

With Novel Nuclear Technologies Towards a Greenhouse Gas-Free Basic Energy Supply

Handlungsempfehlungen für die Politik mit Erläuterungen

Vorabauszug aus dem Weißbuch

Experten-Symposium

TUM Akademiezentrum Raitenhaslach
13.-15. Juni 2024

TUM Senior Excellence Faculty

Schirmherrschaft Staatsminister Dr. Florian Herrmann

Zehn Handlungsempfehlungen für eine treibhausgasfreie Grundlastversorgung durch neuartige Kerntechnologien

**With Novel Nuclear Technologies
Towards a Greenhouse Gas-free
Basic Energy Supply**

Einleitung

Die Sicherstellung einer treibhausgasfreien Energieversorgung stellt Deutschland und die Welt vor erhebliche Herausforderungen. Vor diesem Hintergrund veranstaltete die TUM Senior Excellence Faculty vom **13. bis 15. Juni 2024 unter der Schirmherrschaft von Staatsminister Dr. Florian Herrmann** ein dreitägiges Expertensymposium im TUM Akademiezentrum Raitenhaslach. Im Mittelpunkt des Symposiums stand die Frage, wie **innovative neuartige Kerntechnologien** zur Sicherung einer nachhaltigen und stabilen Grundlastversorgung beitragen können, **komplementär unterstützend und nicht als Ersatz für regenerative Energieerzeugung**.

Globale Trends und der deutsche Weg

Die **Kernenergie** erlebt weltweit eine Renaissance als wichtiger Baustein in den Strategien zur Erreichung der **Klimaziele bis 2045**. Während viele Länder auf **neue Kernkraftwerke** setzen, um eine sichere und treibhausgasarme Energieversorgung zu gewährleisten, hat Deutschland mit dem beschleunigten **Atomausstieg** einen anderen Weg eingeschlagen und setzt vor allem auf **erneuerbare Energien**. Diese divergierenden Strategien bringen wichtige Fragen hinsichtlich der Versorgungssicherheit und der langfristigen Erreichung der **Klimaschutzziele** mit sich.

Ziele des Symposiums

Das englischsprachige Symposium bot eine Plattform für den internationalen und interdisziplinären Austausch zwischen führenden Expertinnen und Experten aus **Wissenschaft und Wirtschaft**. Ziel war es, die **Potenziale und Herausforderungen neuartiger Kerntechnologien**, einschließlich neuer Ansätze zur **Kernspaltung, Transmutation und Kernfusion**, sowie deren mögliche Rolle bei der **Wärmebereitstellung und Wasserstoffherstellung** zu diskutieren.

Die Diskussionen fanden in **vier thematischen Arbeitsgruppen** statt, die das Thema aus unterschiedlichen Perspektiven angingen:

- **Nuclear Fission and Transmutation**
- **Nuclear Fusion**
- **New Nuclear for Electricity, Hydrogen and Heat Generation in the Future Energy System**
- **Energy Economics and Society**

Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

Aus den intensiven Diskussionen und dem fachlichen Austausch wurden **zehn Handlungsempfehlungen** abgeleitet. Diese Empfehlungen sollen eine fundierte und faktenbasierte Grundlage für energiepolitische Entscheidungen bieten und die sachliche Diskussion über die zukünftige Rolle der Kernenergie in Deutschland fördern.

Wir stellen Ihnen diese Empfehlungen vorab zur Verfügung. Sie werden durch ausführliche Erläuterungen und wissenschaftliche Texte ergänzt und in einem **Weißbuch** veröffentlicht, das beim Verlag **TUM.University Press** erscheinen wird. Wir hoffen, dass diese Empfehlungen Teil der Überlegungen und Planungen zur zukünftigen **Energieversorgung** werden und einen wertvollen Beitrag zur Gestaltung einer nachhaltigen und sicheren **Energiezukunft** leisten können.

Technische Universität München

TUM Senior Excellence Faculty
Dr. Birgit Herbst-Gaebel
Arcisstr. 21
80333 München

+49 89 289 22092
herbst-gaebel@tum.de
www.emeriti-of-excellence.tum.de

Gestaltung

Steven Stannard
stannard.co

Preamble

A sustainable and secure energy supply is critical to the pursuit of the overarching goals of our society – social wellbeing, sustaining and promoting the economy, and maintaining a productive industrial capacity in Bavaria, Germany and Europe.

To ensure a prosperous future, the global energy infrastructure must meet four key objectives:

1. **Security of supply:** Reliable access to energy must be guaranteed to prevent disruptions that could affect economic and social stability.
2. **Sustainability:** Energy production must prioritize environmental and sustainable responsibility by minimizing greenhouse gas emissions, promoting long-term ecological balance and ensuring sustainable access to natural resources.
3. **Cost competitiveness:** Energy solutions must be economically viable to support growth and innovation without imposing excessive costs on society.
4. **Public acceptance:** Energy solutions must be socially acceptable, seeking widespread support through transparency, safety and demonstrable benefits.

Renewable energies and nuclear energy are complementary, and their combination is necessary for a financially viable, scalable and low greenhouse gas energy generation. A mix of these technologies is essential for a prosperous and sustainable future. Nuclear energy-based technologies provide a climate-friendly base load supply, which can limit the requirements of energy storage associated with renewables. They also facilitate the repowering of renewable systems for the combined generation of electricity, heat and synthetic fuels after 2045.

Präambel

Eine nachhaltige und sichere Energieversorgung ist von entscheidender Bedeutung, um die übergeordneten Ziele unserer Gesellschaft zu erreichen: sozialer Wohlstand, stabile Rahmenbedingungen für die Wirtschaft und der Erhalt einer leistungsfähigen Industrie – in Bayern, Deutschland und Europa.

