr als notwendig, denn eine von den Bürger:innen getragene erfolgreiche Energiewende in Europa und den USA könnte ein globales Ausrufezeichen – auch im Sinne von Resilienz und Nachhaltig – setzen.

Mit dieser Broschüre möchten wir Einblicke in die Vielfalt der Energieforschung an der TUM geben und laden Sie ein, die vor uns liegenden Herausforderungen gemeinsam zu meistern. Wir fokussieren dabei technologische, gesellschaftliche und politische Lösungen durch unseren einzigartigen interdisziplinären Ansatz. Gemeinsam mit über 100 Professor:innen an unseren Schools und unseren Departments forschen wir an 14 Themenschwerpunkten rund um TUM.Energy. Forschen Sie mit!



Agenda

TUM.Energy

Vision und Mission

Mit dem konsequenten Ausbau der Integrative Research Institutes entwickelt die TUM ihre Themenschwerpunkte im Zuge der TUM Agenda 2030 weiter. So soll TUM.Energy nun gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft in seinen Kompetenzfeldern im Rahmen einer One-Munich-Strategie ausgebaut werden und international kooperieren. Der Zusammenschluss zum Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP) ermöglicht dabei, Synergien zwischen funktionellen Materialien, der modernen Verfahrenstechnik und der Energieforschung zu nutzen und die fachübergreifende Forschung damit insgesamt auf ein neues Leistungsniveau zu heben.

Strategische Ziele

Um der gesellschaftspolitischen Verantwortung für eine nachhaltige Energieversorgung gerecht zu werden, verfolgt TUM.Energy folgende strategische Ziele:

→ **Vernetzung: regional, national, global.**

Die Vernetzung der Energieforschung muss über die Grenzen der Universität hinaus erfolgen, nicht zuletzt durch enge regionale Kooperationen in München, Bayern und Deutschland. Durch die bestehenden Kooperationen und internationalen Netzwerke arbeitet die TUM im Energiebereich zudem mit renommierten internationalen Partnern auf Spitzenniveau zusammen.

→ **Kooperation: Entwicklung, Anwendung und Produktion.**

Die enge Verzahnung von Grundlagenforschung mit den Ingenieurwissenschaften und der Industrie ist Leitgedanke der TUM – auch in der Energieforschung. So sollen entstehende Innovationen und neue Materialien in Anwendung gebracht werden.

→ **Strategien und Visionen: Forschung für die Zukunft.**

Wir forschen nicht nur an rationalen und nachhaltigen Technologien und Versorgungskonzepten, sondern auch an visionären Zukunftsthemen von globaler Relevanz wie synthetischem Fleisch und Vertical Farming.

→ **Gemeinsam die Energiewende gestalten: innovativ, bürgernah und partizipativ.**

Hierzu vereint unsere interdisziplinäre Energieforschung bereits jetzt Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit und Öffentlichkeitsthemen über unsere Forschungsnetzwerke.

Umsetzungskonzept

Zur Umsetzung der strategischen Ziele bedarf es einer umfassenden Vernetzung aller Beteiligten, sowohl innerhalb der Universität, als auch im nationalen und internationalen Kontext. Aber auch die Nachwuchsförderung und der Bildungsauftrag der TUM sind zentrale Bestandteile unseres Gesamtkonzepts.

1. Forschungsnetzwerk der TUM

Das Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP) verbindet die integrative Materialforschung mit den systemischen und transdisziplinären Herausforderungen der Energieforschung und der Verfahrenstechnik. Als Innovationstreiber vernetzt es Grundlagenforschung mit der Technologieanwendung, insbesondere mit Blick auf die zukünftigen Herausforderungen im Energiebereich und dessen durchgängige Bedeutung für eine zirkuläre Wirtschaft.

Neben der übergeordneten und systemisch-strategischen Perspektive vernetzt das MEP insbesondere auch die Energieforschung an der TUM. Ihm obliegt die Strategieentwicklung zur Umsetzung einer inter- und transdisziplinären Energieforschung durch Anknüpfungen an Departments wie etwa dem Department of Energy and Process Engineering der Ingenieurwissenschaften an der TUM School of Engineering and Design. Die Grundlagenforschung zur Energieumwandlung in den Departments Chemie und Physik ist im Exzellenzcluster e-conversion gebündelt. Die Anpassung der Schwerpunkte und der strategischen Ausrichtung erfolgt durch die Professuren und in enger Kooperation mit der Industrie.

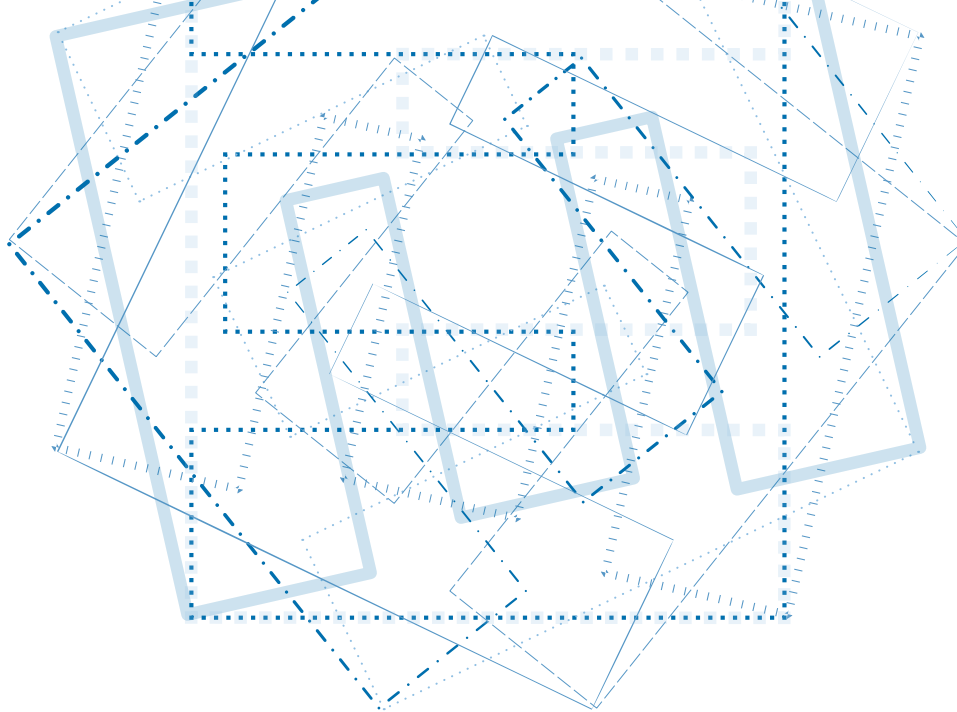
Die Herausforderungen der Energiewende zeigen die Notwendigkeit einer inter- und transdisziplinären Vernetzung von Energieforschung nicht nur innerhalb der Ingenieur- und Naturwissenschaften. Aus diesem Grund ist es Aufgabe des MEP, die Energieforschung mit der TUM School of Social Sciences and Technology (insbesondere dessen Department

of Science, Technology and Society, STS), dem Center for Energy Markets (CEM) sowie dem TUM Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit (TUMCS) zu verknüpfen.

Die enge Kooperation mit Forschungsinstituten vor Ort im Zuge der ONE MUNICH Strategie ist Aufgabe von TUM.Energy, um die Energieforschung der TUM mit den natürlichen Kooperationspartner:innen und um München zu vernetzen. Dies geschieht nicht zuletzt durch Konferenzen, Tagungen und Workshops aus dem Energiebereich.

Die Repräsentanz der TUM in nationalen und internationalen Gremien, Gesellschaften und Organen ist ebenfalls eine zentrale Aufgabe. Diese Vertretungsaufgabe wird durch das MEP wahrgenommen und durch Lehrstühle auf Arbeitsebene ausgefüllt und strategisch genutzt. Durch diese Vertretung auf nationaler und internationaler Ebene kann die TUM maßgeblich bei der Meinungsbildung unterstützen, mit ihrer wissenschaftlichen Kompetenz beraten und gesellschaftliche Akzeptanz fördern.

Um internationale Kooperationen zu ermöglichen, fördert die TUM gezielt Kooperationen mit ihren Partneruniversitäten, bspw. mit der NTU Singapur und dem Imperial College London, u.a. durch die Organisation von inhaltlichen Workshops zur Identifikation gemeinsamer Forschungsfragestellungen, sowie der Vernetzung auf Arbeitsebene. Gemeinsam aufgesetzte Anschubfinanzierungen, wie bspw. durch Seed-Funding, ermöglichen den Beginn langfristiger und strategischer Kooperationen.



→ **Sektorkopplung: CoSES**

Energieforschung muss sich zunächst auf den optimalen Einsatz des vorhandenen Technologiepotentials konzentrieren. Das Combined Smart Energy Systems-Labor (CoSES) der TUM steht für die Erforschung von Ansätzen zur Sektorkopplung und Quartierslösungen sowie für die Implementierung von Kommunikations- und Regelungskonzepten zur Verfügung. Es stellt eine nahtlose und flexible Schnittstelle hin zu Reallaboren dar und unterstützt damit auch die schnelle Kommerzialisierung von Technologien und Innovationen.

→ **Wasserstoff & Co: Power-to-X**

Auf Wasserstoff- und Power-to-X (PtX)-Technologien basiert die langfristige Vision einer globalen Energiewende, deren Weichen bereits jetzt gestellt werden. Mit dem Netzwerk Wasserstoff und Power-to-X am MEP bündelt die TUM hier ihre Kompetenzen und bietet eine projektübergreifende Plattform. Als Schnittstelle zwischen der Grundlagenforschung und der Anwendung finden sich Anknüpfungspunkte mit anderen Profildbereichen der TUM, bspw. im Mobilitätsbereich (TUM.Mobility).

2. Nachwuchsförderung, Entrepreneurship und Technologietransfer

Neben den naturwissenschaftlichen Grundlagen, wird die Inter- und Transdisziplinarität der Energieforschung durch anwendungsnahe Vorlesungen in alle Studiengänge der TUM getragen. Die kreative und interdisziplinäre Herangehensweise an Forschungsfragestellungen aus dem Energiebereich wird durch die Vernetzung über TUM.Energy im Rahmen des MEP und die angebotenen Fort- und Weiterbildungen der Graduiertenschulen erst ermöglicht. Workshops zum Austausch von methodischen Best Practices, die dann wiederum auf andere Disziplinen angewandt werden können, sind hier zentraler Bestandteil von TUM.Energy.

Als unternehmerische Universität hat sich die TUM der Förderung und Umsetzung von Geschäftsideen und Innovationen verschrieben. In den Venture-Labs Sustainability & Circular Economy, ChemSPACE, Built Environment, Aerospace, Food/Agro/Biotech und Mobility spielen die vielfältigen Aspekte von Energie eine zentrale Rolle. Damit ist die TUM bestens gerüstet, um eine ideale Unterstützung für Student:innen und wissenschaftliche Mitarbeiter:innen bei unternehmerischen Ausgründungen zu gewährleisten.

Durch Positionspapiere aus dem Bereich TUM.Energy leistet die TUM ihren Beitrag zum öffentlichen Diskurs. Neben Visionen und Strategien, sollen hier auch Roadmaps platziert werden, um die interessierte Öffentlichkeit aber auch Entscheidungsträger:innen zu informieren. Ein Beispiel hierfür ist der von der Geothermie-Allianz Bayern verfasste Masterplan Geothermie, für den ein interdisziplinäres Forschungsteam der TUM zusammenarbeitete.





Kompetenz- felder an der TUM

3.1 Solarenergie

Bereits heute ist die Solarenergie eine tragende Säule der klimafreundlichen Energieproduktion. Signifikante Fortschritte in dem Forschungsfeld der nächsten Generation von Solarzellen und in der Photokatalyse bieten die Chance, die Anwendungsfelder etablierter siliziumbasierter Solarzellentechnologien zu erweitern und dadurch die Relevanz von Solarstrom weiter zu erhöhen. Durch den Einsatz von neuen Materialien entstehen neuartige Solarzellen oder Photokatalysatoren. So ermöglichen kunststoff-basierte Solarzellen zukünftig bedeutende synergetische Beziehungen mit anderen Schlüsselbereichen der Energiewende, beispielsweise durch ihren Einsatz im Mobilitätsbereich oder in urbaner Umgebung. Hybride Solarmaterialien zur Anwendung in Solarzellen oder Photokatalyse verknüpfen die besten Eigenschaften der anorganischen Welt mit ubiquitären kohlenstoffbasierten Halbleitermaterialien der organischen Welt – mit einem enormen Potential für die zukünftige Energiebereitstellung durch neue Eigenschaften wie mechanische Flexibilität, geringes Gewicht und hohe Variabilität.

In der Solartechnologie erfolgt eine enge Zusammenarbeit verschiedenster Fachbereiche auf Spitzenniveau, beginnend mit Simulation, Modellierung und Erforschung der Solarmaterialien auf molekularer Ebene: für ein besseres Verständnis fundamentaler Prozesse – die Grundlagenforschung hierzu erfolgt im Exzellenzcluster e-conversion und in TUM.Solar –, über die technische Optimierung der Herstellungsprozesse und Verlängerung des Lebenszyklus, bis hin zur Integration der Technologie in innovative Konzepte der grünen und intelligenten Energieproduktion.

Zwei prominente Projekte verdeutlichen das Spektrum der Forschung hierzu an der TUM: Das von der EU finanzierte SECANS-Projekt zielt darauf ab, eine solide wissenschaftliche Basis für Solar-to-Chemical-Geräte durch die Verwendung von Übergangsmetallnitrid-Halbleitern zu schaffen, eine bisher wenig erforschte Materialklasse für Katalyse und Lichtabsorption. Im Projekt „DEPECOR“ (BMBF) entwickeln die TUM, das Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB), die Technische Universität Ilmenau (TU-IL) und das Joint Center of Artificial Photosynthesis (USA) ein Testsystem, das wie ein künstliches Blatt arbeiten soll.



