



# MISSION KERNFUSION

## Empfehlungen der Bayerischen Expertenkommission

## **Impressum**

### **Herausgeber**

Bayerische Expertenkommission Mission Kernfusion

Vorsitzender: Prof. Dr. Robert Schlögl

Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Text: Dr. Andrea Lübcke (acatech) im Auftrag der Expertenkommission

Konzept und Gestaltung: Externe Kommunikation, StMWK

# Im Überblick

<b>1. Executive Summary</b>	<b>3</b>
<b>2. Auftrag und Arbeitsweise</b>	<b>6</b>
2.1. Zusammensetzung der Expertenkommission	8
<b>3. Mapping der bayerischen Hochschul- und Forschungslandschaft</b>	<b>10</b>
3.1. Auswertung und Analyse der Hochschulumfrage	10
3.2. Anbindung an außerbayerische Forschungseinrichtungen	12
<b>4. Ergebnisse Industriefusionsworkshop</b>	<b>13</b>
<b>5. Empfehlungen</b>	<b>16</b>
5.1. Allgemeine Empfehlungen	16
5.2. Fusionscluster	17
5.3. Einrichtung von Professuren und Nachwuchsgruppen	19
5.4. Studiengänge	24
5.5. Fusion Campus	25
5.6. Präsentation des Maßnahmenpapiers in der Community und in der Öffentlichkeit	26
5.7. Struktur der Ressourcenansätze	27
5.8. Fahrplan für die Expertenkommission zur Umsetzung der weiteren Aufgaben aus dem Masterplan	28

Das Empfehlungspapier wurde am 11. Februar 2025 von der Expertenkommission an die auftraggebende Bayerische Staatsregierung, z. H. Herrn Ministerpräsident Dr. Markus Söder, übergeben.

## 1. Executive Summary

Dieses Papier präsentiert die Ergebnisse der Expertenkommission Kernfusion und enthält strategische Empfehlungen, um Bayern als Innovationsstandort im globalen Wettbewerb um die Kernfusion zu positionieren. Die zentralen Maßnahmen zielen darauf ab, ein leistungsfähiges Fusionsökosystem zu schaffen und den Freistaat nachhaltig in Forschung, Ausbildung und Technologieentwicklung zu stärken.

### **Zentrale Empfehlungen:**

#### **1. Ausbildungsinitiative:**

Aufbau neuer Professuren, Nachwuchsgruppen und Studiengänge, einschließlich eines bayernweit organisierten Masterstudiengangs „Nuclear Fusion Technologies“, um die Basis für qualifiziertes Fachpersonal zu schaffen.

#### **2. Bavarian Fusion Cluster:**

Etablierung eines Clusters zur Vernetzung von Wissenschaft, Industrie und internationalen Partnern. Der Cluster soll den Austausch von Know-how fördern, Verbundforschung finanzieren und die Ausbildung koordinieren.

#### **3. Fusion Campus:**

Entwicklung eines zentralen Standorts mit Infrastruktur für technologieoffene Experimente. Diese Plattform soll die Forschung und Industrie in Bayern stärken und den Weg zur Umsetzung eines Fusionskraftwerks ebnen.

#### **4. Internationale Vernetzung:**

Ausbau der Kooperation mit nationalen, europäischen und internationalen Partnern, um Synergien zu nutzen und Bayern in der Fusionsforschung global sichtbar zu machen.

Dieses Papier entstand durch intensive Diskussionen innerhalb der Expertenkommission. Es spiegelt eine abgestimmte Position wider, die vielfältige Perspektiven berücksichtigt und wurde durch die Kommission einstimmig beschlossen.

Mit den hier vorgeschlagenen Maßnahmen legt das Papier eine strategische Grundlage, um die Kernfusion in Bayern voranzutreiben, die Forschung zu stärken und einen Beitrag für die Transformation zu einem klimafreundlichen Energiesystem der Zukunft zu leisten.

Die folgende Übersicht über empfohlene Maßnahmen kennzeichnet diejenigen, die in 2025 begonnen werden sollten. Alle folgenden Maßnahmen müssten unmittelbar danach angegangen werden. Weiter wird angezeigt, welche Maßnahmen in den ausgelobten einhundert Millionen Euro bis 2028 enthalten sind und für welche Maßnahmen zusätzliche Mittel erforderlich wären.

<b>Empfehlung</b>	<b>Umsetzung in 2025</b>	<b>davon innerhalb der 100-Mio.-Euro-An- kündigung bis 2028</b>	<b>darüber hinaus erforderlich</b>
5.2-1 Berufung der Leitung des Fusion Clusters	X	X	
5.2-2 Konzeption und Aufbau des Fusion Clusters	X	X	
5.2-3 Ausstattung des Fusion Clusters mit Projektmitteln	X	X	
5.3-1 Ausschreibung von Lehrstühlen, Prio. I, Dringl. 1	X	X	
5.3-2 Ausschreibung von Lehrstühlen, Prio. I, Dringl. 2	X	X	
5.3-3 Ausschreibung von Lehrstühlen, Prio. II			X
5.3-4 Ausschreibung von NWG, Prio. I, Dringl. 1		X	
5.3-5 Ausschreibung von NWG, Prio. I, Dringl. 2			X
5.3-5 Ausschreibung von NWG, Prio. II			X
5.3-6 Ausschreibung weiterer Lehrstühle und NWG (vgl. 4.7)			X
5.4-1 Einrichtung des Masterstudiengangs NFT		X	
5.4-2 Einrichtung des bayerischen Graduiertenkollegs KF		X	
5.5-1 Sicherung eines Standorts für den Fusion Campus	X		
5.5-2 Entwicklung und Ausbau des Fusion Campus in Kooperation mit der Industrie (vgl. 5.1)			X
5.5-3 Aufbau von Infrastrukturen und Geräten in natl./intl. Kooperation (vgl. 5.1)			X
5.5-4 Prüfung des Aufbaus einer hoch- energetischen Neutronenquelle in natl./ intl. Kooperation (vgl. 5.1)			X
5.6-1 Vorstellung der Empfehlungen in einer Veranstaltung für die allg. Öffentlichkeit	X	X	
5.6-2 Vorstellung der Empfehlungen in einer Veranstaltung für die Fachöffentlichkeit	X	X	

## 2. Auftrag und Arbeitsweise

In ihrer Kabinettsitzung am 6. Februar 2024 hat die Bayerische Staatsregierung die Umsetzung der „Mission Kernfusion“ beschlossen. Ihr Ziel ist es, die technologische Entwicklung der Kernfusion in Bayern zu fördern und aus Bayern heraus einen sichtbaren Beitrag zur Erschließung einer nachhaltigen und CO<sub>2</sub>-armen Energiequelle zur Deckung des weltweit steigenden Energiebedarfs zu leisten.

In Bayern arbeiten bereits heute herausragende Akteure im Bereich der Fusion und in fusionsrelevanten Bereichen. Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching ist eines der weltweit führenden Zentren für Magnet-Fusionsforschung. Mit dem CALA-Laserzentrum an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) in München steht außerdem eine herausragende Forschungsinfrastruktur im Bereich Laser-Plasma-Physik in Bayern zur Verfügung. Die Technische Universität München (TUM) bringt mit der Neutronenquelle FRM II auf dem Campus Garching große Kompetenz im Betrieb kerntechnischer Großanlagen (Operation, Safety & Security) ein. In Zusammenarbeit mit dem IPP ist die Lehre zur Plasmaphysik und -technik tief in den Natur- und Ingenieurwissenschaften der TUM verankert.

Bayerische Unternehmen und Wissenschaftseinrichtungen sind maßgeblich am Bau des europäischen Fusionsversuchsreaktors ITER in Frankreich beteiligt. Mit Gauss Fusion, Marvel Fusion und Proxima Fusion haben sich darüber hinaus drei der bislang vier deutschen Start-ups, die die Fusionsenergie von der Grundlagenforschung in die kommerzielle Nutzung überführen möchten, in Bayern angesiedelt. Mit KFT Konzepte entsteht gerade ein weiterer Player in Bayern, der mit Teiltechnologien zur Entwicklung eines Fusionskraftwerks beitragen möchte.

Neben dem IPP hat unter anderem auch EUROfusion als Konsortium zur Koordinierung der Fusionsforschung und -technologie in 29 europäischen Ländern seinen Hauptsitz in Garching. Ebenso befindet sich dort die „Broader-Approach“-Abteilung von Fusion for Energy, die die internationalen Aktivitäten zur Weiterentwicklung der Fusionstechnologie mit Japan und anderen Partnern koordiniert. Diese Einrichtungen bieten aus Bayern heraus hervorragende Kooperationsmöglichkeiten für Wissenschaft und Wirtschaft.

Diese bereits vorhandene Expertise soll im Rahmen der Mission Kernfusion effektiv verknüpft und weiter ausgebaut werden, um so ein einzigartiges Fusionsökosystem zu etablieren und einen technologischen und wirtschaftlichen Wettbewerbsvorteil zum Nutzen der Bürgerinnen und Bürger in Bayern zu erreichen. Ein zentraler Baustein dieser Strategie ist eine Ausbildungsoffensive, die gezielt akademische und praxisnahe Kompetenzen im Bereich der Fusionstechnologien aufbaut und Bayern als Standort für hochqualifizierte Fachkräfte etabliert.