Für die globale Energieinfrastruktur gibt es vier wesentliche Ziele, um Wohlstand und dynamische Entwicklung auch in Zukunft zu sichern:

1. **Versorgungssicherheit:** Ein zuverlässiger Zugang zu Energie muss gewährleistet sein, um Versorgungsunterbrechungen zu vermeiden; diese würden die wirtschaftliche und soziale Stabilität gefährden.
2. **Nachhaltigkeit:** Energieerzeuger und Verbraucher müsse ihre Verantwortung für Umwelt und Nachhaltigkeit ernst nehmen. Dazu gehört die treibhausgasarme und umweltschonende Nutzung der natürlichen Ressourcen.
3. **Wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit:** Energielösungen müssen wirtschaftlich tragfähig sein, um Wachstum und Innovation zu fördern, ohne der Gesellschaft übermäßige Kosten aufzuerlegen.
4. **Öffentliche Akzeptanz:** Energielösungen müssen gesellschaftlich akzeptabel sein und durch Transparenz, Sicherheit und nachweisbare Vorteile breite Unterstützung finden.

Erneuerbare Energien und Kernenergie sind komplementär, und ihre Kombination ist notwendig für eine finanzierbare, skalierbare und treibhausgasarme Energieerzeugung. Ein Mix dieser Technologien ist daher für eine Zukunft, geprägt durch Nachhaltigkeit und Wohlstand, unerlässlich. NNT-basierte Technologien ermöglichen eine klimafreundliche, substanzielle Grundlastversorgung, wodurch auch die notwendige Energiespeicherung eingedämmt werden kann. Sie erleichtert das Repowering erneuerbarer Systeme zur gekoppelten Erzeugung von Strom, Wärme und synthetischen Kraftstoffen nach 2045.

Recommendations

- 1 Investing in Talent Development**
- 2 Fostering Collaboration**
- 3 Securing Diverse Funding Sources**
- 4 Creating an Enabling Regulatory Environment for Innovation**
- 5 Transparent and Consistent Communication**
- 6 Technological and Supply Chain Sovereignty**
- 7 Reliability and Stability of the Energy System**
- 8 Infrastructure Supporting Fusion Research, Development and Deployment**
- 9 Advanced Modular Reactor (AMR) Demonstrator**
- 10 Acknowledge Spent Nuclear Fuel as a Valuable Resource**

Handlungsempfehlungen

- 1 In Talent-Entwicklung investieren**
- 2 Zusammenarbeit stärken**
- 3 Diverse Finanzierungsquellen sicherstellen**
- 4 Innovationsfreundliches Regulierungsumfeld schaffen**
- 5 Transparente und konsistente Kommunikation**
- 6 Technologie- und Lieferkettensouveränität**
- 7 Zuverlässige und stabile Energieversorgung**
- 8 Infrastruktur für Fusionsforschung, -Entwicklung und Markteinführung**
- 9 Advanced Modular Reactor (AMR) Demonstrator**
- 10 Abgebrannte Kernbrennstoffe als Ressource nutzen**

Explanatory Notes

1

Investing in Talent Development

The success of Novel Nuclear Technologies (NNT) depends on a well-educated workforce. We encourage the Bavarian government to establish academic chairs and teaching programs focused on NNT, and to expand academic programs in NNT, valuing existing assets.

The scientific environment at Munich/Garching is unique in that it encompasses both key technologies, fission and fusion.

Bavaria should leverage these assets to cultivate dedicated talent in the field of NNT, with the establishment of new professorships in physics, engineering, and radiochemistry. This will facilitate the creation of a distinctive ecosystem that bridges the gap between academia and applied research and development. Talent development will contribute to sustainable growth and long-term success in Bavaria by fostering expertise and leadership in NNT.

Talent development in the field of NNT should also be integrated into an international landscape, with Bavaria playing a key role. To further strengthen novel nuclear technologies and promote international cooperation, programs for visiting professorships and research stays should be established. This will allow Bavaria to benefit from the applied developments and innovations of other nations that continue to actively use nuclear technologies for energy production.

Erläuterungen

1

In Talent-Entwicklung investieren

Der Erfolg neuartiger Kerntechnologien (NNT) hängt von gut ausgebildeten Fachkräften ab. Wir ermutigen die Bayerische Staatsregierung, Lehrstühle und Lehrprogramme mit Schwerpunkt auf NNT an Universitäten einzurichten und unter Nutzung bestehender akademischer Programme im Bereich NNT auszubauen.

Das wissenschaftliche Umfeld in München/Garching ist einzigartig, da hier die beiden Schlüsseltechnologien Kernspaltung und Kernfusion stark verankert sind.

Bayern sollte diese Basis für eine gezielte Talentförderung im Bereich der NNT nutzen, angeführt von der Einrichtung neuer Professuren in Physik, Ingenieurwissenschaften und Radiochemie. Dadurch kann ein einzigartiges Ökosystem geschaffen werden, das die akademische Welt mit der angewandten Forschung und Entwicklung verbindet. Letztendlich trägt die Talententwicklung zu nachhaltigem Wachstum und langfristigen Erfolg bei, indem Fachwissen und Führungsqualitäten innerhalb Bayerns gefördert werden.

Die Talententwicklung im Bereich NNT sollte dabei auch in eine internationale Landschaft eingebettet sein, in der Bayern eine Schlüsselrolle einnimmt. Zur weiteren Stärkung neuartiger Kerntechnologien und zur Förderung internationaler Kooperationen sollten Programme für Gastprofessuren und Forschungsaufenthalte etabliert werden. Diese ermöglichen es, von den anwendungsorientierten Entwicklungen und Innovationen anderer Nationen zu profitieren, die Kerntechnologien weiterhin aktiv zur Energiegewinnung nutzen.