Gegenwärtige und zukünftige wissenschaftliche Fragestellungen sind hier unter anderem:

- Vertiefung des Verständnisses von physikalischen Vorgängen auf molekularer Ebene
- Design und Erprobung neuer vielversprechender Materialien zur Anwendung in Solarzellen oder Photokatalyse
- Verbesserung von Solarzellen oder Photokatalysatoren der nächsten Generation in Bezug auf Energie- und Materialeffizienz, Funktionalität und Langlebigkeit
- Exploration neuer Anwendungsfelder für Solarzellen oder Photokatalysatoren der Zukunft

Ansprechpartner:in	Professur	TUM School
Aliaksandr S. Bandarenka	Physik der Energiewandlung und -speicherung	NAT
David Egger	Theorie der Funktionalen Energiematerialien	NAT
Thomas F. Fässler	Anorganische Chemie mit Schwerpunkt Neue Materialien	NAT
Roland A. Fischer	Anorganische und Metalloganische Chemie	NAT
Alessio Gagliardi	Simulation of Nanosystems for Energy Conversion	CIT
Hubert A. Gasteiger	Technische Elektrochemie	NAT
Jürgen Hauer	Dynamische Spektroskopien	NAT
Ulrich Heiz	Physikalische Chemie	NAT
Corinna R. Hess	Bioanorganische Chemie	NAT
Alexander W. Holleitner	Experimentalphysik - Nanotechnologie und Nanomaterialien	NAT
Katharina Krischer	Chemische Physik fern vom Gleichgewicht	NAT
Fritz E. Kühn	Molekulare Katalyse	NAT
Barbara A.J. Lechner	Functional Nanomaterials	NAT
Peter Müller-Buschbaum	Funktionelle Materialien	NAT
Tom Nilges	Synthese und Charakterisierung innovativer Materialien	NAT
Frank Ortmann	Theoretical Methods in Spectroscopy	NAT
Nicolas Plumeré	Elektrobiotechnologie	TUMCS
Bernhard Rieger	Makromolekulare Chemie	NAT
Jennifer Rupp	Festkörperelektrolyte	NAT
Dongsheng Wen	Thermodynamik	ED
Sören Schöbel-Rutschmann	Landschaftsarchitektur regionaler Freiräume	ED
Ian D. Sharp	Experimentelle Halbleiterphysik	NAT
Martin Stutzmann	Experimental Semiconductor Physics I	NAT

...

(alle TUM Schools → S.56)

3.2

Windenergie

Windenergie spielt eine tragende Rolle bei der Energiewende und es wird prognostiziert, dass sie bis 2050 zwischen einem Viertel und einem Drittel des weltweiten Strombedarfs decken wird. Ungeachtet der jüngsten Fortschritte, die den Erfolg der Windenergie erst ermöglicht haben, gibt es noch viele wissenschaftliche und technologische Herausforderungen zu bewältigen.

Die Forschung an der TUM befasst sich mit allen wichtigen Bereichen der Windenergie, einschließlich der Technologie von Windturbinen und Windparks, der Ökonomie, der Umweltauswirkungen und der politischen Rahmenbedingungen. Dabei kooperiert die TUM in ihrer Forschung mit Universitäten in Europa, Asien und Amerika. Auf nationaler Ebene ist die TUM Teil des WindForS Forschungsclusters, der sich mit Onshore-Windkraft befasst. Ein weiteres Beispiel ist das Projekt MISTRALWIND (Monitoring and Inspection of Structures At Large Wind Turbines), das über eine Laufzeit von drei Jahren eine Methode zur Dauerüberwachung von Windkraftanlagen entwickelt hat.

Moderne Windturbinen sind die größten rotierenden Maschinen der Welt, deren Konstruktion und Betrieb ein tiefes Verständnis und die Fähigkeit erfordern, Wechselwirkungen turbulenter Strömungen mit flexiblen Strukturen über ihre gesamte Lebensdauer hinweg zu simulieren. Fertigung, Logistik und Wartung dieser gigantischen Maschinen stellen zusätzliche, einzigartige Herausforderungen. Die TUM begegnet diesen Herausforderungen mit einem multidisziplinären Ansatz und durch die Zusammenarbeit von Fachleuten aus den verschiedensten Bereichen.

Einige der drängenderen Herausforderungen der Windenergie werden durch die folgenden Forschungsfragen erfasst:

- Welche Simulationswerkzeuge können die Analyse von Windenergiesystemen über Skalenbereiche und Anwendungen hinweg unterstützen?
- Wie können diese Werkzeuge mit der erforderlichen Genauigkeit validiert werden?



- Wie kann die Digitalisierung Entwurf, Wartung und Betrieb von Windturbinen und Parks verbessern?
- Welche Technologien können das enorme Potenzial von Offshore-Standorten, auch in tiefen Gewässern, zu wettbewerbsfähigen Preisen erschließen?
- Wie kann die Windenergie in ein künftiges Energiesystem integriert werden, um zu Stabilität, Robustheit und Stromqualität bei schwankender Marktnachfrage und schwankenden Preisen beizutragen?
- Wie können die Auswirkungen auf Umwelt und Bevölkerung reduziert und die Wiederverwertbarkeit und Recyclingfähigkeit erhöht werden?
- Welche sozialen und politischen Faktoren beeinflussen den Ausbau des Windsektors und dessen soziale Akzeptanz?

Ansprechpartner:in	Professur	TUM School
Kai-Uwe Bletzinger	Statik	ED
Carlo L. Bottasso	Professur für Windenergie	ED
Christian Große	Zerstörungsfreie Prüfung	ED
Thomas Hamacher	Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme	ED
Hans-Jakob Kaltenbach	Aerodynamik und Strömungsmechanik	ED
Daniel J. Rixen	Angewandte Mechanik	ED
Sören Schöbel-Rutschmann	Landschaftsarchitektur regionaler Freiräume	ED
Miranda Schreurs	Umwelt- und Klimapolitik	SO

...

3.3 Biomasse

Biomasse ist der flexible Grundstoff für biobasierte und nachhaltige Wirtschaftszweige. Als einziger erneuerbarer Kohlenstoffspeicher bietet sie ein vielfältiges Nutzungspotential: Wärme, Strom, Kraftstoffe, chemische Grundstoffe, Polymere, Baustoffe, Heilmittel und Arzneimittel werden aus Biomasse hergestellt, neben unserer vorrangigen Nahrungsmittelproduktion. Aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Biomasse sind nahezu alle Forschungsbereiche der TUM aktiv in die Erforschung von Biomasse und ihrer Nutzung eingebunden, wobei die Forschung zu energiebezogenen Themen vorwiegend an den Standorten Garching und am TUM Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit stattfindet. Mit den aktuellen Bioökonomie-Strategien wird vorrangig die stoffliche Nutzung erforscht. Die Weiterentwicklung der energetischen Nutzung der Biomasse ist daher zukünftig vor allem auf Basis der dabei anfallenden Rest- und Abfallstoffe zu sehen. Zukunftsweisende Entwicklungen an der TUM für die energetische Biomassenutzung sind beispielsweise die vernetzte Nutzung von Biomassen und des dabei anfallenden CO₂.

Im Rahmen des von den Lehrstühlen Energiesysteme (TUM School of Engineering and Design) und Regenerative Energiesysteme (TUM Campus Straubing) gemeinsam entwickelten und bearbeiteten Projektes „BioCore“ wird ein neuer technologischer Ansatz zur Biogasnutzung auf Basis einer Kombination von Hochtemperaturbrennstoffzellen und -elektrolyse entwickelt. Großer Vorteil des Biogases: Es stellt eine zeitlich unabhängige, aber regelbare erneuerbare Energiequelle dar. Dieses Konzept ermöglicht im Vergleich zur aktuellen Technik die hocheffiziente Bereitstellung von elektrischem Strom und Methangas.

Bei großen Holzverarbeitenden Prozessen – etwa in Papier- und Zellstofffabriken – fallen bei der thermischen Nutzung von Biomasse zur Herstellung von Strom- und Prozesswärme ebenfalls gewaltige Mengen an CO₂ an. Im Projekt „ReGas-Ferm 2“ wird an den Lehrstühlen Energiesysteme und Bioverfahrenstechnik (beide am Department für Maschinenwesen) die Kombination klassischer thermochemischer Verfahren mit biologischen Fermentationsprozessen untersucht. Das restliche anfallende CO₂ und die Niedertemperaturwärme können zukünftig an potentiellen Standorten für industrielle landwirtschaftliche Anbaumethoden bis hin zur Algenzucht verwendet werden.



Ansprechpartner:in	Professur	TUM School
Thomas Brück	Synthetische Biotechnologie	NAT
Jakob Burger	Chemische und Thermische Verfahrenstechnik	TUMCS
Matthias Gaderer	Regenerative Energiesysteme	TUMCS
Thomas Hamacher	Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme	ED
Kai-Olaf M. Hinrichsen	Technische Chemie I	NAT
Malte Jaensch	Nachhaltige Mobile Antriebssysteme	ED
Harald Klein	Anlagen- und Prozesstechnik	ED
Wolfgang Liebl	Mikrobiologie	LS
Johannes Sauer	Produktions- und Ressourcenökonomie	MGT
Volker Sieber	Chemie Biogener Rohstoffe	TUMCS
Hartmut Spliethoff	Energiesysteme	ED
Dirk Weuster-Botz)	Bioverfahrenstechnik	ED

...

3.4

Wasserkraft

Um die Energiewende erfolgreich voranzutreiben, muss Elektrizität vollständig und nachhaltig aus erneuerbaren Energien gewonnen werden. Insbesondere der Wasserkraft fällt hierbei eine bedeutende Rolle zu, da diese in weiten Teilen grundlastfähig und regelbar ist. Da die Wasserkraft Schwankungen zwischen Produktion und Verbrauch flexibel ausgleichen kann, ist sie zentrales Element unserer Energiewende. Die fluktuierende Stromerzeugung aus anderen erneuerbaren Energien, wie Wind und Solar, kann besser integriert werden. Der TUM-Ansatz verbindet dabei Sozio-Ökonomie mit Ökologie und Nachhaltigkeit, um die Wasserkraftnutzung als erneuerbare Energie weiter auszubauen und die Energiewende damit kontinuierlich zu unterstützen.

Konkret beschäftigt sich die Wasserkraft-Forschung an der TUM mit der nachhaltigen Nutzung von Wasserkraft sowie der Verbesserung der Umweltverträglichkeit und der Effizienz. Zahlreiche Wasserkraftwerke in Deutschland, aber auch weltweit, wurden vor Jahrzehnten errichtet und erreichen nun ihr Lebensende. Dies ermöglicht, das Gesamtsystem Fluss im Spannungsfeld Energiewirtschaft – Umwelt – Gesellschaft neu zu betrachten und damit für die Zukunft zu rüsten. Neben dem Erhalt der Wasserkraft fokussiert

sich die TUM auf die Erschließung neuer, bisher nicht betrachteter Potentiale für Wasserkraft. So koordiniert die TUM aktuell das EU-Projekt „Hydro4U“ (Laufzeit 2021–2026) und erforscht darin den Nutzen von Kleinwasserkraft als nachhaltige Lösung für dezentrale Energieversorgung am Beispiel für Zentralasien – eine Region mit immenssem ungenutzten Wasserkraftpotential. Dabei wird das an der TUM entwickelte Schachtkraftwerk weiterentwickelt und unter sozio-ökonomischen Gesichtspunkten optimiert.

Die Forschung der TUM basiert insbesondere auf drei Bausteinen:

- **Numerische Modellierung:** Unser Anspruch ist dabei der Einsatz und die Weiterentwicklung neuer und innovativer Modellierungswerkzeuge, um die unmittelbare Auswirkung der Wasserkraft auf die Umwelt kontinuierlich zu minimieren. Insbesondere im Bereich der Hydromorphologie und beim Feststofftransport gibt es nach wie vor großen Forschungsbedarf. Integrative Modelle, wie Habitats- oder Wasserqualitätsmodelle kommen dabei zum Einsatz.



- **Physikalische Modellierung:** Mit dem Oskar-von-Miller-Versuchslabor in Oberrach hat die TUM eine einzigartige Versuchsanlage, die es erlaubt, ganzheitliche und großskalige Modellversuche durchzuführen, sowohl für Grundlagenforschung als auch zur Beantwortung aktueller und konkreter wasserbaulicher Fragestellungen.
- **Feldarbeit:** Digitale Werkzeuge wie Drohnen und Laserscanner erlauben es, umfangreiche Datenmengen sowohl zum Prozessverständnis als auch als Baustein für die Modellierung zu erheben. Hier werden neue Werkzeuge entwickelt, um den Zustand der Gewässer besser und ressourceneffizienter zu erforschen.

Die gewonnenen Erkenntnisse und Forschungsdaten aus den drei Bausteinen werden in weiteren Arbeitsschritten und mittels künstlicher Intelligenz zusammengeführt. Die Erstellung von digitalen Zwillingen von Gewässern und Bauwerken unterstützen somit die nachhaltige Planung und Durchführung wasserbaulicher Maßnahmen.

Ansprechpartner:in	Professur für	TUM School
Roberto Cudmani	Bodenmechanik, Felsmechanik, Grundbau und Tunnelbau	ED
Jürgen Geist	Aquatische Systembiologie	LS
Thomas Hamacher	Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme	ED
Hans-Georg Herzog	Energiewandlungstechnik	ED
Stephan Pauleit	Strategie und Management der Landschaftsentwicklung	LS
Nils Rüther	Wasserbau und Wasserwirtschaft	ED
Johannes Sauer	Produktions- und Ressourcenökonomie	MGT
...		

3.5 Geothermie

Die Geothermie nutzt die in der Erde gespeicherte und durch radioaktive Zerfälle freiwerdende Wärmeenergie und hat das Potenzial zum integralen Bestandteil der Wärmeenergie zu werden. Die Nutzung setzt dabei forschungsseitig einen ganzheitlichen Ansatz voraus. Geothermie verbindet disziplinübergreifend Untergrundkenntnisse mit Anlagentechnik und dem eingehenden Verständnis von Energiesystemen. Ziel der TUM ist es, die Forschung der verschiedenen Bereiche zu bündeln, damit die geothermische Ressource sowohl sicher als auch langfristig und effizient genutzt werden kann.