Als erste Etappe der Mission Kernfusion hat die Bayerische Staatsregierung eine Expertenkommission eingerichtet. Die Kommission wurde beauftragt, ein Konzept für den Aufbau eines Fusion Clusters zu erarbeiten und Empfehlungen zum Aufbau und zur Stärkung fusionsrelevanter Kompetenzen an bayerischen Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen zu erstellen.

Konkret wurde die Kommission gebeten, Empfehlungen zu folgenden Punkten zu erarbeiten:

- Denomination von neu einzurichtenden Lehrstühlen und deren zeitliche Priorisierung
- Inhaltliche Ausrichtung von Nachwuchsforschungsgruppen
- Studiengangskonzepte
- Auslobungs- und Besetzungsprozess der Professuren und Nachwuchsforschungsgruppen
- Fortsetzung der Arbeit der Expertenkommission zur Umsetzung weiterer Maßnahmen des Masterplans „Mission Kernfusion“

Zusätzlich stellte sich die Kommission die Aufgabe, Empfehlungen zur grundlegenden Gestaltung eines missionsgetriebenen Forschungs- und Infrastrukturprogramms zur weiteren Stärkung der Magnet- und Laserfusion zu erarbeiten und Leitlinien für innovative Mechanismen zur Forschungsk Kooperation mit Start-ups und Industrieunternehmen im Bereich der Kernfusion zu formulieren. Insbesondere befasste sich die Kommission mit Maßnahmen, die der strukturellen Verankerung eines bayerischen Forschungsökosystems für Fusionsforschung dienen. Diese berücksichtigen stets die Verzahnung von akademischer Forschung und industrieller Entwicklung, die entscheidend für eine Fokussierung der Forschungsanstrengungen hin auf ein Fusionskraftwerk sein wird. Das zentrale Instrument dafür wurde von der Kommission mit einer konkreten Ausgestaltung des bereits in der Strategie „Mission Kernfusion“ angedachten Bavarian Fusion Clusters identifiziert. Daneben wird eine wesentlich integrierende Wirkung von dem Vorschlag erwartet, einen neuen Forschungs- und Entwicklungsstandort für Fusion als „Fusionscampus“ auszuweisen.

In der Mission Kernfusion der Staatsregierung wird weiterhin ein Förderprogramm für die Fusionsforschung angesprochen. Die Kommission betrachtet die Entwicklung von Empfehlungen dazu nur insofern als ihre Aufgabe, als dieses Förderprogramm der Vernetzung der Akteure im Forschungsökosystem dient. Dafür ist es von zentraler Bedeutung und wird im Kontext mit dem Bavarian Fusion Cluster gesehen. Nicht zu übersehen ist weiter die Tatsache, dass die Bildungs- und Ausbildungsoffensive selbst unmittelbar nötige Sach- und Investitionsmittel für die adäquate Ausstattung der einzurichtenden Lehrstühle und Nachwuchsforschungsgruppen erfordern wird.

Bei all ihren Empfehlungen hat die Expertenkommission auch die nationalen und internationalen Aktivitäten im Bereich der Fusionsförderung wahrgenommen und Empfehlungen ausgesprochen, ob und wie die bayerische Initiative sich in diese einfügen kann.

## 2.1 Zusammensetzung der Expertenkommission

Der Expertenkommission gehörten insgesamt 18 international führende Fachleute aus Wissenschaft und Wirtschaft an, die die verschiedenen technologischen Ansätze der Fusionsforschung und neuartiger Kerntechnologien repräsentieren. Sie bilden einen Thinktank für Forschung und Innovation für Kernfusion. Die Kommission wurde von Prof. Dr. Robert Schlögl und von Prof. Dr. Jan Wörner, geleitet.

Folgende Fachleute gehörten der Expertenkommission an:

- **Oliver Buck** (Gründungsdirektor von Isotopen Technologien München AG)
- **Prof. Dr. Tony Donné** (unabhängiger Berater, ehemals EUROfusion)
- **Prof. Dr. Sibylle Günter** (Wissenschaftliche Direktorin Max-Planck-Institut für Plasmaphysik)
- **Prof. Dr. Holger Hanselka** (Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft)
- **Prof. Dr. Reinhard Kienberger** (Lehrstuhl für Laser- und Röntgenphysik an der TU München)
- **Prof. Dr. Wim Leemans** (Direktor des DESY-Beschleunigerbereichs; Professor für Beschleunigerkonzepte an der Universität Hamburg)
- **Prof. Dr. Harald Lesch** (Professur für Astronomie und Astrophysik an der Ludwig-Maximilians-Universität München)
- **Prof. Dr. Gerd Leuchs** (Professor für Physik und Leiter des Instituts für Optik, Information und Photonik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU); Direktor am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts)
- **Prof. Dr. Christian Linsmeier** (Forschungszentrum Jülich, Institute of Fusion Energy and Nuclear Waste Management – Plasmaphysik)
- **Prof. Dr. Karl Mannheim** (Lehrstuhl für Astronomie an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg)
- **Dr. Thomas Mull** (Framatome GmbH, Scientific Advisor)
- **Prof. Dr. Winfried Petry** (TUM Emeritus of Excellence)
- **Prof. Dr. Karen Pittel** (Leiterin des ifo Zentrums für Energie, Klima und Ressourcen, Volkswirtschaftliche Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München)
- **Prof. Dr. Robert Schlögl** (Präsident der Alexander von Humboldt Stiftung)
- **Dr. Antonia Schmalz** (Geschäftsführerin der Pulsed Light Technologies GmbH, Bundesagentur für Sprunginnovationen, SPRIN-D)
- **Prof. Dr. Jörg Schreiber** (assoziiierter Professor für Laser-Ionen-Beschleunigung am Lehrstuhl für Medizinische Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München)
- **Prof. Dr. Stefan Will** (Lehrstuhl für Technische Thermodynamik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg)
- **Prof. Dr. Jan Wörner** (Präsident von acatech)

An den Sitzungen der Expertenkommission nahmen Vertreterinnen und Vertreter des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) als ständige Gäste teil.

Die Arbeit der Expertenkommission wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi) und das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (StMWK) organisatorisch unterstützt.

Weitere externe Expertise wurde in ausgewählten Fällen ergänzend für die Arbeit der Kommission hinzugezogen.

Die Expertenkommission tagte insgesamt viermal. Um die Belange der Start-ups und etablierter Unternehmen, die jeweils unterschiedliche Erwartungen und Bedürfnisse haben, zu erfassen und zu priorisieren, führte die Kommission einen Industrieworkshop durch. Die Ergebnisse wurden in die folgenden Empfehlungen eingearbeitet. Zahlreiche Einzelergebnisse, die über die Aufgabe dieser Kommission teilweise weit hinausgehen, sind zur späteren Nutzung in diesem Dokument als Anhang in digitaler Form zur Verfügung gestellt. Dort finden sich weiterhin die Ergebnisse einer Hochschulumfrage, Vorschläge bayerischer Hochschulen zur Einrichtung von Lehrstühlen und Nachwuchsgruppen sowie Ergebnisprotokolle der Sitzungen.

Die Kommission versteht sich als Instrument zur Entwicklung eines Handlungsleitfadens für die Bayerische Staatsregierung. Dessen Umsetzung in konkrete Berufungen und Infrastrukturentscheidungen bedarf der Einbeziehung aller Akteure, in deren Einflussbereich diese Maßnahmen wirken sollen. Die Kommission beendet ihre Tätigkeit in der gegenwärtigen Zusammensetzung mit der Vorlage dieses Dokumentes. Sie unterbreitet neben inhaltlichen Empfehlungen einen Vorschlag zur zeitlichen und organisatorischen Umsetzung. Die Umsetzung der Maßnahmen soll durch entsprechende Berufungskommissionen unter Mitwirkung der Leitung des Fusion Clusters fortgeführt werden. Eine mit der jetzigen Expertenkommission teildentische Folgekommission sollte die Kontinuität des Aufbaus und das integrierende Wirken des Fusion Clusters beratend begleiten (siehe Abschnitt 5.8).

### 3. Mapping der bayerischen Hochschul- und Forschungslandschaft

Um einen Überblick über bisherige Aktivitäten im Bereich der Fusionsforschung zu gewinnen, wurde eine Umfrage unter den bayerischen Hochschulen durchgeführt. Insbesondere wurden dabei

- Lehrstühle, die sich ganz oder in relevanten Teilbereichen der Fusionsforschung bzw. -lehre widmen,
- Studiengänge, die unmittelbar fusionsrelevante Lehrinhalte umfassen,
- Fusionsrelevante Forschungsinfrastrukturen (zum Beispiel Labore, Anlagen, Großgeräte) und
- Fusionsrelevante, strukturbildende Projekte mit einer Laufzeit von mindestens drei Jahren (etwa hochschulinterne Maßnahmen, Drittmittelprojekte, Vernetzungsaktivitäten)

erfasst.

Die Ergebnisse dieser Umfrage liegen dem Papier in digitaler Form als Anhang bei. Für die Arbeit der Kommission war es wichtig, sich einen fundierten Überblick über den gegenwärtigen Zustand der Fusionsforschung an Hochschuleinrichtungen in Bayern zu verschaffen. Die zahlreichen Ergebnisse mögen der Staatsregierung zur Beurteilung möglicher Einzelmaßnahmen dienen. Für den Kontext der Kommissionsarbeit wurde die folgende Auswertung vorgenommen.

