

Entwicklung von Kriterien zur Definition und Auswahl von Schlüsseltechnologien

Endbericht

Wien, 2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Autorinnen und Autoren: Florentine Frantz, Katharina Warta
(Technopolis Forschungs- und Beratungsgesellschaft m.b.H.)

Wien, 2025. Stand: 3. März 2025

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an
Alexander.Pogany@bmk.gv.at.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	1
1 Einleitung	5
2 Studiendesign	6
3 Europäischer Kontext	8
4 Nationale Zugänge zu Schlüsseltechnologien in ausgewählten Ländern	15
5 Nationale Rahmenbedingungen in Österreich	25
5.1 Stärkefelder und Herausforderungen	25
5.2 Ausgewählte bibliometrische Fallbeispiele	27
6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen	33
6.1 Definition von Schlüsseltechnologien	33
6.2 Kriterien und Indikatoren für die Identifikation und Verortung von Schlüsseltechnologien	34
6.3 Schlüsseltechnologiefelder und Schlüsseltechnologien	36
6.4 Schlüsseltechnologien, Technologieförderung im Kontext der FTI-Politik	38
7 Quellenverzeichnis	41
Anhang A Analyisierte Dokumente	44
Anhang B Themenlisten der bibliometrischen Analysen	47

Tabellen

Tabelle 1 10 Schlüsseltechnologieprioritäten und 44 Schlüsseltechnologien in den Niederlanden	21
Tabelle 2 Kriterien und Indikatoren für die Identifikation von Schlüsseltechnologien	35
Tabelle 3 Empfohlene Schlüsseltechnologiefelder und exemplarische Schlüsseltechnologien.	37
Tabelle 4 Themenliste Integriertes Schaltkreise	47
Tabelle 5 Themenliste Advanced Materials	47
Tabelle 6 Themenliste Quantentechnologien	48

Abbildungen

Abbildung 1	Kernelemente bei der Entwicklung von Kriterien zur Definition und Auswahl von Schlüsseltechnologien	7
Abbildung 2	Clustering der 15 Schlüsseltechnologiefelder	9
Abbildung 3	Überbrückung des "Valley of death" durch integrierte Schlüsseltechnologieförderungen	10
Abbildung 4	Missions-orientierter Ansatz zur Förderung von KETs 4.0	12
Abbildung 5	Messung Technologischer Souveränität global und pro KET	14
Abbildung 6	Zentrale Anwendungen der Schlüsseltechnologiefelder	15
Abbildung 7	Liste von adressierten Schlüsseltechnologiefeldern in internationalen Vergleich	19
Abbildung 8	Übersicht über Schlüsseltechnologiefelder, Strategien, Institutionen, Ziele, Investitionen und ausgewählter Fördermaßnahmen	20
Abbildung 9	Beispielhafte Darstellung der Einordnung von Schlüsseltechnologien in der internationalen Positionierung sowie der Einstufung der Bedeutung für Wertschöpfungsketten	24
Abbildung 10	Anzahl globaler Publikationen nach Schlüsseltechnologiefeldern und Subfeldern	29
Abbildung 11	Internationaler Vergleich der Performance (wissenschaftlicher Impact, Spezialisierung und Patent Impact) - Quantum Computing and Simulation	30
Abbildung 12	Internationaler Vergleich der Performance (wissenschaftlicher Impact, Spezialisierung und Patent-Impact) – Silicon Photonics Technology	31
Abbildung 13	Internationaler Vergleich der Performance (wissenschaftlicher Impact, Spezialisierung und Patent-Impact) – Polymer Research	32

Executive Summary

Die Erforschung und Entwicklung von Schlüsseltechnologien wird in Europa, auf nationaler sowie Unionsebene, seit rund 20 Jahren explizit unterstützt. Die gezielte Förderung von Technologien, denen bereits in frühen Entwicklungsstadien ein hohes Potential für die breite Einsetzbarkeit in unterschiedlichen Wertschöpfungsketten und Anwendungsbereichen zugetraut wird, soll einen wettbewerblichen und systematischen Mehrwert liefern. Dieser Bericht zeigt auf, wie sich das Verständnis und die Verwendung des Konzepts der „Schlüsseltechnologien“ diskursiv im Laufe der Zeit verändert hat. Diese Entwicklung zeigt Verschiebungen im Fokus, die sich aus neuen – teilweise globalen – Herausforderungen ergeben. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass die Konzepte Spannungen und Zielkonflikte mit sich bringen: Für was kann oder soll eine Schlüsseltechnologie der Schlüssel sein? Wo liegt der Fokus, auf Wettbewerbsfähigkeit, der Lösung großer gesellschaftlicher Herausforderungen, oder technologischer Souveränität? Die Förderung von Schlüsseltechnologien folgt also nicht einer rein technologischen Logik, sondern muss als politisches Instrument verstanden werden, bei dem strategische Dimensionen und eine Verortung im nationalen und internationalen Kontext im Vordergrund stehen. Neben der Komplexität von möglichen Ziel- und Interessenskonflikten bei der Förderung stellen auch die konkrete Ein- und Abgrenzung von Technologien, sowie deren dynamische Entwicklung eine Herausforderung für die Definition und Auswahl dar.