An der TUM arbeiten innerhalb des Forschungsverbundes „Geothermie-Allianz Bayern“ Geolog:innen und Ingenieur:innen, Planende und Behörden eng zusammen. Der Forschungsverbund ist europaweit Vorreiter, nicht zuletzt, weil die lokalen Betreiber von geothermischen Anlagen aktiv mitwirken und so eine schnelle Umsetzung der Forschungsideen ermöglichen können. Im Fokus stehen dabei unter anderem:

- thermodynamische Optimierung von Anlagenkomponenten und Prozessen,
- sichere und nachhaltige Bewirtschaftung der tiefengeothermischen Ressource,
- sichere und ökonomische Durchführung von Tiefbohrungen,
- Erforschung innovativer Technologien zur Nutzung unterschiedlicher Reservoirtypen.

Auch werden maschinelle Lernverfahren eingesetzt, welche die zukünftige Entwicklung moderner Frühwarnsysteme ermöglichen, indem Betriebsparameter und Aufzeichnungen über seismische Ereignisse gekoppelt werden. Die umfassende Datenanalyse von Tiefbohrungen und geophysikalischen Messungen ermöglicht es zudem, zukünftige Bohrungen sicherer und kosteneffektiver vorzunehmen. Mit Hilfe von Wärmebergbaumodellen lassen sich Prognosetools über die wirtschaftliche Nutzbarkeit erstellen. Algorithmen ermöglichen, die Nutzung der Ressource techno-ökonomisch zu optimieren und somit gleichzeitig das CO₂-Einsparpotential zu analysieren.

Beispielsweise werden innovative Methoden für mechanische Analysen auf Basis bildgebender Daten zur Charakterisierung und Bestimmung des mechanischen Verhaltens von Bohrkernen eingesetzt. Mit der Ausgründung directFEM werden diese Dienstleistungen zukünftig auch kommerziell verfügbar. Außerdem wird beispielsweise im Projekt GeoBOOST zur Förderung von Erdwärmepumpen für kostengünstiges und effizientes Heizen und Kühlen mit erneuerbaren Energien in Gebäuden geforscht. Im Verbundvorhaben „GFK-Monitor“ mit Helmholtz-GFZ, Fraunhofer-IEG, den Stadtwerken München und der Georg-August-Universität Göttingen dagegen ist die Entwicklung eines ganzheitlichen Monitorings mit Unterstützung der Glasfaserkabeltechnologie und Tracertechnik zur Verbesserung der Systemintegrität von Geothermieanlagen das Ziel.



Ansprechpartner:in	Professur	TUM School
André Borrmann	Computergestützte Modellierung und Simulation	ED
Roberto Cudmani	Bodenmechanik, Felsmechanik, Grundbau und Tunnelbau	ED
Michael C. Drews	Geothermal Technologies	ED
Florian Einsiedl	Hydrogeologie	ED
Christian Große	Zerstörungsfreie Prüfung	ED
Stefan Günemann	Data Analytics and Machine Learning	CIT
Thomas Hamacher	Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme	ED
Gerhard Müller	Baumechanik	ED
Hartmut Spliethoff	Energiesysteme	ED
Kuroschi Thuro	Ingenieurgeologie	ED

...

3.6 Batterie

Die enormen Anstrengungen im Bereich der Energie- und Mobilitätswende zeigen, dass die als Energiespeicher eingesetzten Batterien eine Schlüsselrolle spielen. Die Batterieforschung an der TUM deckt die gesamte Wertschöpfungskette ab, beginnend bei der Materialforschung, über die Charakterisierung und Modellierung bis hin zur Zellproduktion. Darüber hinaus gibt es zahlreiche Aktivitäten zur Integration von Speichersystemen in Fahrzeugen und in das Energienetz.

Die interdisziplinäre Forschung findet in sehr erfolgreicher Zusammenarbeit zwischen den Naturwissenschaften und den Ingenieurwissenschaften statt. Die im Themenbereich Batterie arbeitenden Gruppen haben innerhalb der TUM das Netzwerk TUM.Battery aufgebaut.

Batteriespeicher sind ein interdisziplinäres Forschungsthema, da neben grundlegenden Materialfragen, die beispielsweise intensiv im Exzellenzcluster e-conversion erforscht werden, die kostengünstige und massentaugliche Produktion, die Integration von Speichern in die jeweilige Anwendung sowie der optimale Betrieb ineinandergreifen. Neben Detailbetrachtungen ist demnach ganzheitliche Forschung von großer Bedeutung.

Im Mittelpunkt steht neben der Erforschung neuer Materialien, wie z. B. Festkörperelektrolyte, die Charakterisierung und Modellierung von Materialien, Komponenten und Batteriezellen. Mittels weiterentwickelter Charakterisierungsmethoden, wie z. B. Messungen mittels Neutronen am Forschungsreaktor München II (FRM II) der TUM, werden Materialeigenschaften bestimmt und mittels Simulationsrechnungen und Modellzellen auf anwendungsreale Zellformate skaliert und deren Eignung erprobt.

Mit der Forschungsproduktionslinie für Lithium-Ionen-Zellen werden alle Produktionsschritte für diese Zellen abgebildet und neben einzelnen Prozessen, wie z. B. der Elektrolyt-befüllung, können auch Wechselwirkungen verschiedener Prozessschritte und die Optimierung der gesamten Prozesskette erforscht werden. Die Forschungsproduktionslinie steht einer Vielzahl von Projekten zur Verfügung, wie beispielsweise dem Clusterprojekt ExZellTUM.

Zu den wichtigsten Forschungsfeldern an der TUM gehören:

- Entwicklung und Untersuchung neuer Materialien für Batterien
- Elektrochemische und physikalische Charakterisierung von Materialien und Zellen

- Erarbeitung und Entwicklung neuartiger Messmethoden zur Material- und Zellcharakterisierung
- Untersuchung und Verbesserung der Prozesse zur Zellherstellung
- Modellierung und Simulation von Materialien, Elektroden, Zellen und Batteriesystemen
- Analyse, Beschreibung und Verbesserung der Sicherheit von Batterien
- Untersuchungen zur Lebensdauer von Batterien
- Integration von Batterien in Fahrzeuge und in stationäre Anwendungen
- Optimierung von Betriebsstrategien für Energiespeicher

Nicht zuletzt durch die innovativen Forschungsthemen und die intensive Kooperation gab es in den vergangenen Jahren eine Vielzahl an erfolgreichen Firmenausgründungen im Bereich der Batteriemesstechnik, der Diagnostik und der Batteriesysteme.

Ansprechpartner:in	Professur	TUM School
Aliaksandr S. Bandarenka	Physik der Energiewandlung und -speicherung	NAT
Rüdiger Daub	Produktionstechnik und Energiespeichersysteme	ED
David Egger	Theorie der Funktionalen Energiematerialien	NAT
Thomas F. Fässler	Anorganische Chemie mit Schwerpunkt Neue Materialien	NAT
Gunther Friedl	Controlling	MGT
Hubert A. Gasteiger	Technische Elektrochemie	NAT
Kai-Olaf M. Hinrichsen	Technische Chemie I	NAT
Andreas Jossen	Elektrische Energiespeichertechnik	ED
Markus Lienkamp	Fahrzeugtechnik	ED
Peter Müller-Buschbaum	Funktionelle Materialien	NAT
Tom Nilges	Synthese und Charakterisierung innovativer Materialien	NAT
Bernhard Rieger	Makromolekulare Chemie	NAT
Jennifer Rupp	Festkörperelektrolyte	NAT
Wolfgang A. Wall	Numerische Mechanik	ED
Isabell M. Welp	Strategie und Organisation	MGT
Michael F. Zäh	Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik	ED

...

3.7 Wasserstoff und Power to X (PtX)

Durch den Ausbau erneuerbarer Energien im Rahmen der deutschen Energiewende werden nachhaltige Wasserstoff- und Power-to-X-Technologien (PtX) eine zunehmend wichtige und zentrale Rolle im Energiesystem der Zukunft spielen. Zentrales Ziel von PtX-Systemen ist dabei die Herstellung von verschiedenen gasförmigen sowie flüssigen Energieträgern („X“) aus regenerativ erzeugtem Strom („Power“). Neben Wasserstoff und synthetischem Erdgas umfassen diese Energieträger beispielsweise auch synthetische Kraftstoffe wie OME (Oxymethylenether) oder Grundchemikalien wie Methanol.

Im Rahmen des von der Munich School of Engineering (MSE; jetzt Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering, MEP) initiierten Forschungsnetzwerks TUM.Hydrogen and PtX sowie im Exzellenzcluster e-conversion arbeitet eine Vielzahl an Forschungsgruppen interdisziplinär, fakultätsübergreifend und zukunftsorientiert an der Weiterentwicklung verschiedener Technologien und deren Grundlagen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von PtX-Systemen. Zu diesen gehören:

- Bereitstellung von Ressourcen (Stoff- und Energieströme), z. B. Biomasse zur Erzeugung nachhaltiger Synthesegase oder zur CO₂-Bereitstellung,
- Erzeugung von Wasserstoff durch effiziente Elektrolyse-Technologien, z. B. Proton-Austausch-Membran-Elektrolyse und Hochtemperatur-Elektrolyse,
- Konversion der Eduktströme, z. B. stoffliche Umwandlung von Wasserstoff und CO₂/CO in höhere Energieträger,
- Nutzung von PtX-Produkten, z. B. bei motorischen Anwendungen, elektrochemischer Rückverstromung oder in der Chemie- und Prozessindustrie,
- Systemstudien zur Prognose zukünftiger Entwicklungen, z. B. Abschätzung von Marktpotenzialen sowie Analyse ökologischer und volkswirtschaftlicher Auswirkungen.

Die Kooperationspartner sind an einer Vielzahl von nationalen und internationalen Forschungsvorhaben beteiligt, z. B. im Zuge der Wasserstoffstrategie des Bundes und der EU Horizon Europe Initiative. Zudem unterstützt das MEP über TUM.Hydrogen die Vernetzung mit Partnern außerhalb der TUM, die ebenfalls im Bereich PtX erfolgreich forschen, wie beispielsweise mit dem Imperial College London. Das Zukunftslabor „REDEFINE Hydrogen Economy“, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, ermöglicht der TUM die internationale Vernetzung mit Spitzenforschern aus 13 Ländern. Die TUM ist gemeinsam mit der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) am Deutschen Wasserstoff-Technologie-Anwenderzentrum (WTAZ) beteiligt, einem von vier Innovationszentren in Deutschland, welches sich auf Wasserstofftanktechnik und Wasserstoff-Kryo-Prozesstechnik konzentriert.



Ansprechpartner:in	Professur	TUM School
Nikolaus A. Adams	Aerodynamik und Strömungsmechanik	ED
Carlo L. Bottasso	Windenergie	ED
Thomas Brück	Synthetische Biotechnologie	NAT
Jakob Burger	Chemische und Thermische Verfahrenstechnik	TUMCS
Jörg Drewes	Siedlungswasserwirtschaft	ED
Thomas F. Fässler	Anorganische Chemie mit Schwerpunkt Neue Materialien	NAT
Gunther Friedl	Controlling	MGT
Hubert A. Gasteiger	Technische Elektrochemie	NAT
Thomas Hamacher	Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme	ED
Kai-Olaf M. Hinrichsen	Technische Chemie I	NAT
Malte Jaensch	Nachhaltige Mobile Antriebssysteme	ED
Agnes Jocher	Sustainable Future Mobility	ED
Andreas Jossen	Elektrische Energiespeichertechnik	ED
Harald Klein	Anlagen- und Prozesstechnik	ED
Tom Nilges	Synthese und Charakterisierung innovativer Materialien	NAT
Sebastian Pfotenhauer	Innovationsforschung	SO
Nicolas Plumeré	Elektrobiotechnologie	TUMCS
Wolfgang Polifke	Thermofluidynamik Wolfgang Polifke	ED
Volker Sieber	Chemie Biogener Rohstoffe Volker Sieber	TUMCS
Hartmut Spliethoff	Energiesysteme Hartmut Spliethoff	ED
Isabell M. Welpé	Strategie und Organisation	MGT
Dirk Weuster-Botz	Bioverfahrenstechnik	ED

...

3.8

Elektrisches Energiesystem

Die TUM hat in der Vergangenheit große Verbundprojekte wie das „Kraftwerke des 21. Jahrhunderts“ (KW 21) und das „Energy Valley Bavaria“-Projekt durchgeführt, um die Zukunft des elektrischen Energiesystems zu gestalten. Zentrale Forschungsfragestellungen waren immer die Zukunft der konventionellen Kraftwerkstechnik und das Zusammenspiel aus erneuerbaren und konventionellen Systemen im europäischen Kontext. Diese gemeinsamen Arbeiten wurden durch viele Einzelarbeiten u.a. im Bereich der Hochspannungstechnik und der Leistungselektronik ergänzt. Ein wichtiges Thema war dabei auch immer die aufkommende Elektromobilität, die insbesondere bei TUMCREATE in Singapur intensiv bearbeitet wurde. So konnte die Forschung der TUM weiter internationalisiert werden.

Der dringliche Wunsch nach einer sehr schnellen Transformation des Energiesystems beschleunigt jetzt all diese Arbeiten und es kommen neue Herausforderungen hinzu:

Waren bisher die großen Energieerzeuger in unmittelbarer Nähe zu den großen Verbrauchsregionen zu finden, so sind heute zwei Trends zu erkennen: Einerseits eine Dezentralisierung der Energieversorgung und andererseits die Notwendig-

keit, elektrische Energie von den windigen Küsten, den wasserreichen Bergen und den sonnigen Wüstenregionen über große Strecken in die Abnahmezentren zu transportieren. Gleichzeitig ändern sich die Anforderungen an das Netz aufgrund einer Vielzahl von Parametern: veränderte Spannungsformen, Integration von Hochspannungsgleichstromstrecken, Wegfall rotierender Massen, Umkehr der strengen unidirektionalen Lastflüsse, steigender Verkabelungsgrad, Sektorkopplung und die weitreichende Elektrifizierung der beteiligten Sektoren (beispielsweise des Verkehrs) sowie eine Vielzahl weiterer Aspekte. Dies hat Auswirkungen sowohl auf die Netzführung und den Netzbetrieb selbst, aber auch auf die im Netz eingesetzten Betriebsmittel. Die Leitfragen für das Energieversorgungsnetz der Zukunft sind:

- Wie sehen moderne, kompakte, nachhaltige und sichere Betriebsmittel für das Netz der Zukunft aus?
- Wie können die neuen Anforderungen in den Netzbetrieb integriert werden und ein zuverlässiger Betrieb sichergestellt werden?
- Wie kann elektrische Energie effizient genutzt, d.h. in der benötigten Energieform bereitgestellt, aber auch zwischengespeichert werden?