2

Fostering Collaboration

To advance nuclear technology, it is essential that universities, research institutions, industry, investors and start-ups collaborate at a Bavarian, German and European level. This can be best achieved by establishing a Bavarian interdisciplinary ecosystem that combines materials development, engineering, science and supply chains in fusion, fission and transmutation.

To advance nuclear technology, it is essential that universities, research institutions, industry, investors, and start-ups collaborate at the Bavarian, German, and European levels. The establishment of a Bavarian interdisciplinary ecosystem, supported by TUM and IPP, will facilitate this multifaceted collaboration. Such an ecosystem would integrate various fields, including materials development, engineering, science, and supply chain management, encompassing fusion, fission, and transmutation technologies. By fostering connections and partnerships among these diverse stakeholders and disciplines, the ecosystem will drive innovation, accelerate technological advancements and enhance the overall efficiency and effectiveness of nuclear technology development. It will allow simultaneous progress in all fields. This interdisciplinary approach guarantees comprehensive coverage of all relevant aspects of nuclear technology, from fundamental research to practical applications, industrial scalability and socio-economic acceptance.

2

Zusammenarbeit stärken

Um die Kerntechnik voranzubringen, müssen Universitäten, Forschungseinrichtungen, Industrie, Investoren und Start-ups auf bayerischer, deutscher und europäischer Ebene zusammenarbeiten. Dies kann durch den Aufbau eines interdisziplinären Ökosystems erleichtert werden, das Aspekte der Materialentwicklung, des Ingenieurwesens, der Wissenschaft und der Lieferketten in den Bereichen Fusion, Kernspaltung und Transmutation verbindet.

Um die Kerntechnik voranzubringen, müssen Universitäten, Forschungseinrichtungen, Industrie, Investoren und Start-ups auf bayerischer, deutscher und europäischer Ebene zusammenarbeiten. Diese vielfältige Zusammenarbeit kann durch den Aufbau eines bayerischen interdisziplinären Ökosystems unter der Leitung der TUM und des IPP in Garching weiter dynamisiert und kraftvoll gefördert werden. Ein solches Ökosystem würde verschiedene Bereiche wie Materialentwicklung, Ingenieurwissenschaften und Lieferkettenmanagement integrieren und Fusions-, Spaltungs- und Transmutationstechnologien umfassen. Durch die Förderung von Verbindungen und Partnerschaften zwischen diesen verschiedenen Akteuren und Disziplinen könnte das Ökosystem Innovationen anstoßen, technologische Fortschritte beschleunigen und die Gesamteffizienz und -wirksamkeit der Entwicklung von Kerntechnologien verbessern. So können in allen Bereichen parallel Fortschritte erzielt werden. Dieser interdisziplinäre Ansatz gewährleistet, dass alle relevanten Aspekte der Kerntechnik von der Grundlagenforschung bis zu praktischen Anwendungen, industrieller Skalierbarkeit und sozioökonomischen Akzeptanz umfassend behandelt werden.

3

Securing Diverse Funding Sources

Robust, long-term funding is needed for the successful deployment of NNT, and to meet the growing needs of research and industry. We advocate a mix of public funding, private investment and public-private partnerships.

Securing robust and long-term funding is vital for the advancement of NNT. It would be strategically advantageous for the Bavarian government to pursue a combination of private investment, public funding and private-public partnerships (PPP).

By studying successful international models for technology development such as Oxford University spin-outs, and the SpaceX/NASA partnership, it is possible to gain valuable insights into effective funding strategies. There are a number of key success factors for such projects, including risk distribution, contract duration, governance structure, management structures, cost control and public engagement. The implementation of long-term planning with clearly defined milestones is an effective strategy for project management and budget compliance.

It is essential to identify innovative, market-oriented solutions while maintaining the highest standards of quality and safety.

3

Diverse Finanzierungsquellen sicherstellen

Die erfolgreiche Einführung neuartiger Kerntechnologien erfordert eine solide und langfristige Finanzierung. Nur so kann der wachsende Bedarf in Forschung und Industrie gedeckt werden. Wir setzen uns für eine Kombination aus öffentlicher Finanzierung, privaten Investitionen und öffentlich-privaten Partnerschaften ein.

Die Finanzierung ist für die Entwicklung neuer Kerntechnologien entscheidend. Die bayerische Staatsregierung sollte eine Mischung aus privaten Investitionen, öffentlicher Finanzierung und öffentlich-privaten Partnerschaften (PPP) anstreben.

Durch die Untersuchung erfolgreicher internationaler Modelle für die Technologieentwicklung, wie z. B. Spin-outs der Universität Oxford und die SpaceX/NASA-Partnerschaft, ist es möglich, wertvolle Einblicke in erfolgreiche Finanzierungsstrategien zu gewinnen. Das Lernen von den Besten in anderen Ländern wird dazu beitragen, den Blickwinkel zu erweitern. Mehrere Faktoren tragen zum Erfolg solcher Projekte bei, darunter Risikoverteilung, Vertragsdauer, Leitungsstruktur, Managementstrukturen, Kostenkontrolle und öffentliches Engagement. Eine langfristige Planung mit definierten Meilensteinen fördert ein effizientes Projektmanagement und die Einhaltung von Budgets.

Bei der Entwicklung neuer Lösungen sind zwei wesentliche Aspekte zu berücksichtigen: Einerseits müssen innovative und marktorientierte Ansätze verfolgt werden, andererseits ist die Einhaltung hoher Qualitäts- und Sicherheitsstandards unerlässlich.

4

Creating an Enabling Regulatory Environment for Innovation

Regulatory frameworks have a significant impact on the cost and development of technological innovations such as NNT. We encourage policymakers to create an enabling regulatory environment at the state, federal and European levels. Streamlining the approval and licensing processes while maintaining stringent safety standards is essential to foster innovation and reduce costs.