Ziel der vorliegenden Studie ist, aufbauend auf Analysen der internationalen Diskurse und Dynamiken, spezifischer nationale Zugänge zu Schlüsseltechnologien, sowie der Rahmenbedingungen in Österreich, eine aktualisierte Definition von Schlüsseltechnologien zu entwickeln und aufzuzeigen, in welchem Kontext ein Wissensbedarf für die Zuordnung und Messung besteht, um aussagekräftige und anschlussfähige Indikatoren und Messgrößen für Schlüsseltechnologien in Österreich zu entwickeln. Zudem wurden Empfehlungen für die Förderung von Schlüsseltechnologien im Kontext der österreichischen FTI-Politik gegeben.

Europäischer Kontext

Eine Analyse des europäischen Diskurses zeigt, dass sich im Laufe der letzten zwei Jahrzehnte unterschiedliche Ziele, Interventionslogiken sowie Technologieverständnisse überlagert haben. Nach wie vor sind diese oft gleichzeitig präsent, dies führt zu Unschärfen in der Definition. Konkret kann zwischen vier Phasen unterschieden werden:

- In den frühen 2000er Jahren wurden langfristige, strategischen Investitionen in Schlüsseltechnologien als Möglichkeit der Stärkung von „creative system disruption“ gesehen. Alte Technologietransfer-Paradigmen sollten durch eine gezielte Förderung von Schlüsseltechnologien aufgebrochen und die Aufnahme von wissenschaftlichen Ergebnissen in Wirtschaft und Gesellschaft effizienter gestaltet werden. Der Schlüsseltechnologiebegriff („**Key Technologies**“) der diesbezüglichen High-Level Expert Group baut auf einem breiten Verständnis von „Technologie“ auf (Key Technologies Expert Group, 2005). Die Kommission definierte 15 Forschungsfelder, welche nicht nur naturwissenschaftlich-technische Wissenschaften, sondern auch Geistes- und Sozialwissenschaften sowie angewandte Forschung in Bereichen der Landwirtschaft, Energie, Verkehr, Umwelt, Gesundheit, Sicherheit und Services umfassten. Somit standen nicht nur konkrete technologische Neuerungen und Innovationspotentiale im Zentrum, sondern auch die gesellschaftliche und wirtschaftliche Absorptionskapazität von neuen Technologien.