Ein starkes und flexibles elektrisches Energiesystem bildet das Rückgrat unserer modernen Gesellschaft, die auf eine nachhaltige und sichere Versorgung mit elektrischer Energie angewiesen ist. Die TUM deckt dabei die Energiesystemforschung in all ihren Dimensionen ab: Sowohl autarke Inselsysteme (Beispielprojekt: INZELL) als auch das elektrische Gesamtsystem von der elektrischen Infrastruktur bis hin zu den Energiewandlungstechnologien und dem Endenergiesektor (Beispielprojekt: Energy Valley Bavaria).

Ansprechpartner	Professur für	TUM School
Thomas Hamacher	Professur für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme	ED
Christoph Goebel	Professur für Energiemanagement-Technologien	ED
Hans-Georg Herzog	Professur für Energiewandlungstechnik	ED
Andreas Jossen	Professur für Elektrische Energiespeichertechnik	ED

...

3.9 Sektor- kopplung



Die Kombination von und Synergien mit verschiedenen Energieträgern war immer schon ein zentrales Forschungsthema an der TUM. Der Fokus lag lange auf der gleichzeitigen Erzeugung von Strom und Wärme, der sogenannten Kraft-Wärme-Kopplung. Hier wurden Konzepte in allen Größenklassen, vom Großkraftwerk bis hin zur kleinen Hausanlage, untersucht. Diese Arbeiten konzentrieren sich heute zunehmend auf das Thema Biomasse, wie es beispielsweise in Garching und Straubing bearbeitet wird.

Der neuen Sektorkopplung, d. h. der Vernetzung der Endenergiesektoren, kommt bei der Flexibilisierung des Energiesystems von heute eine entscheidende Bedeutung zur erfolgreichen Integration fluktuierender, erneuerbarer Energiequellen zu. Nicht zuletzt aufgrund der Vielzahl an zur Verfügung stehenden Technologieoptionen auf Primär- und Endenergieseite – wie Elektrolyse, Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmepumpen und E-Mobilität – hat das Thema in den vergangenen Jahren immens an Bedeutung gewonnen.

Der zentrale Aspekt der Sektorkopplung ist die Digitalisierung, welche den optimalen Einsatz von Technologien und die optimale Nutzung bestehender Infrastruktur, wie Transport-

netze und Speichertechnologien, ermöglicht. Die Digitalisierung erlaubt dabei, zeitlich hochaufgelöst den Betriebszustand der Infrastruktur zu erfassen, was durch Kombination mit entsprechenden Prognosealgorithmen die Flexibilisierung der Verbraucher ermöglicht. Neue Ansätze durch künstliche Intelligenz und mathematische Optimierungsmethoden spielen eine zentrale Rolle bei der Entwicklung intelligenter Lösungen, um so das volle Flexibilisierungspotential zu erschließen.

Alle Elemente der zukünftigen Energiesysteme – Integration erneuerbarer Energien, Digitalisierung, Regelungstechnik und Marktmechanismen – bedürfen experimenteller Umsetzung im Labor, um deren Nutzen und Eignung unter realitätsnahen Bedingungen zu beweisen. Hierfür betreibt die TUM das Microgrid-Labor Combined Smart Energy Systems (CoSES), um der Verwendung zukunftsweisender Technologien den Weg zu bereiten. Hier konnte der Forschungsverbund Energie – Sektorkopplung und Micro-Grids“ (STROM) erfolgreich initiiert werden – ein von der Bayerischen Forschungstiftung gefördertes Kooperationsprojekt mit ausgewählten Hochschulen für Angewandte Wissenschaften und unterstützt durch 26 Industriepartner.



Ansprechpartner:in	Professur	TUM School
Gunther Friedl	Controlling	MGT
Thomas Hamacher	Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme	ED
Sandra Hirche	Informationstechnische Regelung	CIT
Svetlana Ikonnikova	Ressourcenökonomie	MGT
Andreas Jossen	Elektrische Energiespeichertechnik	ED
Wolfgang Kellerer	Kommunikationsnetze	CIT
Miranda Schreurs	Umwelt- und Klimapolitik	SO
Sebastian Schwenen	Energiemärkte	MGT
Hartmut Spliethoff	Energiesysteme	ED
Sebastian Steinhorst	Embedded Systems and Internet of Things	CIT
Rolf Witzmann	Elektrische Energieversorgungsnetze	ED
David Wozabal	Investment, Finance and Risk Management in Energy Markets	MGT

...



3.10 Energie und Stadt

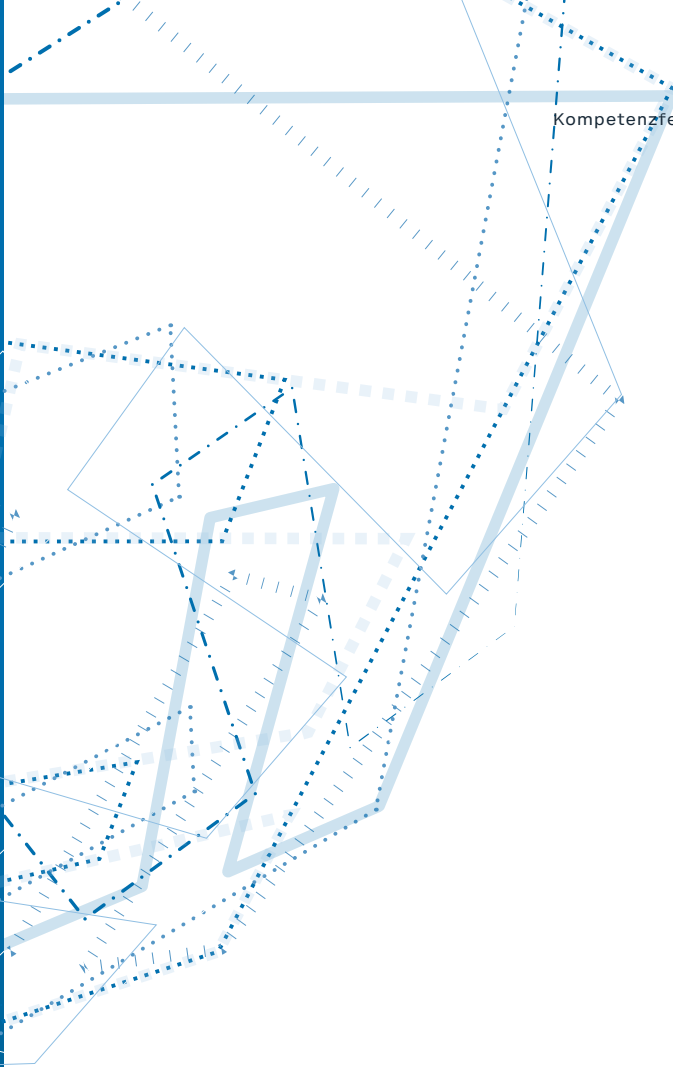
Vor dem Hintergrund der enormen Bedeutung des energieeffizienten und nachhaltigen Bauens für Gesellschaft und Umwelt steht die Entwicklung ganzheitlicher Lösungsansätze, die soziokulturelle, ökonomische und ökologische Aspekte gleichermaßen berücksichtigen, im Mittelpunkt der Arbeit.

Neben der Minimierung von Treibhausgasemissionen zum Schutz des Klimas durch eine umfassende Energieeffizienzsteigerung und den grundlegenden Einsatz regenerativer Energiesysteme sowie nachwachsender Baustoffe, ist die Umsetzung geschlossener Stoffkreisläufe in der Stadt ein weiterer Baustein zur Realisierung eines klimaneutralen Gebäudebestands. In diesem Kontext wurde im EU Projekt „EERAdata“ gemeinsam mit anderen Partnern an Entscheidungshilfen für die Energieeffizienz im Gebäudebestand geforscht.

Darüber hinaus ist ein weiteres Ziel der Arbeit die Anpassung der gebauten Umwelt an den fortschreitenden Klima-

wandel. Dessen Folgen, wie Trockenheit, Hitze und Starkregen wirken sich aufgrund hochverdichteter Bauweisen und stark versiegelter Freiräume besonders stark in der Stadt aus, und führen zunehmend zu einer großen gesundheitlichen und ökonomischen Belastung der städtischen Bevölkerung. Dies konnte beispielsweise im Verbundprojekt „Grüne Stadt der Zukunft – klimaresiliente Quartiere in einer wachsenden Stadt“ gemeinsam mit der Stadt München und weiteren Partnern untersucht werden.

Die dringende, grundlegende Anpassung von Städten an den Klimawandel und die damit verbundene Verbesserung des Stadtklimas erfordern eine interdisziplinär und integriert ausgerichtete Denk- und Arbeitsweise, bei der zentrale Aspekte, wie Energie, Mobilität, Wasser, Grüne Infrastruktur und Gebäude vor dem Hintergrund der gesellschaftlichen Bedürfnisse und den Belastbarkeitsgrenzen unserer Biosphäre gemeinsam betrachtet werden. Hierbei spielt die Untersuchung von Wechselwirkungen, wie Konflikten und Synergieeffekten, eine besonders große Rolle.



Zu den Arbeitsfeldern gehören:

- Energieeffizienz und Einsatz erneuerbarer Energien und Werkstoffe,
- energetische und ökologische Gebäudesimulation und Optimierung großer Gebäudebestände,
- Gebäudemonitoring (Nutzerverhalten, thermischer Komfort, Produktivität),
- Lebenszyklusanalysen/Ökobilanzierungen,
- sozioökonomische Analysen,
- Kreislaufwirtschaft/Ressourceneffizienz,
- nachhaltige Quartiersentwicklung,
- Grüne Infrastruktur,
- Stadtplanung zur erhöhten Resilienz gegen Hitze und Starkregen,
- digitale Modelle der bebauten Umwelt und Versorgungsinfrastrukturen für gekoppelte Simulationen und zur disziplinübergreifenden Informationsintegration.

Ansprechpartner:in	Professur	TUM School
Thomas Auer	Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen	ED
Markus Disse	Hydrologie und Flussgebietsmanagement	ED
Magnus Fröhling	Circular Economy	TUMCS
Thomas Hamacher	Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme	ED
Thomas H. Kolbe	Geoinformatik	ED
Werner Lang	Energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen	ED
Ferdinand Ludwig	Green Technologies in Landscape Architecture	ED
Stephan Pauleit	Strategie und Management der Landschaftsentwicklung	LS
Frank Petzold	Architekturinformatik	ED
Sebastian Pfothenhauer	Innovationsforschung	SO
Miranda Schreurs	Umwelt- und Klimapolitik	SO
Klaus Sedlbauer	Bauphysik	ED
Stefan Winter	Holzbau und Baukonstruktion	ED
Gebhard Wulfhorst	Siedlungsstruktur und Verkehrsplanung	ED

...

3.11

Energie und Ernährung

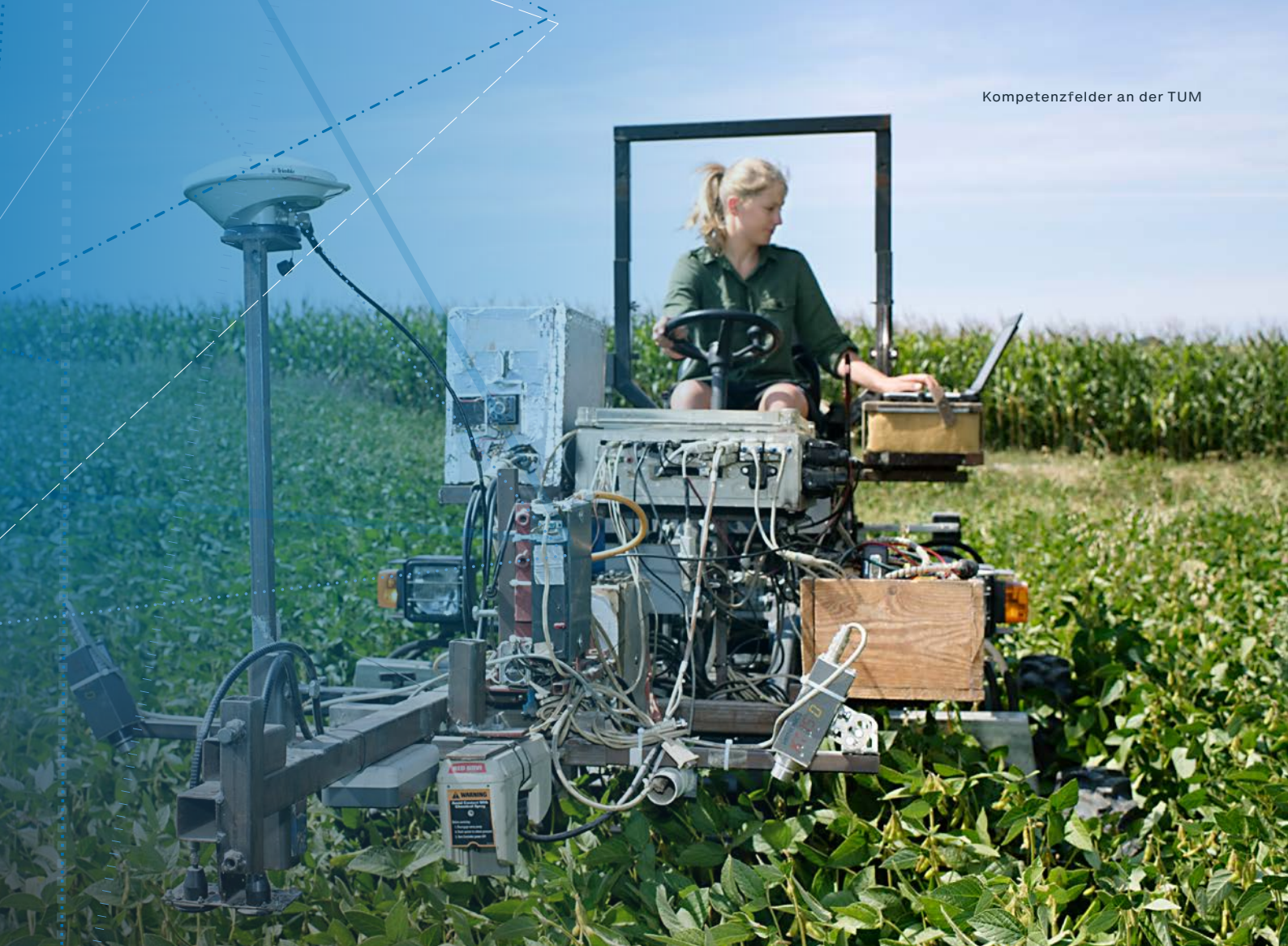
Der Bereich Energie und Ernährung ist seit 2019 ein Schwerpunkt am Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP), wobei der Fokus auf der ganzheitlichen Optimierung von Vertical Farming liegt. Themen wie künstliches Fleisch und künstliche Milch sollen ebenso behandelt werden. Denn eine nachhaltige Lebensmittelversorgung spielt in der Diskussion um urbane Nachhaltigkeit eine immer zentralere Rolle. Städte können bzw. müssen eine Führungsrolle bei der Dekarbonisierung durch die Reduktion von CO₂-Emissionen übernehmen. Nachhaltige Lösungen für die Bereiche Ernährung, Wasser, Energie und Transport als integrierte Bestandteile von Städten sind nötig, um den Anforderungen des Klimawandels zu begegnen. Im Bereich der Lebensmittelproduktion werden neben einer Anpassung der Kulturführung technische Maßnahmen wie beispielsweise der wettergeschützte Anbau angeführt.