The overarching objective in the operation of a nuclear installation is to ensure safety, with licensing procedures aligned to rigorous safety standards. However, overly bureaucratic and impractical regulatory approaches have a significant impact on the cost and development of NNT. Establishing clear, objective, and standardized evaluation criteria ensures that decisions are consistent, transparent, permit cost efficiency and are based on scientific evidence and best technological practice. This will increase confidence in the regulatory process, promote fairness, and foster a more predictable environment for innovation and development in the nuclear sector.

4

Innovationsfreundliches Regulierungsumfeld schaffen

Regulatorische Rahmenbedingungen beeinflussen die Kosten und die Entwicklung von technischen Innovationen wie neuartiger Kerntechnologien erheblich. Wir ermutigen die politischen Entscheidungsträger, ein förderliches regulatorisches Umfeld auf Landes-, Bundes- und europäischer Ebene zu schaffen. Die Vereinfachung der Genehmigungs- und Lizenzierungsprozesse unter Beibehaltung hoher Sicherheitsstandards ist entscheidend, um Innovationen zu fördern und Kosten zu senken.

Die Sicherheit nuklearer Anlagen hat oberste Priorität und die Lizenzierung muss strengen Sicherheitsstandards genügen. Allerdings haben stark administrative und nichtpragmatische Ansätze innerhalb des regulatorischen Rahmens erhebliche Auswirkungen auf die Kosten und die Entwicklung neuartiger Kerntechnologien. Die Festlegung klarer, objektiver und standardisierter Bewertungskriterien stellt sicher, dass Entscheidungen konsistent und transparent sind, Kosteneffizienz ermöglichen und auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und technologischen Best Practices basieren. Diese Unabhängigkeit stärkt das Vertrauen in den Regulierungsprozess, fördert Fairness und schafft ein berechenbares Umfeld für Innovationen und Entwicklungen im Nuklearsektor.

5

Transparent and Consistent Communication

Targeted communication is crucial for public acceptance. We advocate that all stakeholders, including policy makers, pursue a transparent and consistent communication strategy that realistically presents both the benefits and the challenges of NNT. Lighthouse projects (see recommendations 8 to 10) facilitate the demonstration of the practical feasibility and benefits of these technologies and enable a broad identification with them.

There has been a notable lack of public awareness and education on nuclear technologies in Germany over the past three decades. This fostered a general perception that nuclear technologies are risky, unnecessary, costly, and driven by a purely profit-oriented industry. Furthermore, there is a perception that nuclear energy competes with renewable sources rather than being a necessary and complementary part of a secure and affordable energy system. It is therefore essential that education addresses all levels, from schools to the adult public. It is important to provide an explanation of the scientific background, present fact-based evidence, and generate enthusiasm for new developments and novel technologies, which can promote societal benefits. Communication should be transparent and address all issues, including risks, their assessment and mitigation. The promotion of NNT must originate from research, science and industry, but it must also be openly encouraged by policymakers.

5

Transparente und konsistente Kommunikation

Eine Kommunikation, die ihre Zielgruppen erreicht, ist für die Akzeptanz in der Öffentlichkeit entscheidend. Wir plädieren dafür, dass alle Beteiligten, einschließlich der politischen Entscheidungsträger, eine transparente und konsistente Kommunikationsstrategie verfolgen, die sowohl die Vorteile als auch die Herausforderungen von NNT realistisch darstellt. Leuchtturmprojekte (siehe Empfehlungen 8 bis 10) erlauben die Demonstration der praktischen Machbarkeit und des Nutzens dieser Technologien und ermöglichen eine breite Identifizierung mit diesen.

In den letzten 30 Jahren wurden die Chancen der Kerntechnologien in Deutschland in der Öffentlichkeit kaum wahrgenommen und kommuniziert. Dies hat die weit verbreitete Ansicht gefördert, dass Kerntechnologien gefährlich, überflüssig und teuer seien und von einer ausschließlich profitorientierten Industrie betrieben würden. Außerdem wird die Förderung der Kernenergie als Konkurrenz zu den erneuerbaren Energien gesehen und nicht als notwendiger und ergänzender Bestandteil eines sicheren und bezahlbaren Energiesystems. Die Information muss sich daher an alle Ebenen richten, von der Schule bis hin zur erwachsenen Öffentlichkeit. Sie sollte den wissenschaftlichen Hintergrund erklären, an die faktenbasierte Erfolgsgeschichte erinnern, Begeisterung für neue Entwicklungen und neuartige Technologien wecken und den Nutzen für die Gesellschaft herausstellen. Die Kommunikation sollte alle Themen transparent ansprechen, einschließlich der Risiken und ihrer Bewertung. Die Öffentlichkeitsarbeit muss sowohl von Forschung, Wissenschaft und Industrie ausgehen, als auch von den politischen Entscheidungsträgern mitgetragen werden.

6

Technological and Supply Chain Sovereignty

We encourage the Bavarian government, together with the federal government and European partners, to ensure reliable, resilient and sovereign supply chains for NNT, for example for tritium, lithium, high-assay low-enriched uranium (HALEU), mixed oxide fuel (MOX). In addition, the preservation and development of domestic expertise is critical to success.

Bavaria should maintain strategic control over the technology and supply chains associated with critical nuclear materials. To achieve this level of autonomy, Bavaria should collaborate closely with the federal government and European partners. It is of critical importance to guarantee a stable and autonomous supply of critical nuclear materials in order to ensure the region's energy security, as they are vital for the operation and advancement of both current and next-generation nuclear reactors (fusion and fission).