- Im Jahr 2009 präsentierte die Europäische Kommission Strategiepapiere, in denen ein integrierter Ansatz zur Förderung von **Key Enabling Technologies** (KETs) vorgestellt wurde. Das Verständnis von Schlüsseltechnologien als ermöglichende („enabling“) Technologies legte dabei einen Fokus auf Technologien, die Innovationen und Anwendungen in vielen unterschiedlichen Bereichen ermöglichen sollen. Dieser Fokus auf Key Enabling Technologies bildet sich allerdings in der Übersetzung auf Deutsch nicht ab und es wird auch weiterhin von Schlüsseltechnologien gesprochen oder die englische Bezeichnung verwendet. Die Eingrenzung auf sechs Schlüsseltechnologiefelder¹ ermöglichte eine gezieltere Priorisierung von Initiativen und war lange Zeit ein zentraler Referenzpunkt für die europäische Innovationspolitik. Es wurde gezielt Synergien verschiedenen Förderungen auf nationaler und europäischer Ebene unterstützt. Dies sollte zudem zu der Verbesserung von Rahmenbedingungen als auch dem Kapazitätsaufbau zu europaweiten „Economies of Scale and Scope“ beitragen. Das Hauptziel der vorgestellten Maßnahmen galt einem effizienteren Wissens- und Technologietransfer. Statt eine umfassende systemische Perspektive beizubehalten, konzentrierte man sich nun stärker auf die Kombination von inhaltlichen Stärkefeldern und Lücken im Transferprozess (Überbrückung des „Valley of Death“).
- Im Jahr 2018 veröffentlichte die „High-Level Group on Industrial Technologies“ einen Bericht zur Überarbeitung der bestehenden KET Strategie („**KETs 4.0**“). Eine zentrale Empfehlung war es, den Begriff der Schlüsseltechnologien, um deren Beitrag zu großen gesellschaftlichen Herausforderungen zu erweitern. Es ging also vermehrt darum zu verstehen, für welche Herausforderungen Technologien sozusagen „der Schlüssel“ sein können. Dabei wird das erklärte Ziel der KET Förderung, der Beitrag zur europäischen Wettbewerbsfähigkeit erweitern, es werden nun auch Impact, eine hohe systemische Relevanz, zentrale Kapazitäten zur Verbesserung von Gesundheit, Sicherheit und Nachhaltigkeit, als auch die Unterstützung von grünem Wachstum und Kreislaufwirtschaft erwähnt. Aufbauend auf diesen Kriterien empfiehlt die High-Level Group eine Neugruppierung und Erweiterung der KET Felder um „Artificial intelligence“ und „Digital Security and Connectivity“. Allerdings fanden diese Empfehlungen vergleichsweise wenig Resonanz.
- In letzter Zeit gibt es wieder eine neue Welle der Aufmerksamkeit für Schlüsseltechnologien im Rahmen der Reflexionen zur **technologischen Souveränität** Europas. Geprägt von der veränderten geopolitischen Situation und von globalen Krisen rückte die Sorge in Bezug auf Abhängigkeiten von Ressourcen und Rohstoffen für die Entwicklung und Produktion von Schlüsseltechnologien, insbesondere von nicht-europäischen Anbietern, ins Zentrum. Der Begriff der Schlüsseltechnologien überlappt sich in präsentierten Studien mit dem kritischer Technologien. Dabei wird, beispielsweise in einem vielzitierten Bericht des „Panel for the Future of Science and Technology“ (Ramahandry et al., 2021) auch explizit zwischen zentrale Anwendungen und kritische Abhängigkeiten eingegangen. Die Zuspitzung auf einzelne KET Felder kann zudem auch in aktuellen Initiativen wie dem European Chips Act oder den „Advanced Materials for Industrial Leadership“ beobachtet werden.

Nationale Zugänge zu Schlüsseltechnologien in ausgewählten Ländern

Der Bericht reflektiert kurz die aktuellen geopolitischen Dimensionen des Schlüsseltechnologiebegriffs und die damit verbundenen Dynamiken, vor allem vor dem

¹ Advanced materials, Nanotechnology, Micro- and nano-electronics, Biotechnology, Photonics, und Advanced Manufacturing

Hintergrund, dass China zunehmend in eine Führungsrolle in der Produktion und Entwicklung von Schlüsseltechnologien einnimmt. Eine detaillierte Analyse von nationalen Strategien der USA und China war allerdings im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Vielmehr wurde ein Augenmerk auf spezifische Europäische Partnerländer und deren Strategien, Positionierungen und Maßnahmen gelegt.

Einerseits die Bemühungen in Deutschland zur Technologischen Souveränität, bei der Schlüsseltechnologieinitiativen beschrieben wurden, welche auf unterschiedliche Technologien, gezielte Anwendungsfelder oder die Kombinationen von Schlüsseltechnologien ins Zentrum setzen. Andererseits der partizipative Prozess in den Niederlanden, bei welchem durch langfristige Einbindung nationaler Stakeholder nicht nur konkrete Technologien definiert wurden, sondern auch konkrete von Stakeholdern getragene Aktionsagenden erarbeitet wurden. Außerdem wird auf eine Studie der schwedischen Innovationsagentur Vinnova verwiesen, die zeitlich mit der hiervorliegenden Studie über mögliche über die Identifikation von strategischen Technologien berichtet.