#### 3.1 Auswertung und Analyse der Hochschulumfrage

Die Analyse der Ergebnisse der Hochschulumfrage bestätigt, dass eine Reihe von Elementen einer Fusionsforschungslandschaft an den bayerischen Hochschulen und außeruniversitären Einrichtungen existiert, wobei der Standort München als Leuchtturm herausragt.

Insgesamt bieten die Aktivitäten eine vielversprechende Basis, auch wenn sie derzeit noch fragmentiert sind, um durch die in diesem Text empfohlenen Maßnahmen eine vernetzte, wissenschaftsgeleitete Forschungslandschaft in Bayern aufzubauen. Diese stellt eine herausragend wichtige Grundlage für die im Entstehen begriffene Fusionsindustrie dar, für die Bayern zu einem weltweit sichtbaren Standort werden soll und werden kann.

Die Expertenkommission betont, dass in dieser Analyse zwar bayerische Akteure im Fokus stehen, aber Kooperationen mit Partnern auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene erwartet werden und notwendig sind.

Zunächst stellte die Kommission eine Liste möglicher Widmungen von Lehrstühlen auf, die als wesentliche Ergänzungen zur vorhandenen Hochschullandschaft angesehen wurden. Unabhängig davon erhielt die Kommission in Ergänzung zu der oben genannten Umfrage von den einschlägig forschenden Universitäten jeweils Vorschläge für Lehrstühle, Nachwuchsforschungsgruppen und Studiengänge sowie andere Strukturen. Mit Stand vom 1. November 2024 liegen damit mehrere Vorschläge für neu zu errichtenden Strukturen vor, deren Details im Anhang zu diesem Papier zur Verfügung gestellt werden.

**Für Professuren/Lehrstühle:**

- Angewandte Kerntechnologien/Applied Nuclear Sciences (TU München)
- Fusionstechnologien/Fusion Technologies (TU München)
- Computational Fusion Science & Engineering (TU München)
- Diagnostik von Hochtemperaturplasmen (LMU München)
- Randschichtdiagnostik und Materialien der Fusionstechnologie (Universität Augsburg)
- Grundlagen der Plasmadiagnostik (FAU Universität Erlangen – Nürnberg)
- Werkstoffe und Materialien der Kernfusionstechnologien (FAU Erlangen – Nürnberg)
- KI-beschleunigte Plasmasimulationen (JMU Würzburg)

**Für Nachwuchsforschungsgruppen:**

- Angewandte Kerntechnologien (TU München)
- Fusionstechnologien (TU München)
- Computational Fusion Science and Engineering (TU München)
- Reaktorwand (TU München)
- Technische Realisierung (TU München)
- Innovative Prozesstechnik von Fusionswerkstoffen (FAU Erlangen – Nürnberg)
- Produktionstechnologien für Kernfusionsreaktoren (FAU Erlangen – Nürnberg)
- Zerstörungsfreie Prüfung von fusionsrelevanten Materialien (JMU Würzburg)
- Chemische Aufbereitung und Nanostrukturierung von Fusionsmaterialien (JMU Würzburg)
- Rechtsfragen der Kernfusion (JMU Würzburg)
- Präkeramische Präkursoren für Fusionsanwendungen (Uni Bayreuth)
- Angepasste keramische Verbundwerkstoffe für Fusionsreaktoren (Uni Bayreuth)
- Realstruktur-Analyse von SiC-basierten Faserverbundwerkstoffen für Fusionsreaktoren (Uni Bayreuth)

Die Kommission empfiehlt, die exakte Widmung und Einbindung vor allem der befristeten Strukturen (Nachwuchsgruppen) so flexibel wie möglich in Organisation und Ausstattung zu definieren, damit eine optimale Ergänzung der auf Dauer angelegten Maßnahmen (Lehrstühle) mit den temporären Maßnahmen (Nachwuchsgruppen, W2-Stellen, Vernetzungsprojekten) erzielt wird. Zudem weisen unterschiedliche fachliche Widmungen unterschiedliche Anforderungen an ihre Realisierung auf, die ebenfalls beachtet werden sollten. Die Kommission empfiehlt, die in diesem Dokument skizzierten Maßnahmen jeweils passgenau auf die Bedürfnisse der tragenden Einrichtungen, der Forscherpersönlichkeiten und auf den Vernetzungsgedanken hin umzusetzen.

In jedem Fall sollte darauf geachtet werden, dass die Einbindung in ein lebendiges Forschungsökosystem beachtet wird und insbesondere Parallelentwicklungen, sofern sie sich nicht aus der Sache heraus ergeben (Thema ist so umfangreich, dass eine mehrfache Bearbeitung erforderlich ist), vermieden werden. Dies berührt nicht die Anforderung, dass Bildung, Ausbildung und Forschung zu Fusionstechnologien eine langfristige Perspektive und gesicherte strukturelle Basis benötigen, auch und gerade dann, wenn sich die Front der Erkenntnis weiter in Richtung Anwendung bewegen wird. Die Kommission betrachtet daher die Initiative der Bayerischen Staatsregierung zur Fusionstechnologie auch als eine Verpflichtung, die nötige grundlegende wie spezifische akademische Arbeit, Bildung und Ausbildung nachhaltig und langfristig zu fördern.

### **3.2 Anbindung an außerbayerische Forschungseinrichtungen**

Neben den bayerischen Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen spielen auch Forschungseinrichtungen außerhalb Bayerns wie zum Beispiel das Forschungszentrum Jülich (FZJ) und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) eine Schlüsselrolle in der Verknüpfung von Grundlagenforschung und industrieller Anwendung. Diese Einrichtungen verfügen über umfangreiche Kompetenzen in der Entwicklung und Implementierung von Technologien, die für die Kernfusion entscheidend sind. Eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen diesen Institutionen, bayerischen Hochschulen und außeruniversitären Einrichtungen sowie der Industrie kann ein zentraler Hebel werden, um die Forschung effizienter in die Praxis zu überführen.

Die Kommission sieht es als eine künftige Aufgabe des Bavarian Fusion Clusters an, gemeinsam mit den an Fusion arbeitenden nationalen Forschungseinrichtungen ein koordiniertes System für die Fusionsforschung in Deutschland zu bilden. Der Bavarian Fusion Cluster sollte Forschungsvorhaben koordinieren und Großgeräte beschaffen und betreiben.

#### 4. Ergebnisse Industriefusionsworkshop

Die Entwicklung der Fusionstechnologien kann nur in einer gemeinsamen Anstrengung von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik gelingen. Deshalb war es der Expertenkommission auch wichtig zu erfahren, welche Desiderate aus Sicht der Industrie in der Fusionsforschung bestehen. Dies sowie die Fragen, was Forschung tun sollte, um die Weiterentwicklung und Kommerzialisierung der Fusion voranzubringen und welche Rolle der in der Strategie skizzierte Bavarian Fusion Cluster spielen sollte, waren Inhalte eines Industrieworkshops, der im September 2024 bei der Bayern Innovativ GmbH durchgeführt wurde.

Unter den Teilnehmenden des Industrieworkshops bestand Einvernehmen darüber, dass die bayerischen Fusionsaktivitäten zu einem industriell realisierten Kraftwerkstyp führen sollten. Damit stellt sich die Industrie hinter die Grundüberlegung des bayerischen Masterplans Kernfusion. Dafür muss für beide Technologiehauptpfade – des magnetischen Einschlusses und der Trägheitsfusion – jeweils ein schlüssiges Gesamtkonzept für ein Fusionskraftwerk erarbeitet werden. Zentrale Herausforderungen, die dafür noch bewältigt werden müssen, umfassen:

- Erbrüten von Tritium im Betrieb
- Haltbarkeit der ersten Wand
- Entwicklung hochrepetitiver Lasersysteme (10/20 Hertz) mit hohen Pulsenergien und Spitzenleistungen und deren Einsatz in fusionsrelevanten Experimenten
- Hochrepetitive Targetherstellung und die Targetinjektion (10/20 Hertz) in den Reaktor
- Aufbau einer industriellen Lieferkette für Komponenten
- Multi-physics-Modell der Fusion
- Abfallmanagement vom ersten Tag an
- Sicherer Einschluss insgesamt

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, sehen es die Industrievertreter als entscheidend an, dass die Grundlagenlehre in der Kernphysik, (Nicht-Gleichgewichts-)Plasmaphysik und in der Kernchemie nachhaltig gestärkt wird. Um ein kommerzielles Kraftwerk realisieren zu können, ist es darüber hinaus entscheidend, dass jetzt auch anwendungsnähere und technische Ausbildungsbereiche gestärkt und Fachleute ausgebildet werden.