Tritium and lithium are essential for fusion research and the development of future fusion reactors, while uranium enriched between 5 and 20% (HALEU) and mixed oxide fuel (MOX) are key to enhancing the efficiency and sustainability of fission reactors. By engaging in collaborative initiatives, Bavaria can reduce its reliance on external suppliers, mitigate risks associated with geopolitical tensions, and promote local innovation and technological leadership. Such partnerships will reinforce Bavaria's global position in the nuclear sector, stimulate economic growth, create employment opportunities and facilitate the development of high-tech industries.

6

Technologie- und Lieferkettensoveränität

Wir bitten die Bayerische Staatsregierung, gemeinsam mit der Bundesregierung und den europäischen Partnern verlässliche, sichere und belastbare Rohstoffversorgungsketten für NNT sicherzustellen, z.B. für Tritium, Lithium, high-assay low-enriched Uran und Mischoxid-Brennstoff. Darüber hinaus ist der Erhalt und Ausbau des nationalen Know-hows von entscheidender Bedeutung für eine erfolgreiche Umsetzung.

Die Souveränität der Technologie- und Lieferketten für kritische, kerntechnische Materialien ist für Bayern von höchster Bedeutung. Zur Sicherung dieser Souveränität sollte Bayern eng mit der Bundesregierung und den europäischen Partnern zusammenarbeiten. Die Sicherstellung einer stabilen und autonomen Versorgung mit diesen Ressourcen ist für die Energiesicherheit der Region von entscheidender Bedeutung, da sie für den Betrieb und die Weiterentwicklung sowohl der heutigen als auch der nächsten Generation von Kernreaktoren (Fusion und Fission) unverzichtbar sind.

Tritium und Lithium sind für die Fusionsforschung und mögliche zukünftige Fusionsreaktoren unverzichtbar, während Uran mit Anreicherungen zwischen 5 und 20 % (HALEU) und Mischoxidbrennstoff (MOX) der Schlüssel zur Verbesserung der Effizienz und Nachhaltigkeit von Kernspaltungsreaktoren sind. Durch gemeinsame Anstrengungen kann Bayern seine Abhängigkeit von externen Quellen verringern, die Risiken geopolitischer Spannungen mindern und die lokale Innovation und Technologieführerschaft fördern. Solche Partnerschaften stärken Bayerns Position in der globalen Nuklearlandschaft, fördern das Wirtschaftswachstum und unterstützen die Schaffung von Arbeitsplätzen sowie die Entwicklung von High-Tech-Industrien.

7

Reliability and Stability of the Energy System

To ensure a reliable, greenhouse-gas-free energy supply (Energiewende) and to address the intermittency of renewables, we advocate for a significant share of dispatchable technologies, including NNT. This will make the German power system more robust, stable, and cost-efficient.

The German government's objective is to achieve its greenhouse gas emissions goal by 2045, primarily through increased efficiency and the use of renewable energy. By then, electricity consumption is expected to have doubled. The electricity sector will be characterized by decentralized structures and a high degree of sector coupling. The intermittent nature of renewable energy sources results in significant temporary and local discrepancies between electricity supply and demand. It is essential to balance these fluctuations through import and export, load management, storage and hydrogen production. Other criteria for the design of the energy system (e.g. circular economy, sovereignty, availability of materials, public acceptance) should also be taken into account. This complexity poses a significant challenge to the maintenance of the current high level of system reliability.

It is expected that NNT will become a secure, flexible, low-greenhouse-gas, reliable and dispatchable energy source by 2045, provided that we develop novel fission technologies and industrialize fusion technologies from today onwards. This will provide an effective complement to the intermittency of renewables and reduce political dependencies of our energy system.

7

Zuverlässige und stabile Energieversorgung

Um eine zuverlässige, treibhausgasfreie Energieversorgung zu erreichen (Energiewende) und die Volatilität der erneuerbaren Energien auszugleichen, empfehlen wir den Einsatz signifikanter Anteile regelbarer Technologien wie NNT, um das deutsche Stromsystem robuster, stabiler und kosteneffizienter zu machen.

Das Treibhausgasziel der Bundesregierung für 2045 soll vor allem durch mehr Effizienz und erneuerbare Energien erreicht werden. Es wird erwartet, dass sich der Stromverbrauch bis dahin mehr als verdoppelt. Die Intermitenz der erneuerbaren Energien führt zu erheblichen temporären und lokalen Leistungsasymmetrien zwischen Erzeugung und Verbrauch. Diese müssen durch Import und Export, durch Lastmanagement sowie durch Speicherung und Wasserstoffherzeugung ausgeglichen werden. Angesichts dieser Komplexität ist es eine Herausforderung, die aktuell als selbstverständlich geltende, sehr hohe Systemstabilität weiter zu erhalten. Dabei sollten auch weitere Kriterien für die Gestaltung des Energiesystems (z.B. Kreislaufwirtschaft, Souveränität, Verfügbarkeit von Materialien, öffentliche Akzeptanz) berücksichtigt werden. Wir sollten daher für alle innovativen technischen Optionen aufgeschlossen sein.

Wir erwarten, dass neuartige Kerntechnologien voraussichtlich ab 2045 in ausreichendem Maße als sichere, flexible, treibhausgasarme, zuverlässige und stets disponible Energiequelle zur Verfügung stehen. NNT sind somit ideal geeignet, die fluktuierenden erneuerbaren Energien zu ergänzen und bestehende politische Abhängigkeiten zu reduzieren. Voraussetzung ist, dass wir ab sofort neuartige Kernspaltungstechnologien und die Industrialisierung von Fusionstechnologien konsequent vorantreiben.

8

Infrastructure Supporting Fusion Research, Development and Deployment

We recommend that the Bavarian State Government, together with the Federal Government and European partners, promotes the infrastructure to support fusion research and development, including new test facilities for the various fusion technologies. Access to these facilities should be available to the entire ecosystem (see recommendation 2).