In Vertical Farms können Frischeprodukte innerstädtisch in gestapelten Ebenen mit maximaler Ausnutzung der Bodenfläche angebaut werden. Die Kulturführung erlaubt durch die gezielte Steuerung der Klimaparameter ein hohes Maß an Kontrolle, erfordert jedoch zur Produktion von qualitativ hochwertigen Produkten bei effizientester Ressourcen-

nutzung fundiertes Fachwissen. Die Optimierung von Vertical Farming als Gesamtsystem ist demnach eine technologische Aufgabe, die nur interdisziplinär bearbeitet werden kann.

Am MEP wird ein Konzept entwickelt, das die Optimierung der Wechselwirkung zwischen Pflanzenwachstum und Gebäude zum Ziel hat und das Technikkonzept als Gesamtsystem so abstimmt, dass Synergien zwischen den Einzelkomponenten Licht, Temperierung, Lüftung und Entfeuchtung aktiviert werden. Um Vertical Farming gegenüber konventionellen Produktionsverfahren wettbewerbsfähig zu gestalten und die CO₂-Bilanz zu verbessern, ist eine Energieversorgung durch regenerative Energiequellen sowie die Einbindung in eine Kreislaufwirtschaft notwendig. Zur Umsetzung dieser interdisziplinären Vision bedarf es der engen Kooperation zwischen Energietechnik, Architektur und Bauingenieurwesen, Verfahrenstechnik, Life Science, Biotechnologie und weiterer Grundlagenforschung zur Optimierung einzelner Komponenten.

Neben thematischen Sommerschulen, Vernetzungsaktivitäten und der Entwicklung eines Prototyps im Labormaßstab, steht nun mit „OpEn Farming: Ganzheitliche Optimierung



des Energiesystems Vertical Farming durch Integration in Kreislaufwirtschaft“ das erste Forschungsprojekt an, gefördert durch das Bundesministerium des Innern und für Heimat. Schwerpunkte des Projekts sind dabei:

- Entwicklung von Gebäudekonzepten für Vertical Farming, die energetisch optimiert, aber auch wirtschaftlich attraktiv sind,
- ganzheitliche Abbildung von thermodynamischen Vorgängen an der Pflanze sowie der
- Beleuchtung in einer thermischen Gebäudesimulation,
- Integration der Farm in ein erweitertes Energiesystem einer heterogenen Struktur zur Abbildung einer Kreislaufwirtschaft,
- Durchführung einer Life-cycle assessment (LCA)-Optimierung des Gesamtsystems.

Das Projekt leistet einen wichtigen Impuls für urbane Nachhaltigkeit im Hinblick auf Klimaschutz, Energie- und Ressourceneffizienz und ebnet den Weg zu einem Paradigmenwechsel im Lebensmittelbereich.

Ansprechpartner:in	Professur	TUM School
Senthold Asseng	Digital Agriculture	LS
Heinz Bernhardt	Agrarsystemtechnik	LS
Martin Brandt	Decision Sciences and Systems	NAT
Thomas Brück	Synthetische Biotechnologie	NAT
Thomas Hamacher	Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme	ED
Mirjana Minceva	Biothermodynamik	LS
Nicolas Plumeré	Elektrobiotechnologie	TUMCS
Kang Yu	Precision Agriculture	LS

...

3.12 Systemanalyse und Energie- märkte

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der damit verbundenen Notwendigkeit schädliche Emissionen zu reduzieren, entwickelt das Center for Energy Markets an der TUM School of Management Ansätze um die möglichen Strategien für eine zukünftige nachhaltige, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung in Ihrer Gesamtheit zu erfassen und diese nach wirtschaftlichen, technischen und umweltverträglichen Aspekten zu bewerten.

Das Center for Energy Markets verbindet dabei ökonomische, finanz- und ingenieurwissenschaftliche Ansätze. Es geht darum, vor allem energiebezogene Forschungsfragestellungen aus der Praxis zu beantworten. Die Zusammenarbeit innerhalb der TUM führt zu einer einheitlichen und zielgerichteten Perspektive auf das Energiesystem, welches sich aus Energieversorgern, Infrastrukturbetreibern, Märkten, Verbraucher:innen und Regulation zusammensetzt. Der Fokus auf Markt, Preisbildung, Kosten und Investitionsverhalten individueller Firmen hilft dabei die Besonderheiten neuer Technologien und neuer Regularien zu verstehen und deren Einfluss auf eine erfolgreiche Energiewende zu bewerten. Die Identifikation von Engpässen bestehender und zukünftiger Infrastruktur sowie die Entwicklung neuer Technologien bei Rohstoffen hilft dabei, verlässliche Investitionsstrategien zu entwickeln und führt zu verbesserten

Abschätzungen der Entwicklungen von Energiemärkten. Die Ableitung von Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit sowie die Bestimmung des Mehrwerts, erlaubt die Identifikation möglicher und effizienter regulatorischer Veränderungen.

Die Forschung fokussiert sich dabei auf die Untersuchung zentraler Aspekte:

- Attraktivität von Investitionen in Wasserstofftechnologien und die Integration von Wasserstoff in die erneuerbare Energieversorgung,
- Wandel von Energieversorgungsunternehmen hin zu erneuerbaren Portfolios sowie deren Risikobewertung und -management,
- Modellierung von nationalen und internationalen Wasserstoffmärkten und den Wettbewerb zwischen grünem und blauem Wasserstoff,
- Wandel in Energiemarktdesigns und grundlegende Veränderungen aufgrund von Digitalisierung, Sektorkopplung und Emissionsminderungszielen,
- Regulatorische und finanzielle Anreize für saubere Energie auf Basis von Wasserstoff und erneuerbaren Energien.



Im Rahmen eines großen Verbundforschungsprojektes zum Technologiewandel in Energiemärkten forscht das Center for Energy Markets gemeinsam mit dem ifo Institut, der Yale Universität, Siemens Energy, der European Investment Bank und weiteren internationalen Partnern, wie z. B. der University of Texas in Austin.

Ansprechpartner:in	Professur für	TUM School
Gunther Friedl	Controlling	MGT
Thomas Hamacher	Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme	ED
Svetlana Ikonnikova	Ressourcenökonomie	MGT
Sebastian Schwenen	Energiemärkte	MGT
David Wozabal	Investment, Finance and Risk Management in Energy Markets	MGT

...

3.13

Energie und Nachhaltigkeit

Die TUM nutzt mit dem Department of Science, Technology and Society (STS) der TUM School of Social Sciences and Technology, dem TUM Campus Straubing, dem Center for Energy Markets an der TUM School of Management und dem Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP) ihre Expertise im Bereich nachhaltiger Energiepolitik und Politikstrategien auf lokaler, nationaler, europäischer und globaler Ebene. Die Zusammenhänge und Auswirkungen auf verschiedene Politikbereiche (bspw. Umwelt, Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft) werden ebenso untersucht wie Gerechtigkeitsaspekte – sozial wie generationsübergreifend.

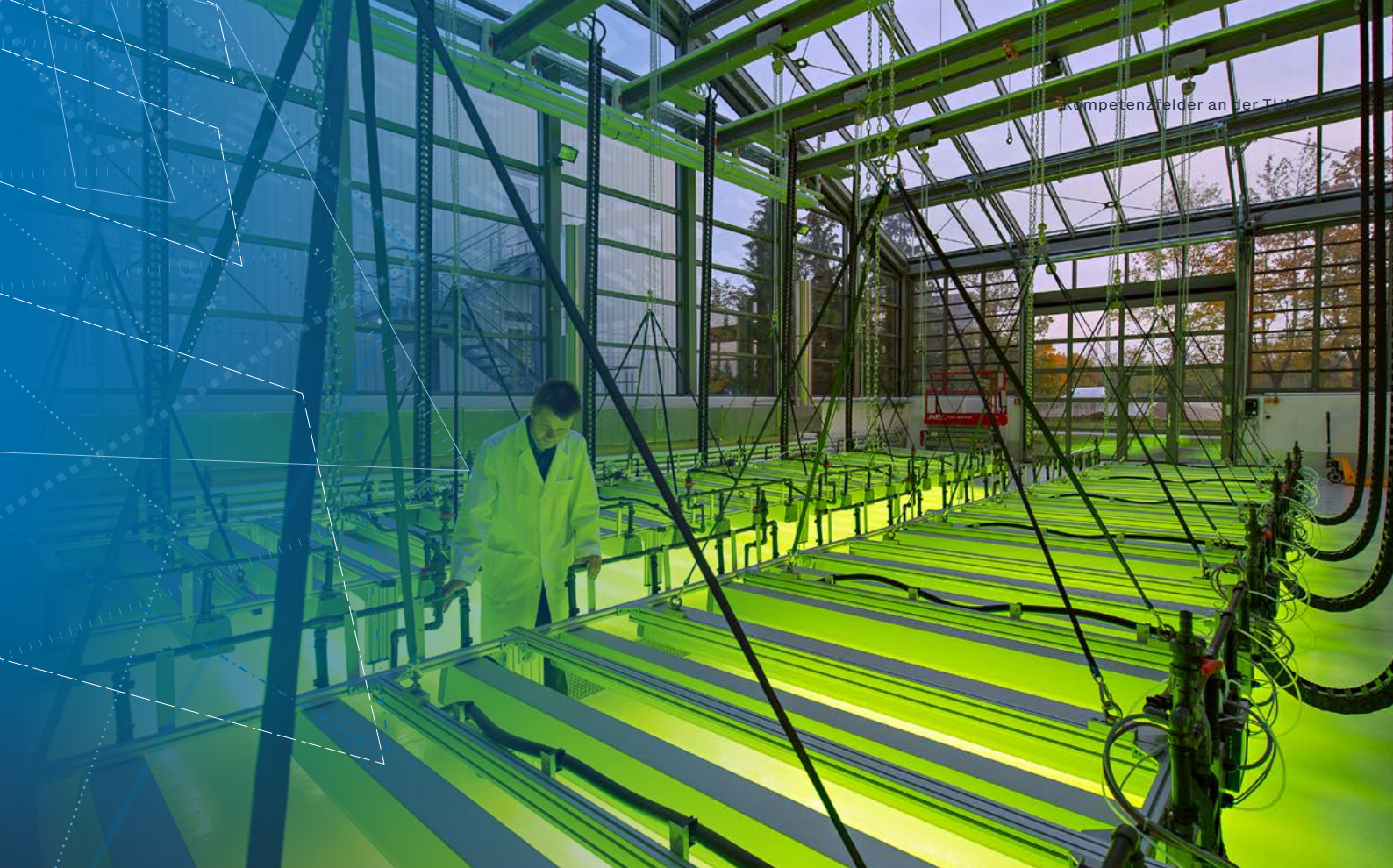
Das Pariser Klimaabkommen von 2015 hat ein international verbindliches Ziel vereinbart, die globale, anthropogene Erderwärmung auf weniger als 2 Grad zu begrenzen und, nach Möglichkeit, sogar die Grenze von 1,5 Grad anzustreben und einzuhalten. Die TUM analysiert, wie verschiedene Länder, Regionen und Gemeinschaften diese Ziele erreichen wollen, wo Fortschritte erzielt werden und welche Hürden zu überwinden sind. Best-Practice-Beispiele auf städtischer und nationaler Ebene sind eine wichtige Inspirationsquelle für unsere Forschung.

Die TUM erforscht durch die TUM School of Social Sciences and Technology wie gesellschaftliche Einflüsse die Technologieentscheidungen und die damit verbundene Technologievielfalt bestimmen. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Kreislaufwirtschaft in Industrieprozessen verwurzelt

werden muss. Internationale Vergleichsstudien an Energiesystemen ermöglichen die Identifikation politischer Trends, technologischer Innovationen, Best Practices aber auch technologischer Sackgassen, um letztlich die Nachhaltigkeit zu erhöhen.

In diesem Zusammenhang unterstützt die TUM auch die Begleitforschung der Kopernikus-Initiative als Partner im Projekt „Ariadne: Evidenzbasiertes Assessment für die Gestaltung der deutschen Energiewende“ und „Energiewende-Navigationssystem“ sowie die Reallabore in Deutschland im Projekt „Trans4Real“. Im Horizon 2020 Projekt PAUL erforscht das Department of Science, Technology and Society (STS) die Rolle der Wissenschaft bei der Entwicklung der Energie- und Klimapolitik auf städtischer Ebene in München, Paris und Zürich. Im Projekt GeoReSim wird ein Computerspiel entwickelt, das über die Rolle von Verhandlungen in der internationalen Energiepolitik aufklärt.