Themen für Forschung und Bildung, die technologieunabhängig und als Querschnittsfähigkeiten in einem Fusionsökosystem vertreten sein müssen, waren nach übereinstimmender Auffassung der Expertenkommission:

- Automatisierung und Robotik
- Virtual Engineering (inklusive digitaler Zwilling)
- Remote Handling
- Simulationen von Fusionsprozessen und Zugang zu entsprechenden Programmcodes
- Laserentwicklung
- Laser-Plasma-Wechselwirkung und Diagnostik bei hohen Dichten
- Produktionsprozesse (komplexer) Komponenten auf industrieller Skala
- Kerntechnik
- Kernchemie, Brennstoffe
- Materialentwicklung (Erste Wand)
- Defekte in Materialien unter extremen Bedingungen (auch hochenergetischer Neutronen)
- Diagnostik, Steuerung, Messung von Fusionsplasmen
- Grundlegende physikalische Prozesse in Plasmen und in der Plasma-Wandwechselwirkung
- Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik

Diese Themen sind in der bayerischen Hochschullandschaft in unterschiedlichen Kontexten vertreten. Es wird als Aufgabe des Bavarian Fusion Clusters angesehen, die einschlägigen Kapazitäten für Ausbildung und gemeinsame Forschung zu erschließen.

Die Wirtschaft erwartet, dass ein Forschungsökosystem für Fusion schnell aufgebaut wird. In diesem Fall sei die Umsetzungsgeschwindigkeit wichtiger als die Vollständigkeit, das heißt, auch wenn bestimmte Komponenten eines Fusionsökosystems noch fehlten, solle mit dem Aufbau zügig begonnen werden. Dies könne durch eine verstärkte Verknüpfung von Wissenschaft und Wirtschaft gelingen. Eine besondere Rolle können zum Beispiel Fraunhofer-Institute spielen, die seit Jahren erfolgreich anwendungsnahe Forschungsprojekte durchführen, insbesondere für den Aufbau industrieller Lieferketten, die Qualifizierung von Materialien und die Entwicklung automatisierter Produktionsprozesse.

Im Workshop wurde weiter diskutiert, dass ein Standort für technologieoffene Testexperimente zeitnah festgelegt und entwickelt werden sollte. Dieser Standort müsse die Voraussetzung für den Umgang mit radioaktiven Stoffen, wie sie in der Fusion anfallen, möglichst schon mitbringen, um hinreichend zeitnah für den Ausbau der Infrastruktur verfügbar zu sein. Der Zugang zu dieser (und anderen) Testinfrastrukturen könne über den Bavarian Fusion Cluster organisiert werden. Kontrovers wurde die Notwendigkeit einer eigenen Neutronenquelle zur Qualifizierung von geeigneten Materialien diskutiert.

Von entscheidender Bedeutung für den Erfolg der Fusionstechnologien sind eine innovationsfreundliche Regulierung und eine breite Akzeptanz in der Bevölkerung: Es müsse sichergestellt werden, dass die Bevölkerung über die Entwicklungen sachlich und transparent informiert wird, um Ängsten und Missverständnissen vorzubeugen und eine aktive Unterstützung durch gezielte Partizipation im Entscheidungsprozess zu fördern. Deshalb sollten Regulierungsfragen und ein Konzept für transparente Informationsmaßnahmen zentral bearbeitet werden. Eine besondere Herausforderung stelle auch der Umgang mit geistigem Eigentum dar: Die Industrie wünscht sich, dass innerhalb des Fusionsökosystems wettbewerbsrechtliche Fragen rechtssicher gelöst und beispielsweise Mustervereinbarungen zur Verfügung gestellt werden.

## 5. Empfehlungen

### 5.1 Allgemeine Empfehlungen

Die Kommission begrüßt nachdrücklich das weitsichtige Engagement der Bayerischen Staatsregierung, die Zukunftstechnologien der Kernfusion durch eine umfassende Initiative zur Gewinnung von akademischen und technischen Fachkräften zu stärken. Gleichzeitig wird damit die in Bayern vorhandene Forschungslandschaft themenbezogen zusammengeführt und gestärkt. Die Kommission weist ausdrücklich darauf hin, dass dieser Aufbau von Kompetenzen zeitlich gestaffelt erfolgen soll, damit jeweils die bestgeeigneten Persönlichkeiten gewonnen werden. Ebenso wichtig ist die Kontinuität der Förderung. Nur eine andauernd auf auskömmlichem Niveau fortgeführte Förderung wird mittel- und langfristig den Ertrag in Form von Erkenntnissen, Fachkräften und entwickelten Technologien erbringen, den die Strategie zum Ziel hat.

Im Rahmen der Aktivierung und Fokussierung der Forschungslandschaft ist es wichtig, die heute sehr fortgeschrittenen Technologien zur Kernspaltung in Kraftwerken wissenschaftlich und technologisch für die Fusion nutzbar zu machen. Beiden Familien von Kerntechnologien ist die zentrale Rolle von Neutronen und deren Wechselwirkung mit Materie gemeinsam. Noch sehr wenig weit entwickelt sind die Technologien um den Brennstoff Tritium sowohl in Erzeugung und Handhabung als auch in den Konsequenzen für Materialfragen und deren Handhabung. Hier sind Forschung und Entwicklungen, die von den Möglichkeiten der Kernspaltungstechnologie, der Neutronenquelle FRM II sowie der dortigen Radiochemie in München Gebrauch machen, von hoher Bedeutung, um rasch Fortschritte zu erzielen. Die Kommission empfiehlt, auf fachlicher Ebene zu prüfen, ob und wie eine volumetrische Quelle mit hohem Fluss hochenergetischer Neutronen in Bayern (Europa) erforderlich ist oder ob hier eine internationale Kooperation ausreichend sein könnte. Die Kommission zeigt sich besorgt über den Zeithorizont und die Bindung von Ressourcen für solch ein Vorhaben.

Die Kommission verfolgt in ihrer Arbeit und in den folgenden Empfehlungen strikt das Prinzip der technologischen Offenheit. Beim derzeitigen Stand des Wissens und der technologischen Reife ist es nicht vertretbar, die Technologieoptionen einzuschränken. Daher fokussieren sich die Empfehlungen auch mehrheitlich auf Maßnahmen, die selbst technologieübergreifend sind und entweder Grundlagenfragen betreffen oder technologische Elemente zum Inhalt haben, die in mehreren Verfahren benötigt werden.

Weiterhin ist es offensichtlich, dass Bayern die Fusionstechnologie nicht allein voranbringen kann. Sowohl in den Technologien als auch in der erforderlichen Infrastruktur sind Kooperationen national (Bund) sowie europäisch und international zwingend geboten, um den Freistaat Bayern im laufenden weltweiten Wettlauf zu positionieren. Die Kommission begrüßt daher ausdrücklich die aktive Teilnahme von Vertreterinnen und Vertretern des BMBF an ihrer Arbeit und wünscht sich eine enge und effiziente, stabile Zusammenarbeit.

Die Kommission weist darauf hin, dass die erfolgreiche Fusionsforschung unabweisbaren Bedarf an weiterer Infrastruktur und an Großgeräten hat, welche von Bayern nicht allein geschaffen werden können. Die detaillierte Beschreibung dieser Bedarfe und deren Priorisierung ist allerdings nicht Aufgabe dieser Kommission, sondern kann erst durch einen Prozess unter maßgeblicher Beteiligung des Bavarian Fusion Clusters vorgenommen werden. Eine bayerische Fusionsforschung kann ohne eine zügige Schaffung dieser Infrastrukturen, die der akademischen wie der industriellen Forschung dienen sollen, nicht voll wirksam werden oder die gegenwärtige herausgehobene Position halten.

Die Kommission ist sich einig, dass der zeitliche Rahmen für die Entwicklung eines grundlastfähigen, kommerziellen Fusionskraftwerkes die Größenordnung von Dekaden umfasst. Dies berührt nicht die ehrgeizigen Ziele einiger Akteure, wesentlich schneller zu (Zwischen-)Ergebnissen bzw. technologischen Fortschritten zu gelangen, die für dieses Ziel notwendig sind. Aufgrund dieses zeitlichen Rahmens betrachtet die Kommission die Strategie der Bayerischen Staatsregierung, die Entwicklung der Fusionstechnologie mit einer Bildungs- und Ausbildungs-offensive zu unterstützen, als wichtigen Baustein. Deren Wirkung kann sich erst mittelfristig entfalten. Sie wird allerdings zu einem zentralen Standortvorteil, sobald eine industrielle Entwicklung der Fusion mit entsprechend hohem Personalbedarf fortschreitet. Innerhalb dieser zeitlichen Perspektive ist jedoch Eile geboten, da nur in einem relativ kurzen Zeitfenster eine relevante Wirkung erzielt werden kann. Eine agile, parallel arbeitende und auch auf Teilerfolge setzende Realisierung der Lehrstühle und Nachwuchsgruppen erscheint zwingend geboten. Dafür wird die anhaltende Unterstützung der bayerischen Politik auf allen ihren Ebenen ebenso erforderlich sein wie eine enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit anderen Bundesländern und der Bundesregierung. Des Weiteren sind Kooperationen auf europäischer und internationaler Ebene anzustreben. Schließlich betont die Kommission die große Bedeutung der industriellen Beteiligung an der Entwicklung eines Fusionskraftwerkes. Eine gezielte Beteiligung von Partnern aus der Wirtschaft an der Gestaltung und Umsetzung der bayerischen Fusionsaktivitäten wäre ein wichtiger Schritt, um eine enge Verzahnung von akademischer und industrieller Forschung sicherzustellen.