To facilitate the development of the first fusion reactors, it is necessary to build additional key infrastructure:

- A 14.1 MeV high intensity neutron source is required to simulate fusion neutrons and their interaction in blanket materials for tritium breeding and neutron multiplication. This source will serve as a materials irradiation test facility and will benefit all communities involved in fusion research. Such a facility (IFMIF-DONES) is currently under discussion at European and German (Helmholtz Association) level. Bavaria should support this initiative, for example by strengthening the capabilities for materials testing and analysis with neutrons in Bavaria (FRM II, AMR – mentioned in Recommendation 9 – providing 2 MeV neutron irradiation at very high fluxes).
- A high-power multi-port laser facility to test concepts for inertial confinement fusion.

→

8

Infrastruktur für Fusionsforschung, -Entwicklung und Markteinführung

Wir empfehlen, dass die Bayerische Staatsregierung gemeinsam mit der Bundesregierung und den europäischen Partnern Maßnahmen ergreift, um die Infrastruktur zur Unterstützung der Fusionsforschung und -entwicklung, einschließlich neuer Testanlagen für die verschiedenen Fusionstechnologien, zu fördern. Der Zugang zu diesen Einrichtungen sollte für das gesamte Ökosystem möglich sein (siehe Empfehlung 2).

Um die Entwicklung der ersten Fusionsreaktoren zu erleichtern, ist es notwendig, zusätzliche wichtige Infrastrukturen aufzubauen:

- Eine 14,1 MeV-Neutronenquelle hoher Intensität ist erforderlich, um Fusionsneutronen und ihre Wechselwirkung in Blanket-Materialien zur Tritiumherzeugung und Neutronenvermehrung zu simulieren. Diese Quelle wird als Testanlage für die Bestrahlung von Materialien dienen und allen an der Fusionsforschung beteiligten Gruppen zugute kommen. Eine solche Anlage (IFMIF-DONES) wird derzeit auf europäischer und deutscher Ebene (Helmholtz-Gemeinschaft) diskutiert. Bayern sollte diese Initiative unterstützen, z.B. durch den Ausbau der Kapazitäten für Materialprüfung und -analyse mit Neutronen in Bayern (FRM II, AMR – erwähnt in Empfehlung 9 – bieten 2 MeV Neutronenbestrahlung bei sehr hohen Flüssen).
- Eine Hochleistungs-Multiport-Laseranlage zur Erprobung von Konzepten für die Trägheitseinschlussfusion.

→

- A large-scale magnetic confinement fusion pilot facility/experiment can be hosted and supported by Bavaria, building on the long experience and expertise available at the Garching campus, where magnetic confinement fusion experiments have been successfully operated for a long time. Such a facility should not only contribute to the development of fusion energy by filling scientific and technological gaps, but will also be essential for educational purposes and workforce development. Such a test facility is not currently available and is a prerequisite for the industrial manufacture of a full-scale magnetic coil system.

Access to this infrastructure should be made available to both public and private partners, with the possibility of a payment scheme for the private sector.

We believe that the creation of this infrastructure should be a European undertaking, attracting European partners/industry/collaborators. It is essential that this initiative is closely linked to scientific expertise, both in terms of academic collaboration and geographical proximity.

- Eine groß angelegte Pilotanlage/ein groß angelegtes Experiment zur Fusion mit magnetischem Einschluss kann von Bayern beherbergt und unterstützt werden, aufbauend auf der langjährigen Erfahrung und Expertise am Campus Garching, wo seit langem erfolgreich Experimente zur Fusion mit magnetischem Einschluss durchgeführt werden. Eine solche Anlage würde nicht nur zur Entwicklung der Fusionsenergie beitragen, indem sie wissenschaftliche und technologische Lücken schließt, sondern wäre auch für die Ausbildung von Mitarbeitern unerlässlich. Eine solche Versuchsanlage steht derzeit nicht zur Verfügung und ist Voraussetzung für die industrielle Fertigung eines Magnetpulensystems in Originalgröße.

Der Zugang zu dieser Infrastruktur sollte sowohl öffentlichen als auch privaten Partnern offen stehen, wobei für den privaten Sektor eine Kostenbeteiligung entwickelt werden sollte.

Wir sind der Meinung, dass die Schaffung dieser Infrastruktur eine europäische Initiative sein sollte, die europäische Partner/Industrie/Kollaborateure anzieht. Es ist wichtig, dass diese Initiative eng mit wissenschaftlicher Expertise verbunden ist, sowohl in Bezug auf akademische Zusammenarbeit als auch in Bezug auf geografische Nähe.

9

Advanced Modular Reactor (AMR) Demonstrator

We recommend that the Bavarian state government creates the framework for a technology development and training platform in the form of a demonstrator for an Advanced Modular Reactor (AMR) as a Bavarian lighthouse project.

The most efficient training can be conducted on a physical demonstrator. Furthermore, such a demonstrator provides the foundation for pioneering research and drives the development of a supporting infrastructure and supply chain.

The construction of an Advanced Modular Reactor (AMR) demonstrator will not only reinforce Bavaria's position as a leading research hub but also safeguard training in fission technologies, including safety analyses, radioisotope production and energy research.

Garching with the FRM II appears to be an optimal location for this pioneering project, as the existing infrastructure for security and technology can be leveraged. Together with industrial partners, TUM should design the AMR to serve multiple purposes, including the provision of neutrons for research, in particular fast neutrons for fusion research, district heating and the production of medical radioisotopes.

The successful commissioning and operation of the AMR on the TUM campus in Garching will make a significant contribution to achieving the campus net-zero goals. It will also serve as a Bavarian flagship project, demonstrating the viability of the joint use of a novel nuclear technology.