Auch externe (Schock-)Ereignisse sind ein wichtiger Bestandteil der Forschung an der TUM. TUM-Forschende haben die Auswirkungen der Corona-Pandemie auf das Energieverbrauchsverhalten und energiepolitische Entscheidungen untersucht. Der Krieg in der Ukraine und seine Auswirkungen auf den internationalen Energiehandel, europäische und deutsche Klima- und Sicherheitspolitik sowie technologische Entwicklungsrichtungen sind ein weiterer Bereich unserer Forschung.



Ansprechpartner:in	Professur	TUM School
Thomas Auer	Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen	ED
Gunther Friedl	Controlling	MGT
Magnus Fröhling	Circular Economy	TUMCS
Christian Große	Zerstörungsfreie Prüfung	ED
Thomas Hamacher	Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme	ED
Kai-Olaf M. Hinrichsen	Technische Chemie I	NAT
Werner Lang	Energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen	ED
Stephan Pauleit	Strategie und Management der Landschaftsentwicklung	LS
Sebastian Pfothenhauer	Innovationsforschung	SO
Sören Schöbel-Rutschmann	Landschaftsarchitektur regionaler Freiräume	ED
Miranda Schreurs	Umwelt- und Klimapolitik	SO
Sebastian Schwenen	Energiemärkte	MGT
Gebhard Wulfhorst	Siedlungsstruktur und Verkehrsplanung	ED
Stefan Wurster	Policy Analysis	SO

...



3.14 Kerntechnik

Mit der Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) betreibt die TUM einen der modernsten und leistungsfähigsten Forschungsreaktoren weltweit. Er ist seit 2023 der letzte Reaktor in Deutschland mit einer thermischen Leistung im Megawatt-Bereich. Somit befinden sich Deutschlands erster (FRM I, 'Atomei') und letzter Reaktor (FRM II) auf dem Gelände der TUM.

Dabei wurde das Design des FRM II von Wissenschaftler:innen an der TUM unter der Leitung von Prof. Böning entwickelt. Dies zeigt wie tief kerntechnische Themen an der TUM verwurzelt sind und welches Erbe es zu erhalten gilt.

Heute beteiligt sich die TUM auch weiterhin an der internationalen Forschung zur Minimierung von hochangereichertem Uran im zivilen Kreislauf, weshalb Wissenschaftler:innen an der TUM auch die Umrüstung des FRM II auf ein Brennelement mit niedrigerer Anreicherung sowie die Qualifizierung der dafür notwendigen, hochdichten Kernbrennstoffe vorantreiben.

Neben dem FRM II betreibt die TUM auch die Radiochemie München, welche mit ihrem umfangreichen Fähigkeitsportfolio zu den wichtigsten Kompetenzzentren in Bayern zählt. Insbesondere die vorhandenen heißen Zellen, in denen hochradioaktive Stoffe gehandhabt werden können, sind eine seltene und sehr wertvolle Ressource.

Abgerundet werden die kerntechnischen Kompetenzen der TUM mit dem Lehrstuhl für Nukleartechnik an der School of Engineering und Design, welcher die akademische Anbindung sicherstellt und wertvolle Laborfläche zur Verfügung hat.

Die TUM befindet sich somit in einer prädestinierten Position, um eine zentrale Rolle beim Wissens- und Kompetenzerhalt in sicherheitsrelevanten kerntechnischen Fragestellungen einzunehmen. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, bündelt die TUM ihre bestehenden kerntechnischen Kompetenzen im TUM Center for Nuclear Safety and Innovation (TUM.CNSI). Das Center fokussiert sich dabei auf die folgenden Forschungsbereiche:



Ansprechpartner:in	Professur	TUM School
Agnes Jocher	Sustainable Future Mobility	ED
Rafael Macián-Juan	Nukleartechnik	ED
Peter Müller-Buschbaum	Funktionelle Materialien	NAT
Miranda Schreurs	Umwelt- und Klimapolitik	SO
Hartmut Spliethoff	Energiesysteme	ED

...

- Nuclear Safety: Reaktorsicherheit, Reaktorphysik und Neutronik, Thermohydraulik und -mechanik
- Reactor Operations: Strahlenschutz und Entsorgung, Bestrahlungen und Ausbildung von Reaktorpersonal
- Nuclear Materials: Grundlagenforschung, Materialcharakterisierung und Fertigungstechniken
- Konzepte zu weitgehend geschlossenen Brennstoffkreisläufen für neuartige Reaktortypen, wie sie z. B. in kleinen modularen Reaktortypen realisiert werden könnten
- Nuclear Analytics: Nukleare Gefahrenabwehr und Forensik, Produktkontrolle radioaktiver Abfälle, Endlagersicherheit und Nuklidmigration
- Medical Applications: Neutronentherapie, Bestrahlungsplanung und Dosimetrie, Erzeugung und Separation von trägerfreien Radioisotopen für Diagnose und Therapie

Eine qualifizierte Mitsprache in nuklearen Sicherheitsfragen insbesondere unter dem Gesichtspunkt des kerntechnischen Ausbaus im europäischen Kontext erfordert Expertise und Erfahrung. Da echte Fachkenntnis jedoch nur durch aktive Forschung erhalten werden kann, ist die Erforschung zukünftiger kerntechnischer Technologien auch in Deutschland essentiell, um auch in Zukunft mit entsprechender Kompetenz zu kerntechnischen Aspekten sprechen zu können.

4



Gemeinsam gestalten wir die Zukunft der Energie

Mit TUM.Energy bündelt die TUM ihre Kompetenzfelder unter dem Dach des Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP). Jedes dieser Kompetenzfelder zeichnet sich durch einen disziplinären Fokus und eine starke interdisziplinäre Vernetzung aus. Dieser Ansatz ermöglicht es der TUM, ihre Kompetenzfelder in eine zukunftsfähige Lehre maßzuschneidern, auf höchstem Niveau zu forschen und Innovationen zur Marktreife zu führen – mit dem gemeinsamen Ziel einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Energieversorgung.

Zukunftsfähige Lehre

Unsere Lehre im Bereich TUM.Energy adressiert technische, wirtschaftliche, rechtliche und gesellschaftliche Fragestellungen. Diese Interdisziplinarität spiegelt sich auch in den Lehrangeboten der TUM wider. Studiengänge, Doktorandenprogramme und studentische Initiativen mit dem Schwerpunkt Energie finden sich folglich in vielen unterschiedlichen Disziplinen. Neben Ingenieur- und Naturwissenschaften beschäftigen sich auch die Wirtschaftswissenschaften und die Politikwissenschaft an der TUM mit Energiethemen.

Darüber hinaus wird dem stark interdisziplinären Charakter durch das Angebot entsprechender fächerübergreifender Programme an den Integrative Research Institutes (IRIs) der TUM Rechnung getragen.



Studentische Initiativen und Projekte:

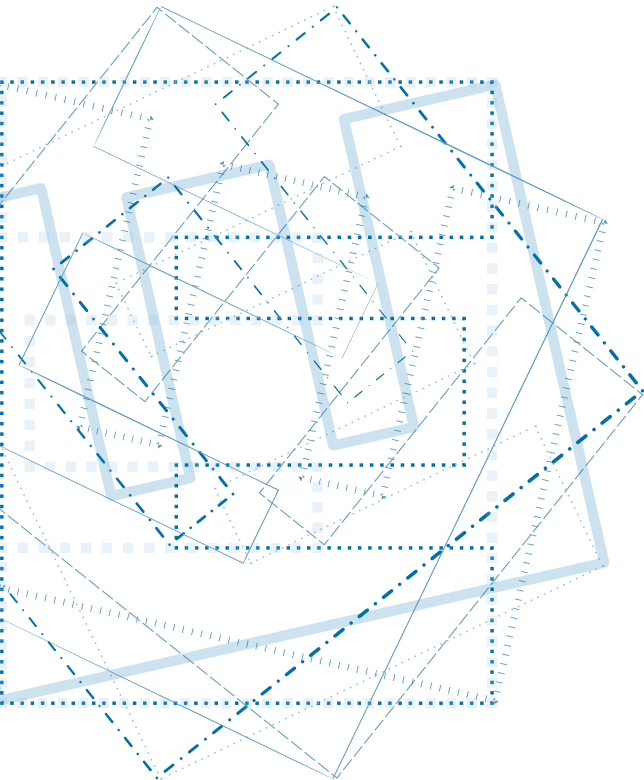
Die Studierenden der TUM engagieren sich im Bereich Energie in zahlreichen Projekten, Initiativen und Vereinen. Somit können das Wissen aus dem Studium direkt umgesetzt und praktische Erfahrungen in Projektmanagement und Entrepreneurship gesammelt werden. So erwachsen Kooperationen und Verbindungen in Europa und auf der ganzen Welt.

- Seit vielen Jahren ist die Ringvorlesung „Umwelt“ etabliert, eine interdisziplinäre, öffentliche Vortragsreihe des Umweltreferats der Studentischen Vertretung der TUM, die von Studierenden der TUM ehrenamtlich organisiert wird. In dieser Veranstaltung halten Referent:innen Vorträge über z. B. technischen Umweltschutz, Gesundheit, Verbraucher- und Klimaschutz.
- Das TUfast ECO Team beschäftigt sich mit der Entwicklung von hocheffizienten Fahrzeugkonzepten. 2023 holte es einen Weltrekord und fuhr 2.573,79 km mit nur einer Batterieladung. Der Fokus liegt dabei auf der Erarbeitung von innovativen Lösungen mit Hilfe interdisziplinärer Kooperation.
- TU eMpower Africa e. V. ist ein gemeinnütziger Verein und eine akkreditierte Hochschulgruppe, die Studierende, Forscher:innen, Alumni und Freund:innen der TUM anspricht. Das Team arbeitet an der Frage, wie die Nutzung von erneuerbaren Energien eine nachhaltige Entwicklung von Gemeinden in Afrika fördern kann.

Promotionen im Energiebereich:

Im Themenspektrum Energie wird an vielen Fakultäten und Schools der TUM geforscht. In einer Vielzahl von nationalen und internationalen Projekten bieten sich Möglichkeiten zur Promotion.

- Darüber hinaus kann auch an den Integrative Research Institutes (IRIs), die im Energiebereich angesiedelt sind, eine Promotion durchgeführt werden. Beispielsweise bietet das Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP) vielfältige Möglichkeiten speziell für interdisziplinäre Themenstellungen entsprechend der fach- und fakultätsübergreifenden Forschung des MEP. So können Promotionen u.a. in den Bereichen Kraftwerkstechnik, Regenerative Energien, Elektromobilität, Nachhaltiges Bauen und Energiespeicherung angeboten werden.
- Das Graduiertenzentrum Straubing (GCS) ist eine Einrichtung der TUM Graduate School, welche die Graduiertenausbildung an der TUM bündelt. Gleichzeitig ist die GCS Teil des TUM Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit. Das GCS unterstützt die Doktorand:innen und gestaltet gemäß den lokalen Anforderungen die Rahmenvorgaben der TUM-GS bedarfsorientiert aus.
- Die TUM International Graduate School of Science and Engineering (IGSSE) sowie das Graduiertenprogramm des Exzellenzclusters e-conversion verbinden akademische Spitzenforschung mit hochkarätiger Doktorand:innenausbildung. Die Promovierenden werden für die Arbeit an interdisziplinären, zukunftsweisenden Forschungszusammenhängen ausgebildet. Ein Fokusbereich der IGSSE ist die GreenTech-Initiative, welche Forschung im Bereich umweltfreundlicher Technologien und nachhaltiger Energieerzeugung fördert. GreenTech ist dabei die erste gemeinsame strategische Forschungsinitiative der EuroTech-Universitäten.
- Über das MEP werden außerdem kooperative Promotionen mit Hochschulen für Angewandte Wissenschaften (HAWs) ermöglicht. Neben der Integration entsprechender Promotionsvorhaben in die Forschungsarbeit des MEP wird dadurch die Vernetzung der Forschungsgruppen im Energiebereich an den beteiligten Hochschulen gefördert.