## **5.2 Fusionscluster**

Der Bavarian Fusion Cluster sollte alle Einrichtungen in Bayern umfassen, die zum angestrebten Fusionsökosystem gehören. Darunter fallen insbesondere diejenigen Hochschulen und außeruniversitäre Forschungsinstitute, die fusionsrelevante Forschung betreiben, die Start-ups aus dem Fusionsbereich und Unternehmen der fusionsrelevanten Industrie. Der Cluster soll Fusionsaktivitäten in Lehre, Forschung und Wirtschaft miteinander vernetzen und eine Plattform für einen Informationsaustausch unter den bayerischen Partnern und darüber hinaus auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene bieten.

Der Bavarian Fusion Cluster wird die Zusammenarbeit mit den in Garching ansässigen internationalen Organisationen EUROfusion und Fusion for Energy unterstützen. Die Einbindung dieser Organisationen kann dazu beitragen, den Austausch von Know-how zu intensivieren und Synergien für die Entwicklung von Fusionskraftwerken zu schaffen. Die enge Zusammenarbeit mit internationalen Akteuren wie EUROfusion und Fusion for Energy kann auch in der Öffentlichkeitsarbeit hervorgehoben werden, um die Bedeutung Bayerns als europäischer Dreh- und Angelpunkt der Fusionsforschung zu unterstreichen.

Der Fusion Cluster soll die vernetzenden Forschungsprojekte zwischen Partnern mit eigenen Projektmitteln unterstützen und benötigt dafür eine entsprechende finanzielle Ausstattung. Damit können beispielsweise auch Forschungsarbeiten an nationalen, europäischen und internationalen Forschungseinrichtungen gefördert werden.

Soll ein Vernetzungsvorhaben durch den Cluster gefördert werden, empfiehlt die Kommission, dass mindestens ein Partner aus der Industrie kommen und dass das Ziel der geförderten Arbeiten direkt auf die Entwicklung eines Kraftwerks abzielen muss.

Eine Anbindung des Clusters an die Bayerische Staatsregierung wäre sinnvoll, unter anderem, um die Finanzierung notwendiger Stellen (Vorhaltung der notwendigen fusionsrelevanten Kompetenz) zu sichern. Um die Eigenständigkeit des Clusters zu gewährleisten und Interessenskonflikte zu vermeiden, soll der Cluster allerdings nicht an eine Institution angegliedert werden, die forschender oder ausbildender Teil des Clusters ist.

Um insbesondere in den ersten Jahren flexibel auf die erwartbar dynamischen Entwicklungen in den Fusionstechnologien reagieren und die Organisation des Clusters bei Bedarf anpassen zu können, sollte dessen Aufbau zunächst in einer flexiblen und anpassungsfähigen Form erfolgen. Die Expertenkommission hält jedoch die langfristige Etablierung für unverzichtbar.

Die verknüpfende und nachhaltige verbindende Wirkung des Clusters als Grundlage erfolgreicher Innovationsarbeit erfordert zwingend eine professionelle wissenschaftliche Leitung. Die Clusterleitung bildet den Kern der Vernetzung und wäre in der Entwicklungsphase als Gast an allen Berufungsverfahren beteiligt. Neben der Vernetzung der einzelnen Akteure wäre die Clusterleitung auch verantwortlich für die Nutzung des einzurichtenden Fusion Campus (siehe Abschnitt 5.5). Dessen Finanzierung fällt hingegen nicht in die Verantwortung der Clusterleitung.

Die Besetzung der Leitung des Fusion Clusters sollte die erste Umsetzungsmaßnahme der Mission Kernfusion sein. Für die Tätigkeit der Clusterleitung, die ähnlich vergütet sein sollte wie eine W3-Professur, wird eine erfahrene Persönlichkeit aus dem Wissenschaftsmanagement gesucht, die sehr gut sowohl im wissenschaftlichen als auch im wirtschaftlichen Umfeld der Fusionstechnologien vernetzt ist und auch eigene Erfahrungen in oder mit der Industrie einbringt. Um starke Interessenskonflikte zu vermeiden, sollte die Clusterleitung nicht mit einer aktiven Mitarbeiterin oder einem aktiven Mitarbeiter aus den führenden bayerischen Institutionen der Fusionsforschung besetzt werden.

### 5.3 Einrichtung von Professuren und Nachwuchsgruppen

Die einzurichtenden Professuren und Nachwuchsgruppen sollen sich auf fusionsrelevante Themen fokussieren. Von einer Vermischung mit Themen, die nur die Kernspaltung betreffen, wird dringend abgeraten.

Die genaue Zahl einzurichtender Professuren und Nachwuchsgruppen wurde nach Eingang und Sichtung der Konzepte festgelegt. Der ursprüngliche Vorschlag sieht bis zu 6 Professuren und bis zu 20 Nachwuchsgruppen vor.

Die Auswahl der einzurichtenden Professuren und Nachwuchsforschungsgruppen erfolgte anhand der folgenden Kriterien:

- **Bedeutung der Thematik für die Errichtung eines Kernfusionskraftwerks**  
Nur solche Themen, die für die Entwicklung von Kernfusionskraftwerken spezifisch sind, sollten gefördert werden. Eine Stärkung der Lehre vor allem in Kern- und Plasmaphysik und -technik wird von der Wirtschaft zu Recht gefordert. Dies kann einerseits im Rahmen bestehender Lehrstühle erfolgen und mit Zusatzmitteln (zum Beispiel Assistentenstellen, Tutoren, Nachwuchsgruppen) materiell unterstützt werden. Andererseits können an den Universitäten, an denen es keine fachspezifische Kern- bzw. Plasmaphysiklehrstühle mehr gibt, solche Lehrstühle neu eingerichtet werden, um das insgesamt in Bayern vorhandene Nachwuchspotenzial an einschlägigen Fachkräften optimal auszuschöpfen.
- **Langfristigkeit der Forschung**  
Forschung mit Bezug zur Fusionstechnologie, die einen längeren Zeitraum benötigt, soll vorrangig berücksichtigt werden.
- **Technologieoffenheit**  
Es sollen solche Forschungsfragen prioritär behandelt werden, die auf dem kritischen Pfad liegen und möglichst für mehrere technologische Ansätze der Kernfusion relevant sind.
- **Nationale, europäische und internationale Anschlussfähigkeit**  
Die geförderten Forschungsthemen sollen sich in die nationalen, europäischen und internationalen Forschungsaktivitäten eingliedern und Möglichkeiten zur (inter-)nationalen Zusammenarbeit und Vernetzung bieten. Eine enge Abstimmung zu den Ausbildungs-offensiven anderer Bundesländer (zum Beispiel Hessen) ist notwendig. Das Gleiche gilt für Forschungsprogramme in den anderen deutschen Bundesländern (siehe hierzu insbesondere die Aktivitäten zu fusionsrelevanten Werkstoffen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und zur Plasmadiagnostik am Forschungszentrum Jülich (FZJ)). Dopplungen sind zu vermeiden.

Die Expertenkommission hat im Rahmen ihrer Arbeit einen Katalog von möglichen fusionsrelevanten Themen für Lehrstühle erstellt. Im Laufe der Kommissionsarbeit reichten bayerische Universitäten spezifische Vorschläge für die Errichtung von Lehrstühlen, W2-Stellen und Nachwuchsforschungsgruppen ein. Um eine Chancengleichheit zu gewährleisten, entschloss sich die Kommission, allen bayerischen Universitäten, die in der Hochschulumfrage belastbare Aktivitäten in der Fusionsforschung ausgewiesen hatten, die Möglichkeit für einen Vorschlag zu geben. Daraus ergeben sich die folgenden Tabellen. Es sind ausschließlich Vorschläge berücksichtigt, die von den umsetzenden Einrichtungen gemacht wurden. Dies ist dadurch begründet, dass die Einrichtung von Lehrstühlen und Nachwuchsforschungsgruppen nur im Einvernehmen mit den Universitäten umgesetzt werden können. Die durch die Hochschulen vorgeschlagenen Strukturelemente spiegeln die gewünschte Entwicklung der Fusionsaktivitäten an den jeweiligen Hochschulen wider, stellen also die Gesamtheit der an den Hochschulen realistisch etablierbaren Lehrstühle und Nachwuchsforschungsgruppen dar. Die hier explizit aufgeführten Vorschläge der Hochschulen decken sich gut mit den eigenen Überlegungen der Kommission zur thematischen Widmung. Diese eigene Liste war umfangreicher, als es die Möglichkeiten dieser Initiative zulassen. Daher befassen sich die Empfehlungen der Kommission fortan vor allem mit den eingereichten Vorschlägen.