9

Advanced Modular Reactor (AMR) Demonstrator

Wir empfehlen der Bayerischen Staatsregierung, den Rahmen für eine Technologieentwicklungs- und Ausbildungsplattform in Form eines Demonstrators für einen Advanced Modular Reactor (AMR) als bayerisches Leuchtturmprojekt zu schaffen.

Die effizienteste Ausbildung findet an einem real existierenden Demonstrator statt. Darüber hinaus dient der Bau eines solchen Demonstrators als Keimzelle für Spitzenforschung und fördert den Aufbau unterstützender Infrastruktur und Lieferketten.

Ein AMR-Demonstrator stärkt nicht nur den Forschungsstandort Bayern, sondern er sichert auch die Ausbildung im Bereich der Kernspaltungstechnologien, einschließlich Sicherheitsanalysen, Radioisotopenproduktion und Energieforschung.

Der Standort Garching mit dem FRM II bietet sich aufgrund der bereits vorhandenen und weiter nutzbaren Infrastruktur für ein solches Leuchtturmprojekt an. Gemeinsam mit Industriepartnern sollte die TUM den AMR so auslegen, dass er mehrere wissenschaftliche Ziele erfüllen kann, darunter die Bereitstellung von Neutronen für die Forschung, insbesondere von schnellen Neutronen für die Fusionsforschung, für die Erforschung einer effizienten und zuverlässigen Fernwärmeversorgung und für die Produktion medizinischer Radioisotope.

Die erfolgreiche Inbetriebnahme des AMR auf dem TUM-Campus in Garching wird einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Net-Zero-Ziele („Treibhausgasfrei“) des Campus leisten und damit als bayerisches Vorzeigeprojekt die Machbarkeit der gemeinsamen Nutzung einer neuartigen Nukleartechnologie demonstrieren.

Acknowledge Spent Nuclear Fuel as a Valuable Resource

Spent nuclear fuel is a valuable resource. We encourage providing access, enabling research and setting up boundary conditions to exploit the full potential of this resource, for example in medical applications. This should be achieved by enabling industry to build, for example, a transmutation facility. Mining and minimization of waste will have a significant impact on repository requirements.

The value of spent nuclear fuel is increasingly being recognized as a valuable resource in its own right, rather than merely as waste. This change in perspective is driven by the substantial energy still present in spent nuclear fuel, which can be harnessed through NNT, such as transmutation. Conditioning of spent fuel allows the recovery of usable fissile materials, such as uranium and plutonium, which can be used to produce new reactor fuel.

This not only extends the fuel supply, but also reduces the volume and toxicity of nuclear waste, thereby mitigating long-term storage challenges. The reduction of waste has a significant impact on the requirements of repositories, decreasing the space and resources needed for safe disposal. Furthermore, the creation of a transmutation facility that can utilize spent nuclear fuel increases its value, contributing to a more sustainable and efficient nuclear energy cycle. The utilization of spent nuclear fuel as a resource is aligned with the objectives of energy security, environmental sustainability and technological advancement within the nuclear sector.

The successful scientific development of transmutation must be decisively supported politically and transparently communicated.

Abgebrannte Kernbrennstoffe als Ressource nutzen

Abgebrannte Brennelemente sind eine wertvolle Ressource. Wir sprechen uns dafür aus, Zugang zu gewähren, Forschung zu ermöglichen und Rahmenbedingungen zu schaffen, um das Potenzial dieser Ressource z.B. für medizinische Anwendungen zu nutzen. Dazu sollte der Industrie die Möglichkeit gegeben werden, z.B. Transmutationsanlagen zu bauen. Die Nutzung von Abfällen als wertvolle Rohstoffe und die Minimierung des Abfallaufkommens werden die Anforderungen an die Endlagerung radioaktiver Abfälle wesentlich beeinflussen.

Abgebrannte Brennelemente sind als wertvolle Ressource und nicht primär als Abfall zu betrachten. Der Grund für diese veränderte Sichtweise liegt in der beträchtlichen Menge an Energie, die in abgebrannten Brennelementen enthalten ist und die mittlerweile durch neuartige Kerntechnologien – wie die Transmutation – nutzbar gemacht werden kann. Die Konditionierung abgebrannter Brennelemente ermöglicht die Rückgewinnung von nutzbaren Spaltstoffen wie Uran und Plutonium, die zur Herstellung neuer Brennelemente verwendet werden können.

Diese Anwendungen erhöhen nicht nur den global vorhandenen Brennstoffvorrat, sondern verringern auch das Volumen und die Toxizität der nuklearen Abfälle, und damit die Probleme der langfristigen Lagerung. Darüber hinaus kann eine Transmutationsanlage abgebrannte Brennelemente als Brennstoff nutzen und so zu einem nachhaltigen und effizienten Brennstoffkreislauf beitragen.

Die Nutzung abgebrannter Brennelemente als Ressource unterstützt die Ziele der Energiesicherheit, der ökologischen Nachhaltigkeit und der technologischen Innovation im Nuklearsektor.

Die erfolgreiche wissenschaftliche Entwicklung der Transmutation muss politisch entschieden unterstützt und transparent kommuniziert werden.

Conclusion

The development of Novel Nuclear Technologies is essential for a resilient and sustainable energy scenario that ensures economic prosperity.

Bavaria, with its excellent universities, large number of outstanding research institutions and facilities embedded in a dynamic and fertile economic environment with strong industrial partners is uniquely positioned in Germany and Europe to drive this transition.

In order for Novel Nuclear Technologies to contribute to Germany's energy supply by the middle of this century, these recommendations should be addressed by decision-makers with the utmost urgency.

Schlussfolgerung

Die Entwicklung neuartiger Kerntechnologien ist eine wesentliche Voraussetzung für ein zukunftsfähiges und nachhaltiges Energieszenario, das wirtschaftlichen Wohlstand sichert.