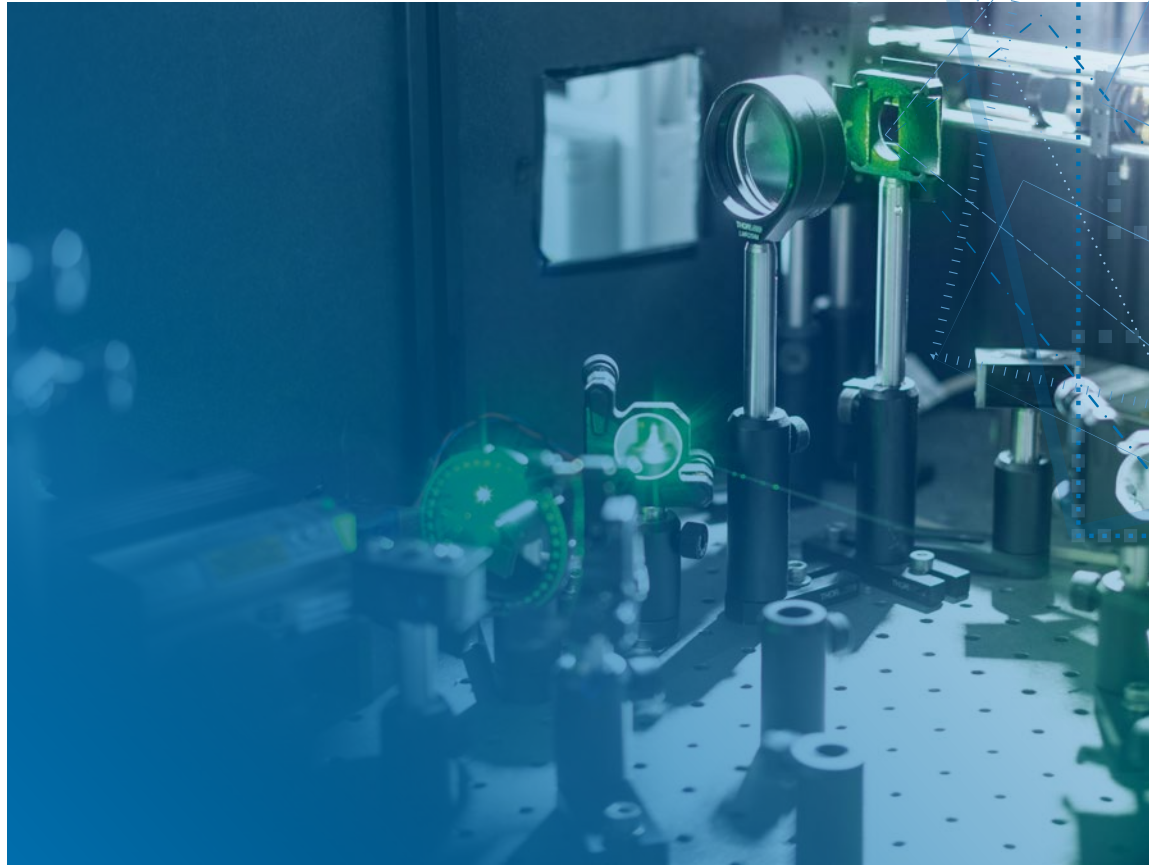


Weitere Aktivitäten:

- Das Center for Energy Markets (CEM) bündelt die Aktivitäten im Energiebereich an der TUM School of Management. Das CEM unterstützt die Zusammenarbeit zwischen Studierenden und der Industrie sowohl in Bezug auf Forschungsprojekte als auch auf Karriere-möglichkeiten.
- Das Seminar on Energy and Environmental Economics Munich (SEEM) wird gemeinsam vom ifo Institut München und dem CEM veranstaltet. Das SEEM bietet ein Forum für die wissenschaftliche Diskussion aktueller Themen der Energie-, Umwelt- und Klimaökonomie.

Exzellente Forschung

Die Forschungsschwerpunkte hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung sind vielschichtig. Die Innovationen aus der Grundlagenforschung müssen dabei schnell hochskaliert werden, um so in der Verfahrenstechnik und der Anwendung in den Ingenieurwissenschaften genutzt werden zu können.



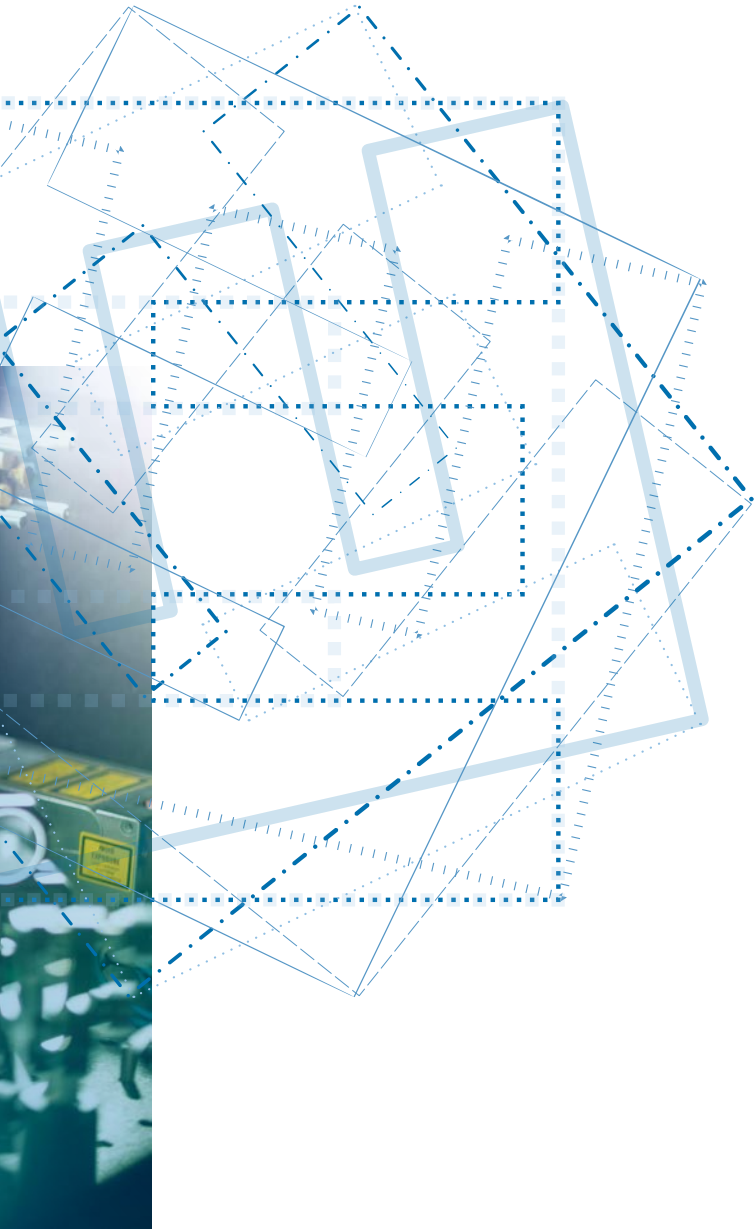
Internationale Vernetzung als Schlüssel für Spitzenforschung

Der Energieforschung kommt überall auf der Welt eine besondere Bedeutung und Rolle zu und sie wird mit erheblichen Mitteln gefördert. Die Forschung ist in den häufigsten Fällen zwischen Universitäten und meist großen nationalen Forschungszentren aufgeteilt. Dabei sind die Schwerpunkte weltweit unterschiedlich fokussiert.

Zentrales Element unserer Exzellenz in der Energieforschung ist die internationale Kooperation – sowohl im Bereich der Grundlagenforschung als auch in den anwendungsnahen Ingenieurwissenschaften. So werden beispielsweise internationale Workshops zum themenspezifischen und inhaltlichen Austausch mit den internationalen Partnern und TUM-eigenen Netzwerken forciert. Strategische Kooperationen gibt es hier mit den EuroTech und den GlobalTech Universities. Beispielhaft ist hier die Workshop-Reihe zwischen dem Munich

Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP) und dem Energy Futures Lab des Imperial College London (ICL) zu nennen. Weiterhin sind Seed-Funding Mechanismen, wie die ICER Projekte mit dem ERI@N der Nanyang Technological University in Singapur zu erwähnen, durch die strategische Kooperationen auch unabhängig von bestehenden Forschungsförderungsmechanismen auf Basis bilateraler Begutachtung aufgesetzt werden konnten. Der Exzellenzcluster e-conversion hat ein hochkarätiges internationales Netzwerk (NICC) im Bereich der Grundlagenforschung aufgebaut, das einen intensiven Austausch des wissenschaftlichen Nachwuchses fördert.

Darüber hinaus wird am TUM Institute for Advanced Study (IAS) die internationale Kooperation der TUM mit hochkarätigen Wissenschaftler:innen unterstützt und gefördert. So



können sowohl neue Forschungsthemen durch internationale Vernetzung erschlossen werden, als auch bestehende Forschungsprojekte, wie das Exzellenzcluster e-conversion, optimal flankiert werden. Fellowships mit Prof. Laura Herz (University of Oxford) im Bereich Perowskit-Halbleiter, Prof. Ib Chorkendorff (DTU Copenhagen) im Bereich der molekularen Materialforschung, Prof. Natalia Shustova (University of South Carolina) im Bereich metall-organischer Verbindungen und Dr. Filippo Maglia (BMW Group) in der Batterieforschung an elektrochemischen Grenzflächen, wurden jüngst im Energieforschungsbereich gefördert. Darüber hinaus fördert das IAS die „Innovation-Networks“ der TUM. Im Bereich der Materialentwicklung mit Energieforschungsbezug auf Basis maschinellen Lernens ist das Projekt „Artificial Intelligence powered Multifunctional Material Design“ (ARTEMIS) zu nennen.

Um die Energiewende ebenfalls im globalen Süden voranzutreiben, wurde 2020 TUM SEED for Sustainable Energies, Entrepreneurship and Development gegründet. Es wird vom DAAD und dem Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) gefördert und ist eines von sieben sogenannten "Exzellenzzentren für Entwicklungszusammenarbeit" des BMZ. Neben der TUM gehören acht herausragende Partneruniversitäten aus dem Globalen Süden zum SEED-Netzwerk: JKUAT (Kenya), IIT Bombay (Indien), KNUST (Ghana), PUCP (Peru), NUST (Namibia), Makerere (Uganda), BIT-BDU (Äthiopien) und ITB (Indonesien). Gemeinsam erarbeiten sie interdisziplinäre Lösungen an der Schnittstelle von erneuerbaren Energien und Entrepreneurship für eine nachhaltige Entwicklung im globalen Süden. Ein Kernelement des SEED Netzwerkes sind die Living Labs in den Partnerländern. Dabei handelt es sich um dezentrale Energiesysteme in ländlichen Gebieten, z. B. Mini-Grids, die zusammen mit den lokalen Gemeinden entwickelt wurden und mittels partizipativer Prozesse maßgeschneidert sind auf die lokalen Ressourcen und Kapazitäten. Die Living Labs fördern nicht nur die lokale Entwicklung, sondern ermöglichen auch eine praxisnahe Lehre und interdisziplinäre Forschung für Studierende und Nachwuchswissenschaftler:innen der Partneruniversitäten sowie der TUM. Eine weitere wesentliche Aktivität des SEED Netzwerkes ist das Doktorandenprogramm an der TUM für exzellente Kandidat:innen aus dem globalen Süden.

Auch die Zusammenarbeit auf EU-Ebene ist, insbesondere für die Ingenieurwissenschaften, die zentrale Plattform für internationale Kooperationen. So war bzw. ist die TUM während des Horizon2020 Programms im Bereich der Energieforschung in 34 Forschungsprojekten involviert. Bei drei Projekten war die TUM zudem in der Rolle des Koordinators. Aktuelle Beispiele sind hier das Projekt „Engimmonia“, welches sich mit der Energieeffizienz von Schiffsmotoren beschäftigt und neben dem Einsatz von Ammoniak als Treibstoff auch die Abwärmenutzung durch ORC-Technologie demonstrieren wird und das von der TUM koordinierte Projekt „Hydro4U“ bei dem der Technologietransfer nach Zentralasien im Fokus steht, verbunden mit Anpassungen und Kostenreduktion.

Um das CoSES-Labor entsteht ebenfalls ein internationales Netzwerk.

Interdisziplinarität als Schlüssel für eine erfolgreiche Energiewende

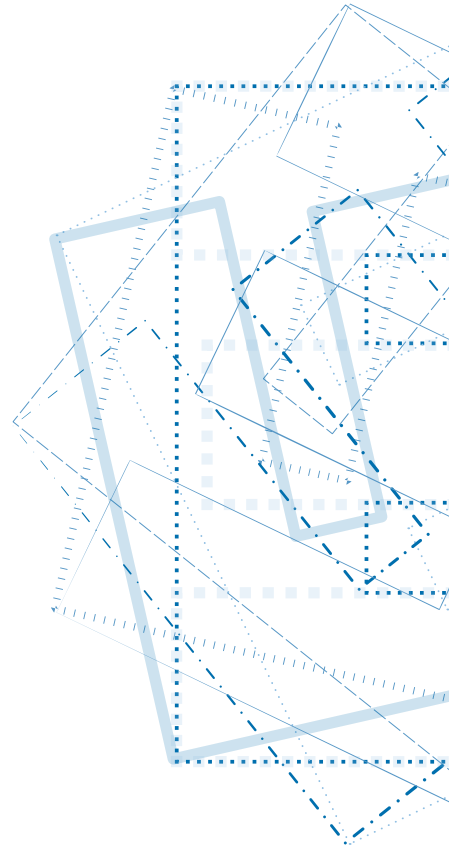
Energieforschung ist von Natur aus interdisziplinär: von sehr grundlagenorientierter Forschung in Chemie und Physik über stark anwendungsorientierte Forschung in den Ingenieurwissenschaften, bis hin zur Diskussion über Finanzierung und Regulierung in den Wirtschaftswissenschaften. Deswegen verbindet die TUM Wissenschaftler:innen aus all diesen Disziplinen unter dem Dach des Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP) und in Partnerschaft mit der LMU durch den Exzellenzcluster e-conversion.

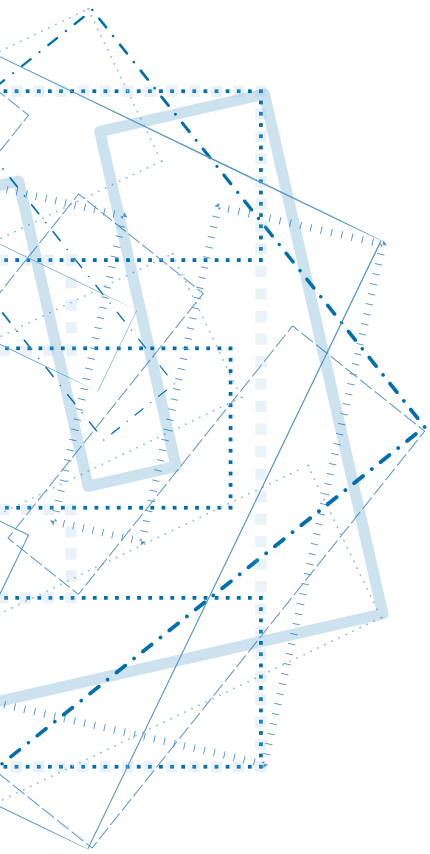
Dies trifft nicht nur auf die im Wandel befindliche Kraftwerkstechnik, sondern auch auf die Erforschung erneuerbarer Energietechnologien, wie die Geothermie, zu. So konnte mit dem Projekt „Energy Valley Bavaria“ die Flexibilisierung des Energiesystems und der darin betriebenen thermischen Kraftwerke untersucht werden, um so die erneuerbaren Energien optimal zu integrieren. Die dadurch aufgebaute Kompetenz wird von der Industrie stark nachgefragt, was in der jüngsten Vergangenheit zu engen Kooperationen mit Energieversorgern wie Uniper und EON Energy Projects, aber auch mit Technologielieferanten wie GE, Siemens und MHI führte. Stellvertretend für die erneuerbaren Energien steht die Geothermie-Allianz Bayern, ein Forschungsverbund bayerischer Universitäten unter Koordination durch die TUM. Hier kooperieren Geolog:innen, Hydrochemiker:innen, Mathematiker:innen und Ingenieur:innen in einem ganzheitlichen Ansatz zur Optimierung des Gesamtkonzepts. Aus diesem Projekt heraus konnten auch internationale Kooperationen angestoßen werden, beispielsweise mit Singapur und Neuseeland.