#### Vorschläge zur Errichtung von Lehrstühlen im Fusionsökosystem:

	<b>Universität</b>	<b>Professur / Lehrstuhl</b>	<b>Bemerkungen</b>	<b>Priorität</b>	<b>Dringlichkeit</b>
<b>L1</b>	TU München	Angewandte Kerntechnologien	ED-School & NAT-School	I	1a (2025)
<b>L2</b>	TU München	Fusionstechnologien	ED-School	I	2
<b>L3</b>	TU München	Computational Fusion Science and Engineering	CIT-School	I	2
<b>L4</b>	LMU München	Diagnostik von Hochtemperaturplasmen	1 W3, 1W2, 6 MMA; in Zusammenarbeit mit IPP	I	1c (2025)
<b>L5</b>	Uni Augsburg	Randschicht-Diagnostik und Materialien der Fusions-technologie	Basierend auf AG „Experimentelle Plasmaphysik“	I	1b (2025)
<b>L6</b>	FAU Erlangen-Nürnberg	Grundlagen der Plasmadiagnostik	Department Physik am Erlangen Center for Particle Astrophysics	II	2
<b>L7</b>	FAU Erlangen-Nürnberg	Werkstoffe und Materialien der Kernfusionstechnologie	Department für Werkstoffwissenschaften	I	1c (2025)
<b>L8</b>	JMU Würzburg	KI-beschleunigte Plasmasimulationen	Soll Forschungsbereiche Astrophysik und künstliche Intelligenz verbinden	II	2

Grundsätzlich sind alle Vorschläge dazu geeignet, das bayerische Ökosystem Fusionsforschung zu verdichten und seine Wirkung zu verbessern. Da von der Bayerischen Staatsregierung eine Begrenzung für die Anzahl der Personalstellen vorgegeben wurde, entschloss sich die Kommission, diejenigen Vorschläge, die im Sinne der Kriterien eine höhere Priorität besitzen, auch so auszuweisen. Dies bedeutet nicht, dass die Kommission die in Priorität 2 gelisteten Vorschläge ablehnt, sondern sie lediglich aus Ressourcengründen zunächst nachrangig einordnet. Neben einer thematischen Priorisierung wurde auch die Dringlichkeit der Vorschläge bewertet. Davon ausgehend, dass es herausfordernd werden wird, alle Stellen gleichzeitig oder zumindest zeitnah zu besetzen, beschreibt die Dringlichkeit also die zeitliche Priorisierung der Einrichtung des entsprechenden Lehrstuhls oder der entsprechenden Nachwuchsgruppe.

Es hätte auch die Option gegeben, alle Vorschläge mit gleicher Priorität zu empfehlen und die zusätzlichen Personalstellen aus dem Pool der Nachwuchsforschungsgruppen zu nehmen. Die Kommission hält allerdings die Einrichtung einer hinreichenden Zahl von Nachwuchsforschungsgruppen sowohl als ein Kernelement der Schaffung akademischen Nachwuchses als auch als ein wirksames Element der Vernetzung innerhalb des Ökosystems für sehr bedeutsam.

In der Gesamtschau der Vorschläge stellt die Kommission fest, dass Aktivitäten zur (1.) Technikfolgenabschätzung sowie (2.) zu einer übergreifenden Sicherheitskonzeption (Safety und Security) in den bislang gemachten Vorschlägen noch nicht Berücksichtigung finden, aber unbedingt notwendig sind. Zudem stellt die Kommission fest, dass keine Vorschläge zur Einrichtung von Lehrstühlen im (3.) engeren Themengebiet Laserfusion gemacht wurden. Daraus ergibt sich, dass die Ausbildung des Forschungsökosystems weitere Ressourcen in Form von Stellen und Sachmitteln benötigen würde, um eine umfassende Abdeckung der Mission Kernfusion zu ermöglichen. Die Kommission sieht es allerdings als sinnvoll an, die von der Staatsregierung vorgeschlagene Aufteilung der finanziellen Ressourcen beizubehalten und insbesondere nicht die Zahl der Planstellen auf Kosten der sächlichen Ausstattung der Bildungs- und Ausbildungsinitiative zu erhöhen oder die nachhaltige Finanzierung dieser Initiative nicht sicherstellen zu können. Deshalb formuliert sie keine konkreten, weiteren Vorschläge für Lehrstühle und Nachwuchsforschungsgruppen. Die Kommission empfiehlt weiterhin, durch den Bavarian Fusion Cluster Möglichkeiten entwickeln zu lassen, wie insbesondere die Lehre zur Laserfusion angemessen repräsentiert werden kann.

Der Vorschlag L1 verbindet über die Gemeinsamkeit der Kenntnisse über die Wechselwirkung von Neutronen mit Konstruktionsmaterialien die umfangreiche Erfahrung aus der Technologie der Kernspaltung mit dem noch sehr wenig ausgereiften Gebiet der Konstruktion eines Fusionskraftwerkes. Da dieser Lehrstuhl im Bereich der Ingenieurwissenschaften angesiedelt und mit den Einrichtungen der TUM zur Kernchemie eng verbunden ist, kommt ihm eine zentrale Funktion im Hinblick auf eine Übertragung der Fusionsforschung in eine Kraftwerkstechnologie zu. Die überbrückende Funktion dieses Lehrstuhls ist wichtig für die Ausgestaltung des Forschungsökosystems und sollte daher prioritär angegangen werden.

In einem ersten Schritt empfiehlt die Kommission die Besetzung von drei Lehrstühlen – und zwar in folgender Reihenfolge: erstens L1, zweitens L5, drittens L7 und als prioritären Ersatz L4, falls die erstgereihten Verfahren nicht rasch genug arbeiten können. Die entsprechenden Verfahren in den betreffenden Universitäten sind nach Auskunft so weit fortgeschritten, dass ein Abschluss der Berufungsverfahren noch in 2025 realistisch ist. Die Kommission empfiehlt der Staatsregierung, die Universitäten darauf hinzuweisen, dass sie mit der Annahme der Priorität für 2025 die Verantwortung übernehmen, zügige Berufungsverfahren durchzuführen. Andernfalls sollte die zeitliche Priorisierung angepasst werden, um den raschen Aufbau der Ausbildungsoffensive nicht unnötig zu verzögern. Es wird in der Verantwortung der Clusterleitung liegen, die Besetzung der übrigen Stellen zusammen mit der Bayerischen Staatsregierung und den jeweiligen Universitäten zu organisieren.

### Vorschläge zur Einrichtung von Nachwuchsforschungsgruppen im Fusionsökosystem:

	<b>Universität</b>	<b>Nachwuchsgruppe</b>	<b>Am Lehrstuhl / an der Fakultät</b>	<b>Priorität</b>	<b>Dringlichkeit</b>
<b>N1</b>	TU München	Angewandte Kerntechnologien	Angewandte Kerntechnologie (neu)	I	1
<b>N2</b>	TU München	Fusionstechnologien	Fusionstechnologien (neu)	I	1
<b>N3</b>	TU München	Computational Fusion Science and Engineering	Computational Fusion Science and Engineering (neu)	I	1
<b>N4</b>	TU München	Reaktorwand		II	2
<b>N5</b>	TU München	Technische Realisierung		II	2
<b>N6</b>	FAU Erlangen-Nürnberg	Innovative Prozesstechnik von Fusionswerkstoffe	WW1, WTM oder LKO	I	1
<b>N7</b>	FAU Erlangen-Nürnberg	Produktionstechnologien für Kernfusionsreaktoren	FAPS (Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik)	I	1
<b>N8</b>	JMU Würzburg	Zerstörungsfreie Prüfung von fusionsrelevanten Materialien	Röntgenmikroskopie	II	2
<b>N9</b>	JMU Würzburg	Chemische Aufbereitung und Nanostrukturierung von Fusionsmaterialien	Institut für Anorganische Chemie	II	2
<b>N10</b>	JMU Würzburg	Rechtsfragen der Kernfusion	Juristische Fakultät	I	1
<b>N11</b>	Uni Bayreuth	Präkeramische Präkursoren für Fusionsanwendungen	Keramische Werkstoffe Operando-Analytik	I	1
<b>N12</b>	Uni Bayreuth	Angepasste keramische Verbundwerkstoffe für Fusionsreaktoren	Anorganische Chemie III: Strukturanalytik von Funktionsmaterialien	II	2
<b>N13</b>	Uni Bayreuth	Realstruktur-Analyse von SiC-basierten Faserverbundwerkstoffen für Fusionsreaktoren	Anorganische Aktivmaterialien für die Energiespeicherung	I	1

Jeweils eine Nachwuchsforschungsgruppe soll einer neu eingerichteten Professur zugeordnet werden. Um hierbei einen reibungslosen Start zu ermöglichen, sollen diese in angemessenem zeitlichem Nachgang zur Besetzung der jeweiligen Professur eingerichtet werden. Weitere Nachwuchsforschungsgruppen sollen darüber hinaus möglichst an vorhandenen Lehrstühlen entstehen. Auch eine Einrichtung an Universitäten in Zusammenarbeit mit der Wirtschaft und außeruniversitären Einrichtungen ist denkbar. Weitere Nachwuchsforschungsgruppen sollen darüber hinaus zur Vernetzung zwischen dem IPP und anderen Forschungseinrichtungen in Bayern etabliert werden. Die Kommission schlägt zu deren Einrichtung ein wettbewerbliches Verfahren unter Beteiligung der aufnehmenden Institutionen und des Bavarian Fusion Clusters vor. Daher sollten mindestens zehn themenoffene Nachwuchsforschungsgruppen neben den in der Tabelle mit Priorität I gelisteten für das wettbewerbliche Verfahren reserviert werden. Im Einzelfall kann es auch sinnvoll sein, einen neu einzurichtenden Lehrstuhl mit zunächst einer Nachwuchsgruppe zu beginnen, um möglichst rasch in die Ausbildungsinitiative zu gelangen.