Bayern, mit seinen exzellenten Universitäten, zahlreichen herausragenden Forschungsinstituten und -einrichtungen, eingebettet in ein dynamisches und fruchtbares wirtschaftliches Umfeld mit starken industriellen Partnern, ist in Deutschland und Europa einzigartig positioniert, um diesen Transformationsprozess voranzutreiben.

Damit neuartige Kerntechnologien ab Mitte dieses Jahrhunderts einen Beitrag zur Energieversorgung in Deutschland leisten können, sollten diese Empfehlungen von Entscheidungsträgern mit größter Dringlichkeit aufgegriffen werden.

Participants & Organizers

Plenary talk

Prof. Jan-Dietrich Wörner | [President of acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften](#)

Working Group I | Nuclear Fission and Transmutation

Chair: [Dr. Christian Reiter](#), [Prof. Bastian Märkisch](#) & [Prof. Peter Fierlinger](#)

Participant & Author	Affiliation	
Dr. Manuele Aufiero	Milano Multiphysics, Milano	Participant & Author
Oliver Buck	ITM Isotope Technologies Munich SE	Participant & Author
Prof. Peter Fierlinger	TUM, Precision Measurements at Extreme Conditions	Participant & Author
Dr. Emil Fridman	Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf	Participant & Author
Prof. Bastian Märkisch	TUM, Particle Physics	Participant & Author
Dr. Massimo Marino	<i>newcleo</i> SA – Geneva	Participant & Author
Dr. Christian Reiter	TUM FRM II & McMaster, Canada, Nuclear Technology	Participant & Author
Dr. Franz Strohmer	Transmutex, Geneva	Participant & Author
Dr. Ville Valtavirta	VTT Technical Research Centre of Finland	Participant & Author
Prof. Goran Galic	McMaster University, Canada	Author
Prof. Jaakko Leppänen	VTT Technical Research Centre of Finland	Author
Prof. Dave Novog	McMaster University, Canada	Author

Working Group II | Nuclear Fusion

Chair: [Prof. Stephan Paul](#) & [Prof. Reinhard Kienberger](#)

Name	Affiliation	
Dr. Monica Pepe Altarelli	CERN & Istituto Nazionale de Fisica (INFN), Italy	Participant & Author
Dr. Frederick Bordry	GAUSS Fusion GmbH	Participant & Author
Dr. Richard Kembleton	GAUSS Fusion GmbH	Participant & Author
Prof. Dr. Reinhard Kienberger	TUM, Laser & X-ray Physics	Participant & Author
Dr. Alexander von Müller	Max Planck Institute for Plasma Physics	Participant & Author
Prof. Stephan Paul	TUM, Nuclear-, Astro- & Particle Physics	Participant & Author
Dr. Marius Schollmeier	Marvel Fusion GmbH	Participant & Author
Prof. Dr. Wolfgang Theobald	Focused Energy Inc. and University of Rochester	Participant & Author
Dr. Gaetano Bongiovi	EUROfusion & University of Palermo, Italy	Author
Dr. Lucio Milanese	Proxima Fusion GmbH	Author
Prof. Dr. Markus Roth	Focused Energy Inc. and TU Darmstadt	Author

Working Group III | New Nuclear for Electricity, Hydrogen and Heat Generation in the Future Energy Systems

Chair: [Prof. Ulrich Wagner](#) & [Prof. Winfried Petry](#)

Name	Affiliation	
Dr. Daniel Iracane	Académie des Technologies, France	Participant & Author
Prof. Winfried Petry	TUM, FRM II, Physics, Senior Excellence Faculty	Participant & Author
Dr. Peter Tzscheutschler	TUM, Power Transmission Systems	Participant & Author
Prof. Ulrich Wagner	TUM, Energy Economy, Senior Excellence Faculty	Participant & Author
Stefan Henn	Wacker Chemie Burghausen	Participant
Prof. Frank Messerer	TUM & Bayerisches Staatsministerium Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie	Participant
Prof. Hartmut Spliethoff	TUM, Energy Systems	Author

Working Group IV | Energy Economics and Society

Chair: [Prof. Michael Molls](#)

Name	Affiliation	
Prof. Gunther Friedl	TUM School of Management	Participant & Author
Dr. Birgit Herbst-Gaebel	TUM, Senior Excellence Faculty	Participant & Author
Kornelia Kneissl	Kornelia Kneissl Signature – Stakeholder Management	Participant & Author
Prof. Michael Molls	TUM, MRI, IAS, Senior Excellence Faculty	Participant & Author
Dr. Jeanne Rubner	TUM, Vice President Communication	Participant & Author
Franklin Servan-Schreiber	Transmutex SA, Geneva	Participant & Author
Prof. Robert Frhr. v. Weizsäcker	TUM, Economics, Senior Excellence Faculty	Participant & Author
Prof. Roberto Giuntini	University of Cagliari & IAS Prof. in Residence	Author
Prof. Christoph Lütge	TUM, Business Ethics	Author

Organizers

- Prof. Winfried Petry | [TUM, Chair Working Group III](#)
- Prof. Stephan Paul | [TUM, Chair Working Group II](#)
- Prof. Michael Molls | [TUM, Chair Working Group IV](#)
- Prof. Peter Fierlinger | [TUM, Chair Working Group I](#)
- Dr. Birgit Herbst-Gaebel | [TUM, Overall Organization, Working Group IV](#)
- Prof. Reinhard Kienberger | [TUM, Chair Working Group II](#)
- Prof. Bastian Märkisch | [TUM, Chair Working Group I](#)
- Dr. Monika Pepe Altarelli | [CERN, Working -Group I](#)
- Dr. Christian Reiter | [McMaster/FRM II, Chair Working Group I](#)