Der von der Bayerischen Forschungstiftung geförderte Forschungsverbund „Energie - Sektorkopplung und Micro-Grids“ (STROM) wird insbesondere die Sektoren „Wärme und Strom“ sowie „Verkehr und Strom“ zusammen betrachten, wobei Methoden und Werkzeuge entwickelt werden, die eine langfristige Planung dieser Bereiche für Bayern erlauben.

Neue Materialien als Schlüssel zu den Innovationen von morgen

Die TUM verfügt über eine in Deutschland einzigartige chemisch/physikalische Grundlagenforschung, die im Hinblick auf die Energie-Forschung am Exzellenzcluster e-conversion gemeinsam mit der LMU vorangetrieben wird (siehe dazu auch den folgenden Abschnitt). In den zentralen Technologien für die Energiewende sind funktionelle Materialien der Schlüssel für die Innovationen von morgen. Dies gilt für Batterien, Brennstoffzellen, Photo- und Elektrokatalysatoren, Elektrolyseure und Solarzellen gleichermaßen. Auch sind die Neutronenquelle FRM II am Campus Garching sowie die herausragende experimentelle Infrastruktur des Clusters e-conversion zu nennen. Alleinstellungsmerkmale des TUM-Standorts Garching, welche z. B. die Beobachtung elektrochemischer Prozesse in-situ und in-operando ermöglichen, um so zeitlich aufgelöste Abläufe und Mechanismen in funktionellen Materialien zu untersuchen, setzen die TUM im Bereich der Energieforschung von anderen Universitäten ab. Durch die Definition der Materialforschung am MEP wird die Verbindung mit Energie- und Verfahrenstechnik besonders im Hinblick auf die technologische Umsetzung und die daraus abgeleiteten Leistungsparameter hervorgehoben.





Innovative Grundlagenforschung im Exzellenzcluster e-conversion

Seit 2019 wird der Exzellenzcluster e-conversion von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der deutschen Exzellenzstrategie gefördert. Der interdisziplinäre Forschungsverbund vereint mehr als 40 Wissenschaftler:innen und deren Forschungsgruppen an der TUM, der LMU München sowie an Max-Planck-Instituten in Stuttgart, Berlin und Mülheim an der Ruhr. Gemeinsam untersuchen sie die grundlegenden Prozesse bei der Umwandlung erneuerbarer Energien.

Ob es um Photovoltaik, Photokatalyse, (Photo-)Elektrokatalyse oder Batterien geht: Immer spielen die Grenzflächen zwischen verschiedenen Materialien eine Rolle. Denn dort geht durch physikalische Vorgänge stets Energie verloren. Die Probleme an den Grenzflächen führen zum Beispiel zu kritischen Phänomenen wie Überspannung, Rekombinationsverlusten oder erhöhten elektrischen Widerständen. Daher ist die Gestaltung der Grenzflächen entscheidend für die Effizienz der Energieumwandlung. Durch die Ausrichtung auf die Materialgrenzflächen etabliert der Cluster e-conversion einen neuen übergreifenden Forschungsansatz. Die zentralen Fragen lauten: Was passiert auf atomarer Ebene und wo geht Energie verloren? Wie geht es besser? Welche Alternativen können wir entwickeln? Helfen uns selbst gestaltete Materialien?

Ein erster Schritt zur Beantwortung dieser Fragen ist die Konstruktion vereinfachter Grenzflächen-Modelle – im Labor ebenso wie virtuell am Computer. Diese Modelle helfen dabei, grundlegende Abläufe im Detail zu verstehen und die Faktoren zu identifizieren, die die Energieumwandlung behindern. Dank der hervorragenden technischen Ausstattung bei e-conversion können die Wissenschaftler:innen den Aufbau dieser Modelle atomar genau definieren und gezielt einzelne Parameter verändern. Anschließend testen sie, was sich im Modell und später dann im komplexeren Original optimieren lässt. Der Cluster verbindet dazu die leistungsfähigen Konzepte der Nanowissenschaften und der grundlagenorientierten Energieforschung, um maßgeschneiderte Modellsysteme zu erzeugen und durch deren umfassende Charakterisierung ein fundamentales Verständnis zu erarbeiten.

Dass in verschiedenen Energieanwendungen immer wieder vergleichbare Materialien und Prozesse an den Grenzflächen zum Einsatz kommen, ermöglicht ein kohärentes Forschungsprogramm mit bisher ungenutzten Synergien und unkonventionellen Ansätzen.

Mit dieser Agenda fungiert e-conversion als Innovationsplattform für die Entwicklung neuartiger Konzepte und Materialien. Die erweiterte Wissensbasis und das tiefe Verständnis der für die Energieumwandlung entscheidenden Prozesse sollen zu gesteigerten Effizienzen, verbesserten Stabilitäten und der Verwendung neuartiger Ausgangsmaterialien aus nachhaltigen Ressourcen führen. Die Forschungsstrategie des Clusters soll nach und nach auf eine immer größere Anzahl neuartiger Materialien und Strukturen ausgedehnt werden und auch die Entwicklung neuer, skalierbarer Herstellungs- und Verarbeitungsmethoden umfassen.

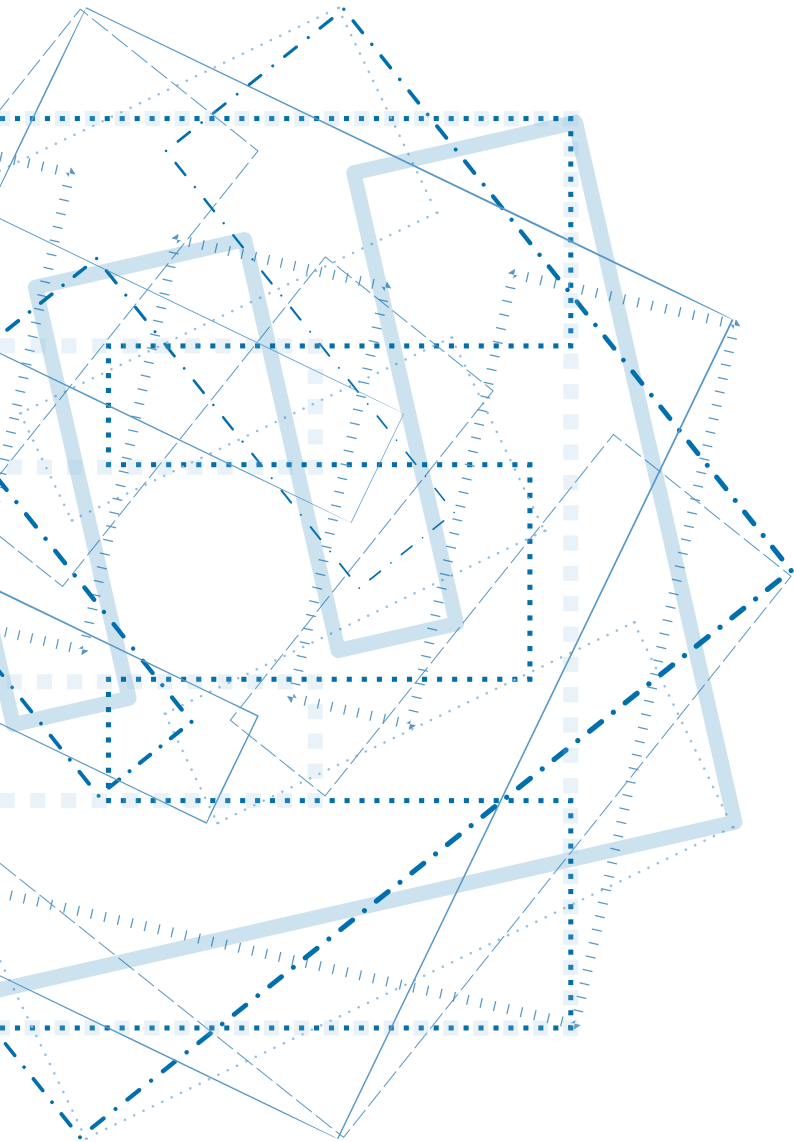
Damit soll der Cluster den Grundstein für die Entwicklung eines breiten Spektrums neuer leistungsfähiger Systeme zur Energieumwandlung mit optimierten optoelektronischen, photokatalytischen und elektrochemischen Funktionen legen.

Integrative Forschung

Die Interdisziplinarität der Energieforschung ist eine notwendige Voraussetzung für den Erfolg. Trotzdem ist sie alles andere als ein Selbstläufer. Deswegen ist eine der großen Aufgaben der TUM die Interdisziplinarität langfristig auch institutionell zu fördern. Ein Weg ist die Schaffung von Integrated Research Institutes (IRIs) wie das Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP). Dabei sollen diese Einrichtungen nicht neue bürokratische Strukturen schaffen, sondern die Wissenschaftler:innen in immer wieder neuen Konstellationen zusammenbringen. Das MEP konnte auf diese Weise schon interdisziplinäre Forschung initiieren und organisieren, wie das Projekt Energy Valley Bavaria oder die Geothermie-Allianz Bayern.



Der Betrieb von gemeinsam genutzten Laborflächen, sogenannten „shared facilities“, ermöglicht am Zentrum für Energie und Information interdisziplinäre Forschung und Kooperation über Departmentgrenzen hinweg. Das MEP begleitet dabei die laufende Forschung, übernimmt aber auch aktivere Rollen wo Bedarf besteht, beispielsweise durch den Betrieb des CoSES Labors für strategische Forschung im Bereich Sektorkopplung. Die Schaffung gemeinsamer Forschungsplattformen wird insbesondere im Energiebereich eine immer größere Rolle spielen. Der Wunsch der Politik nach „Reallaboren“ kann nur von entsprechenden Organisationen wie einem IRI gestemmt werden.



Für die universitäre Energieforschung bietet sich damit die besondere Gelegenheit mit großen nationalen Forschungszentren gleichzuziehen und hier auch langfristig eine bedeutendere Rolle in der Energieforschung zu spielen. Die „shared facilities“ sind auch ein Magnet für Gastwissenschaftler:innen aus dem In- und Ausland und können damit die Forschung über die Grenzen der Universität hinaus stärken. So zum Beispiel die Forschungsneutronenquelle FRM II als Großforschungseinrichtung mit über 1000 wissenschaftlichen Gästen pro Jahr aus dem In- und Ausland, welchen nach dem Prinzip des wissenschaftlichen Wettbewerbs Zugang gewährt wird.

So wird beispielsweise bereits seit über zehn Jahren ein interdisziplinäres Kolloquium zum Austausch der Doktorand:innen im Bereich der Energieforschung organisiert. Aber auch Workshops zu aktuellen Forschungsthemen und -herausforderungen mit Energiebezug finden statt. So zum Beispiel Ressourcenökonomie, Brennstoffzellentechnologie und Photovoltaik, um nur einige wenige zu nennen.

Eine weitere Aufgabe ist die Vernetzung mit und Unterstützung von An-Instituten und Partner-Instituten, wie TUM.Int Energy Research, den Venture Labs, der UnternehmerTUM oder beispielsweise dem Wasserstoff-Technologie Anwender Zentrum. Die Energiebranche ist sicher noch eine junge Branche bezüglich Start-ups und Gründungen. Die Energiewende verlangt aber diesen unternehmerischen Geist und deswegen sind gerade diese Aktivitäten so wichtig.

Die Vertretung der Wissenschaft in Gremien und politischen Diskussionen ist eine weitere wichtige Aufgabe, die insbesondere durch IRIs erfolgen kann. Bis heute konnte diese Aufgabe insbesondere auf der bayerischen Ebene, z. B. beim Energiedialog in Bayern, erfüllt werden. Langfristig ist das Ziel, dies auf die nationale und europäische Ebene auszudehnen.

Impressum

TUM.Energy

Energieforschung an der Technischen Universität
München im Rahmen der TUM AGENDA 20300
Dezember 2023

Herausgeber:

Technische Universität München
Präsident Prof. Thomas F. Hofmann
Arcisstraße 21
80333 München
www.tum.de

Redaktion:

Technische Universität München
Ulrich Meyer
Pressesprecher
Arcisstraße 21
80333 München

Gestaltung:

ediundsepp Gestaltungs mbH

Druck:

Walch Druck Augsburg
Gedruckt auf Recyclingpapier

Kontakt:

Pressestelle
Technische Universität München
Arcisstraße 21
80333 München
Tel. +49 89 289 22778
presse@tum.de

Bildnachweise:

S. 5 Astrid Eckert / TUM
S. 16 Andreas Heddergott / TUM
S. 18 Andreas Heddergott / TUM
S. 21 Uli Benz / TUM
S. 22 Fabian Vogl / TUM
S. 25 Christian Bäck / TUM
S. 27 Uli Benz / TUM
S. 28 Andreas Heddergott / TUM
S. 31 Uli Benz / TUM
S. 32 Stefan Hobmaier / TUM
S. 35 Stefan Hobmaier / TUM

S. 36 Sebastian Kissel / TUM
S. 39 Uli Benz / TUM
S. 41 Uli Benz / TUM
S. 43 Andreas Heddergott / TUM
S. 44 Astrid Eckert / TUM
S. 46 Astrid Eckert / TUM
S. 48 Astrid Eckert / TUM
S. 50 Stefan Woidig / TUM

TUM Schools:

- Computation, Information and Technology (CIT)
- Engineering and Design (ED)
- Natural Sciences (NAT)
- Life Sciences (LS)
- Medicine and Health (MH)
- Management (MGT)
- Social Sciences (SO)
- TUM Campus Straubing (TUMCS)