Die Kommission bewertet die Vorschläge N4 und N5 als weniger dringlich und verweist auf das wettbewerbliche Verfahren. Die Vorschläge N8 und N9 werden hinsichtlich ihrer angestrebten Methodik als inhaltlich weniger relevant angesehen und zurückgestellt. Die Vorschläge N11, N12 und N13 hängen inhaltlich zusammen und betreffen die Entwicklung eines konkreten Materialsystems für Fusionszwecke, das als grundsätzlich sehr hilfreich angesehen wird, wenn es denn funktionieren sollte. Die Kommission empfiehlt daher, zunächst nur mit je einer Nachwuchsforschungsgruppe für Synthese und Analytik zu beginnen und dieses Team zu erweitern, wenn sich Hinweise auf eine Brauchbarkeit des Materialsystems für die Fusion ergeben. Ausdrücklich wird dabei die Notwendigkeit der beantragten Infrastruktur in der Mikroskopie befürwortet, um zielgerichtet in der Materialentwicklung vorzugehen. Bezüglich der übrigen Ausstattung, die die Universität Bayreuth beantragt hat, wird empfohlen, einen deutlich reduzierten Investitionsansatz bereitzustellen.

Die Kommission empfiehlt, Nachwuchsforschungsgruppen in unterschiedlichen Ausstattungen (Mitarbeitende und Sachmittel) und mit unterschiedlichen Laufzeiten (5 Jahre fix, bis zu 3 Jahre Verlängerung nach Begutachtung, Tenure-Track-Option) vorzusehen, um dem angestrebten Zweck und den fachlichen Notwendigkeiten gerecht zu werden. Dies muss in jedem Einzelfall mit den aufnehmenden Hochschulen abgesprochen und vertraglich so vereinbart werden, dass die Inhaberin oder der Inhaber der Stelle eine stabile und bekannte Perspektive auf ihre/seine Zukunft hat. Ein Ausgleich von Forschungsinteressen und Karriereentwicklung muss dabei angemessen sichergestellt werden. Für die Finanzplanung empfiehlt sich für die Nachwuchsforschungsgruppen ein Ansatz von 450.000 Euro pro Jahr für Personalmittel, ein Ansatz von Sach- und Reisemittel von 60.000 Euro pro Jahr und ein Erstinvest von 250.000 Euro.

## 5.4 Studiengänge

Um die nötige Fachexpertise für die Entwicklung und den Bau von Fusionskraftwerken aufzubauen, sollen fusionsrelevante Themen stärker in bereits bestehende Studiengänge insbesondere an den großen bayerischen Universitäten integriert und neue Studiengänge aufgebaut werden.

Es soll ein bayernweit organisierter Masterstudiengang „Nuclear Fusion Technologies“ eingerichtet werden. Dieser soll technologieoffen konzipiert sein und eine umfangreiche Bearbeitung der relevanten Themen im Bereich der Fusionstechnologien ermöglichen. Der Studiengang soll auch einen Praxisteil in der Industrie vorsehen und ingenieurwissenschaftliche Kompetenzen entwickeln. Eine Beteiligung von Hochschulen für angewandte Wissenschaften (HAW) an praxisnahen Modulen der Ausbildung soll berücksichtigt werden.

Die neu eingerichteten Lehrstühle und Nachwuchsgruppen sollen die Fusionsforschung in die vorhandenen relevanten Studiengänge aktiv einbringen (zum Beispiel in der Physik und in den Materialwissenschaften). So sollen Spezialisierungen „Kernchemie“ in der Chemie und „Materialien unter extremen Bedingungen“ in der Chemie und/oder in den Ingenieurwissenschaften eingeführt werden.

Um die bayerische Ausbildungsoffensive flächendeckend sichtbar zu machen, sollten fusionsrelevante Studieninhalte an allen größeren Universitäten in Bayern etabliert und aktiv beworben werden. Dies stärkt nicht nur die universitäre Ausbildung, sondern auch die landesweite Wahrnehmung der Initiative als strategischen Impuls für die Kernfusionsforschung.

Ein überregionales (bayernweites) Graduiertenkolleg „Kernfusion“ für Masteranden und Promovenden soll den Austausch zwischen den verschiedenen Fachgebieten ermöglichen und fördern. Als mögliche Orientierung hinsichtlich des Aufbaus und der Organisation können hier die Max-Planck Schools dienen.

Eine besondere Bedeutung für die Fusionsforschung spielt die Plasmaphysik. An mehreren bayerischen Universitäten gibt es bereits entsprechende Lehrangebote. Im Rahmen des bayernweiten Masterstudiengangs und im Interesse einer flächendeckenden Ausbildungsoffensive sollte dieses Angebot allen Studierenden mit Fokus Fusionstechnologien zugänglich gemacht werden.

Die Expertenkommission weist ausdrücklich darauf hin, dass für den Bau und Betrieb von Fusionsanlagen, aber auch für die gewünschte Ansiedlung von Unternehmen zum Aufbau einer Lieferkette für Fusionstechnologien hochqualifiziertes Fachpersonal auch außerhalb des akademischen Bereichs eine wichtige Voraussetzung darstellt.

Deshalb muss neben der akademischen Ausbildung auch die Techniker Ausbildung und die nicht technische/akademische Ausbildung gestärkt werden, um die Industrialisierung von Fusionstechnologien voranzutreiben. Diese gezielte Ausbildung kann durch den Bavarian Fusion Cluster (mit-)organisiert werden. Dafür sind zusätzliche finanzielle Mittel notwendig. Insbesondere in der praxisnahen Ingenieurausbildung können die Hochschulen für Angewandte Wissenschaften (HAWs) eine Rolle spielen. Bezüglich konkreter Empfehlungen für die Lehre hat sich die Expertenkommission allerdings auf die universitäre Ausbildung konzentriert.

Die Ausbildungsoffensive stellt den Kern der Mission Kernfusion dar, da sie die Grundlage für alle weiteren Entwicklungen im Bereich der Forschung und industriellen Anwendung bildet. Ihr Erfolg wird entscheidend dazu beitragen, Bayern als einen führenden Standort der Kernfusionstechnologie zu etablieren.

## **5.5 Fusion Campus**

Experimente zur Fusionsforschung mit allen bekannten Technologien benötigen neben dezentralen Laboreinrichtungen auch Gebäude mit jeweils spezifischer Infrastruktur. Zusätzlich werden diese Experimente, sobald sie sich der Erprobung von Technologien und Materialien eines realen Kraftwerkes annähern, eine Infrastruktur benötigen, in der ein Umgang mit Tritium und anderen radioaktiven Stoffen möglich ist. Dabei werden entsprechend der Größe der Experimente Stoffmengen benötigt, die jenseits von laborüblichen Dimensionen liegen. Dies setzt deshalb einen Ort mit hinreichenden Genehmigungen, Sicherheitseinrichtungen, ausgebildetem Personal und eine enge räumliche Anbindung insbesondere an den Standort in München voraus. Idealerweise wird diese Infrastruktur zentral zumindest für Bayern geschaffen und ist hinreichend groß dimensioniert, um später auch Testexperimente in Kraftwerksgröße zu ermöglichen. Nicht zuletzt ist ein gemeinsamer Standort für alle bayerischen Fusionsexperimente jenseits der Labor dimension ein stark vernetzendes Element für das Forschungsökosystem und ein idealer Ort, um Wirtschaft und Academia ein gemeinsames Arbeiten zu ermöglichen. Schließlich ist solch ein Ort auch ein politisches Symbol für die ernsthafte Absicht der Staatsregierung, die Fusionsforschung hin auf ein Kraftwerk langfristig zu tragen und voranzutreiben. Diese politische Signalwirkung geht dabei über Bayern hinaus und gilt für alle Aktivitäten zumindest in Deutschland.

Die Expertenkommission betont, dass die Entscheidung über den Standort des Fusion Campus für die nächste Generation von Kerntechnologien und dessen Sicherung eine strategische Schlüsselrolle spielt. Es wird empfohlen, schnellstmöglich die Voraussetzungen für einen Fusion Campus in Bayern zu schaffen und dafür bis spätestens 2026 einen geeigneten zentralen Standort mit nuklearer Tüchtigkeit zu finden, zu sichern sowie mit dessen Entwicklung zu beginnen. Eine räumliche Nähe zum wissenschaftlichen Hauptstandort München ist wünschenswert für die Wirksamkeit des Campus. Eine Option könnte das Gelände des ehemaligen Kernkraftwerks Isar sein, das bereits über viele notwendige Voraussetzungen wie zum Beispiel einen Anschluss an die notwendige Infrastruktur, notwendige Sicherheitsvorkehrungen etc. verfügt.

Es muss sichergestellt werden, dass alle notwendigen Genehmigungen – unter anderem für die Arbeiten mit Tritium – eingeholt werden können.

Aus diesem Campus könnte dann durch graduellen Ausbau mittelfristig der erste Standort eines bayerischen Fusionskraftwerks entstehen.

Die Expertenkommission weist ausdrücklich darauf hin, dass für die Planung, Errichtung und den Betrieb des Fusion Campus substanzielle zusätzliche Mittel notwendig sind. Die in Aussicht gestellten Ressourcen der bestehenden Strategie reichen hierfür nicht aus. Die Finanzierung des Campus und seiner Infrastruktur erfordert daher eine enge Zusammenarbeit mit dem Bund, der EU und potenziellen internationalen Partnern. Die nachhaltige Bereitstellung dieser Mittel ist entscheidend, um den Fusion Campus als zentralen Baustein der Mission Kernfusion zu realisieren.

Der Campus soll als technologieoffene Infrastruktur konzipiert werden, die Experimente und Tests für Magnetfusion, Laserfusion und hybride Ansätze gleichermaßen ermöglicht. Er soll dabei nicht dezentralen Laboreinrichtungen im Wege stehen, sondern diese ergänzen. Der Zugang zu ihm muss für die Wirtschaft niederschwellig organisiert werden und sollte in der Verantwortung des Bavarian Fusion Clusters liegen.

Um die optimale Nutzung des Forschungscampus sicherzustellen, empfiehlt die Kommission die Entwicklung eines gemeinsamen Standortnutzungskonzepts für nukleare Technologien. Dieses Konzept soll die Anforderungen von Forschungseinrichtungen, Industriepartnern und internationalen Kooperationen gleichermaßen berücksichtigen. Ziel ist es, Synergien zwischen Magnetfusion, Laserfusion und verwandten Technologien zu schaffen und eine effiziente Nutzung der Infrastruktur zu gewährleisten.

## **5.6 Präsentation des Maßnahmenpapiers in der Community und in der Öffentlichkeit**

Die Ergebnisse der Expertenkommission sollen den politischen Auftraggebern überreicht und sowohl in der einschlägigen Fachcommunity als auch in der interessierten Öffentlichkeit bekannt gemacht und nachgehalten werden. Hierzu werden vorerst drei Elemente vorgeschlagen:

Zunächst soll dieses Abschlussdokument der Bayerischen Staatsregierung als Auftraggeberin in einer Veranstaltung auf politischer Ebene, möglichst noch im Januar 2025, übergeben und erläutert werden.

Weiterhin wird empfohlen, in einer geeigneten Veranstaltung gezielt die interessierte Bevölkerung anzusprechen. Die Organisation eines entsprechenden Beitrags soll in die Hände der Clusterleitung gelegt werden. Denkbar ist zum Beispiel eine Präsentation im Rahmen des Wissenschaftsjahres, das 2025 unter dem Motto „Zukunftsenergie“ steht. Eine weitere Variante könnte der Science Communication Hub im Rahmen des „Festivals der Zukunft“ sein. Das Festival findet vom 3. bis 5. Juli 2025 im Deutschen Museum in München statt.

Schließlich wird vorgeschlagen, die Empfehlungen der Kommission der Fachcommunity im Rahmen von Konferenzen zu präsentieren und zur Diskussion zu stellen. Mögliche Synergien mit anderen, bereits geplanten Fachkonferenzen in Deutschland sollten genutzt werden. Neben dem Austausch zu aktuellen nationalen, europäischen und internationalen Entwicklungen im Bereich der Fusionstechnologien kann in diesem Rahmen auch auf die Ausschreibungen für Professuren und Nachwuchsforschungsgruppen hingewiesen werden. Um insbesondere den wissenschaftlichen Nachwuchs zu erreichen und zu interessieren, bietet sich beispielsweise die Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft an, deren Sektion „Materie und Kosmos“, die die Plasmaphysik mit abdeckt, 2026 in Erlangen tagt (16. bis 20. März).

## **5.7 Struktur der Ressourcenansätze**

Die Staatsregierung hat angekündigt, bis 2028 einhundert Millionen Euro zur Verfügung zu stellen, um die Forschung für die Entwicklung eines kommerziellen Kraftwerks zu unterstützen. Diese Mittel sollen vorrangig in den Auf- und Ausbau der wissenschaftlichen Fusionslandschaft und in den Aufbau der akademischen Kompetenz in Bayern fließen. Auch die notwendigen Ressourcen für die Clusterleitung sind in diesem Ansatz enthalten. Von den zur Verfügung stehenden Ressourcen sollen etwa sechzig Millionen Euro in den Aufbau von Lehrstühlen und Nachwuchsgruppen fließen. Etwa dreißig Millionen Euro sollen für Projekte bereitstehen, die der Vernetzung der Akteure und der Verbundforschung dienen. Mithilfe dieser Projektmittel könnten beispielsweise auch Untersuchungen zur gesellschaftlichen Partizipation oder zur Wirtschaftlichkeit der Fusionstechnologien gefördert werden.

Weiterhin werden ab 2025 Mittel für Aufbau und Betrieb des Bavarian Fusion Clusters benötigt. Um dem Fusion Cluster die Möglichkeit zu geben, Verbundprojekte direkt zu entwickeln, sollte dieser einen erheblichen Teil der vorgesehenen dreißig Millionen Euro für Verbundprojekte zugewiesen bekommen. Die Bereitstellung und Entwicklung des Fusionscampus erfordert zusätzliche Mittel jenseits des Zeithorizontes 2028. Darunter fallen Erwerbungs- oder Mietkosten ebenso wie die Beteiligung an den Betriebskosten und eventuelle Erschließungen. Die eigentlichen Investitionen für Gebäude und Forschungsgeräte können nicht von Bayern allein getragen werden. Sie erfordern Finanzierungen mit dem Bund und/oder gar der EU oder internationalen Partnern. Dabei muss allerdings auf praktikable Modelle mit einfachen Regelungen geachtet werden, um die zeitlich notwendige Dringlichkeit der Bereitstellung des Campus zu erfüllen. Zielführend kann hier ein Stufenmodell sein, das anfänglich vor allem ausreichende Platzreserven vorsieht.

Eine Unterstützung mit Mitteln aus dieser Initiative von Start-ups sollte nur im Zusammenhang mit der Ausbildung von Fachkräften erfolgen, um den Fokus der Mission Kernfusion mit den hier vorgesehenen Mitteln auf Bildung und Ausbildung zu bewahren. Sehr nützlich im Hinblick auf die Ausrichtung hin auf ein Kraftwerk ist dabei eine jederzeit enge Verzahnung von akademischer Forschung und industrieller Entwicklung. Denkbar ist beispielsweise eine Nachwuchsforschungsgruppe, die an einem Start-up angesiedelt wird, oder ein gemeinsames Projekt, das beispielsweise auch der Ausbildung von Fachkräften dient.

Damit das entstehende Forschungsökosystem auch über 2028 hinaus erhalten bleibt, seine volle Wirkung entfalten und sein Ziel erreichen kann, müssen die einzurichtenden Professuren auch über 2028 hinaus nachhaltig und auskömmlich finanziert werden, müssen für Nachwuchsforschungsgruppen Tenure-Track-Optionen bestehen und längerfristig Mittel für die Vernetzung der Akteure bereitstehen.

In Abschnitt 5.3 wurde festgestellt, dass für eine umfängliche Abdeckung des Forschungsökosystems weitere Lehrstühle und bisher nicht eingeplante Nachwuchsforschungsgruppen erforderlich sind. Eine Richtgröße wären zusätzliche 3 Lehrstühle und 6 Nachwuchsforschungsgruppen sowie deren nachhaltige Finanzierung. Dies übersteigt den vorgesehenen Kostenrahmen. Es scheint nicht sinnvoll, anfänglich mit einer überzogenen Personalausstattung anzufangen, die dann entweder nicht hinreichend mit Sachmitteln versorgt werden kann, oder die keine Vernetzungsmittel für konkrete Projekte mehr vorfindet. Die Kommission schlägt daher vor, zu prüfen, inwieweit der Finanzrahmen und seine Folgekosten auf eine Zielzahl von bis zu 120 Millionen bis 2028 erweitert werden kann. Da es möglich ist, dass nicht alle der fest empfohlenen Maßnahmen bis 2028 umgesetzt werden können, könnte, wie in Abschnitt 5.3 skizziert, die Bildungs- und Ausbildungsoffensive zwar erweitert werden, ohne den bisherigen Rahmen der einhundert Millionen zu verlassen. Dieser Weg sollte allerdings nur dann eingeschlagen werden, wenn über 2028 hinaus die auskömmliche Folgefinanzierung der gesamten Mission Kernfusion nicht gefährdet wird.

## **5.8 Fahrplan für die Expertenkommission zur Umsetzung der weiteren Aufgaben aus dem Masterplan**

Als ersten Schritt nach Übergabe der Expertenempfehlungen erfolgt deren Bestätigung durch die Bayerische Staatsregierung und deren Veröffentlichung, womit die Arbeit der aktuellen Kommission formal abgeschlossen wird. Anschließend soll eine Clusterleitung eingesetzt werden, die die koordinierende Rolle im Bavarian Fusion Cluster übernimmt und die Umsetzung der empfohlenen Maßnahmen steuert.

Zur weiteren Unterstützung und Beratung des Clusters soll ein wissenschaftlicher Beirat eingerichtet werden, dessen Zusammensetzung teildentisch mit der aktuellen Expertenkommission sein kann. Parallel dazu wird die Implementierung von Berufungskommissionen initiiert, um die Besetzung der vorgeschlagenen Lehrstühle und Nachwuchsforschungsgruppen zügig voranzutreiben. Insbesondere die Hochschulen, an denen die initialen Lehrstühle etabliert werden sollen, müssen sich dazu verpflichten, die Berufungsverfahren schnell umzusetzen, um sie idealerweise noch 2025 erfolgreich abzuschließen.

Diese Schritte bilden die Grundlage für eine effiziente und nachhaltige Umsetzung der Mission Kernfusion in Bayern.