Nationale Rahmenbedingungen in Österreich

Etwa Zeitgleich mit der vorliegenden Studie wurde vom WIFO in Zusammenarbeit mit Joanneum Research ein Studie zu Position dem Potential Österreichs in Schlüsseltechnologien verfasst (Hofmann et al., 2024). Diese stützt sich auf statistische Analysen (Patentdaten, Handelsdaten) und kontextualisiert diese durch Interviews mit Vertreter*innen der österreichischen Technologieplattformen. So identifiziert Stärken bzw. Spezialisierungen Österreichs Spezialisierungen in Material- und Produktionstechnologien sowie Umwelttechnologien. Schwächen zeigen sich in Künstlicher Intelligenz, Big Data und Cybersicherheit, wobei es hier wiederum zahlreicher Start-ups gibt. Etwa die Hälfte der Fördermittel der FFG im Bereich fortschrittlicher Technologien fließen in die identifizierten Schlüsseltechnologien und hier überwiegend in digitale Technologien und Produktion. Die Untersuchungen sind ein wertvoller Beitrag zu einer evidenzbasierten Positionierung Österreichs, und zeigen die Herausforderungen auf, die mit der Klassifizierung von Technologien und der damit verbundenen Grobkörnigkeit einhergehen.

Im Rahmen dieser Studie wurde das Potential von bibliometrischen Analysen (Wissenschaftlicher Impact, Spezialisierung, Patent Impact) für die Positionierung Österreichs in drei Schlüsseltechnologiefeldern erprobt: Quantentechnologien, Mikrochips (Integrierte Schaltkreise) und Advanced Materials, und damit Technologiefeldern, in denen aktuell sowohl auf nationaler als auch auf Europäischer Ebene diverse Initiativen gesetzt werden.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Aufbauend auf der Definition von Schlüsseltechnologien der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2009 wurde eine Definition für Schlüsseltechnologien erarbeitet, welche die diskursiven Entwicklungen entsprechend berücksichtigt:

Schlüsseltechnologien sind wissensintensiv und gehen mit einer hohen F&E-Intensität, schnellen Innovationszyklen, hohen Investitionsausgaben und hochqualifizierter Beschäftigung sowie hochspezifischen Produktionskapazitäten einher. Sie ermöglichen Prozess-, Güter- und Dienstleistungsinnovationen in der Wirtschaft und Gesellschaft. Sie sind multidisziplinär und erstrecken sich über viele Technologiebereiche, wobei ein Trend zur Konvergenz und Integration in Schlüsseltechnologien zu beobachten ist. Sie sind von systemischer Bedeutung, als Input zu kritischen Schlüsseltechnologien und durch ihren potenziell hohen Einfluss auf die nachhaltige Entwicklung von Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt.

Aufbauend auf den Analysen dieser Studie wurden acht Schlüsseltechnologiefelder empfohlen. Diese spiegeln die aktuellen europäischen Bestrebungen wieder und sollen – ausgehend auch von hiesigen Stärkefeldern – die Anschlussfähigkeit und Positionierung Österreichs im internationalen Kontext sicherstellen. Diese Felder beschreiben Technologiebereiche in unterschiedlichen Entwicklungsstadien und mit unterschiedlich dynamischer Entwicklung, denen ein strategische Entwicklungspotential zugetraut wird und aktuell international Mittel gezielt in Forschung und Entwicklung investiert.

Abschließend reflektieren wird die Ansätze zur Förderung von Schlüsseltechnologien in Anbetracht der Herausforderungen hinsichtlich der Ein- und Abgrenzung von Schlüsseltechnologien, der dynamischen Entwicklung sowie von beobachteten Ziel- und Interessenskonflikten. Wir erachten eine Einbindung vielfältiger Stakeholder- und Nutzer*innenperspektiven, ein Monitoring von Positionierung und Potentialen, sowie eine Differenzierung von konkreten Schlüsseltechnologien in den breiteren Schlüsseltechnologiefeldern als notwendig, um treffsichere Maßnahmen setzen zu können. Inspiriert von Erfahrungen in anderen europäischen Ländern empfehlen wir für die Umsetzung dieser Bestrebungen einen Prozess entlang von vier Schritten:

- **Bewertung der Positionierung von Stakeholdern Österreichs** in der Entwicklung, Produktion und Nutzung sowie der wissenschaftlichen Voraussetzungen für Schlüsseltechnologiefelder und konkreter Schlüsseltechnologien.
- **Stakeholder und Szenarien-Workshops** um das konkrete Potenzial und den Bedarf für Fördermaßnahmen abschätzen. Außerdem sind solche Workshops eine Gelegenheit, Zielkonflikte frühzeitig zu erkennen und in der Strategie mit zu berücksichtigen.
- **Definition eines Portfolios konkreter Maßnahmen und Initiativen**, die es ermöglichen, auf explizite Ziele, Anwendungsgebiete, oder Nischen einzugehen. Im Sinne eines „Whole of Government-Ansatzes“ ist eine Abstimmung der unterschiedlichen Ressorts auf nationaler und länderebene (BMAW, BMBWF, BMF, BMK) für die Förderung von Technologien, Export, Ausbildung, Wissenschaft erstrebenswert. Weiters gilt es in der Entwicklung der Initiativen die Anbindung an europäische Maßnahmen sicherzustellen.
- Abschließend empfehlen wir, diese Maßnahmen von einer **Expert*innengruppe** für Schlüsseltechnologien begleiten zu lassen, um z.B. zweimal pro Jahr für ausgewählte Schlüsseltechnologien die Ergebnisse des Monitorings zu diskutieren und im jeweiligen Kontext zu analysieren, und zweitens das Bild über Maßnahmen und Initiativen oder auch (neue) Herausforderungen und Chancen für Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft zu aktualisieren.

1 Einleitung

Seit rund 20 Jahren kann europaweit eine zunehmende Aufmerksamkeit für und Förderung von „Schlüsseltechnologien“ beobachtet werden. Dieser Bericht wird aufzeigen, wie sich das Verständnis und die Verwendung des Konzepts entwickelte – durchgängig werden als Schlüsseltechnologien Technologien bezeichnet, die ein breites Einsatzgebiet in unterschiedlichen Anwendungsbereichen aufweisen. Diese Relevanz für unterschiedliche Wirtschaftszweige erklärt auch, warum ihnen eine systemische Bedeutung zugeschrieben wird, deren Mehrwert weit über die jeweiligen technologischen Wertschöpfungsketten hinaus reicht.

Schlüsseltechnologien als Hoffnungsträger

Mit der gezielten Förderung von Schlüsseltechnologien sind Hoffnungen in mehreren Dimensionen verbunden: Durch die Entwicklung und Fertigung solcher Technologien sollen nationale bzw. europäische Alleinstellungsmerkmale ausgebaut und Wettbewerbsvorteile gesichert werden (Kroll et al., 2022). Zudem soll sichergestellt werden, dass die nationalen Betriebe den Anschluss an internationale Entwicklungen nicht verlieren. In den letzten Jahren wird Schlüsseltechnologien auch im Hinblick auf die globalen und nationalen Herausforderungen eine immer größere Bedeutung zugeschrieben (Waßenhoven et al., 2023). Nicht zuletzt geht es dabei auch um die Stärkung von technologischer Souveränität angesichts aktueller geopolitischer Entwicklungen und somit Abhängigkeiten in der Produktion und Entwicklung von zentralen Technologien zu reduzieren (Ramahandry et al., 2021).

Herausforderungen bei der Definition von Schlüsseltechnologien

So umfassend das Konzept von Schlüsseltechnologien ist, so schwierig erweist sich die Suche nach einer präzisen Definition, die als Basis für die Operationalisierung der Förderung von Schlüsseltechnologien verwendet werden kann:

- Die Frage nach einer **geeigneten Ein- und Abgrenzung** stellt sich auf mehreren Ebenen: Neben der grundsätzlichen Frage, in welchen *Entwicklungsfeldern* man große Technologiesprünge erwartet, wo diese bereits beobachtet werden und wie diese abzugrenzen sind, gibt es auch unterschiedliche Argumente, bei welchen technologischen *Entwicklungsstufen* (Technology Readiness Level, TRL) die Förderung ansetzen soll. Werden dabei Projekte entlang der gesamten Forschungs- und Entwicklungskette gefördert, oder wird auf einzelne Entwicklungsphasen fokussiert? Gerade im hochtechnologischen Bereich können die Überschneidungen und Abhängigkeiten unterschiedlicher Schlüsseltechnologien sehr vielfältig sein. Das Verhältnis von Schlüsseltechnologien und die Schlüsselanwendungen, in denen diese Technologien eingesetzt werden, ist daher komplex. Durch diese vielschichtigen Interdependenzen erweisen sich auch die Impactmessung und das langfristige Monitoring von Schlüsseltechnologieförderungen als komplex. Der Diskurs fokussiert in der Folge entweder auf einzelne Technologien oder aber er bleibt etwas abstrakt.
- **Dynamische Entwicklung:** Technologische Weiterentwicklung macht Schlüsseltechnologien zu einem „*Moving Target*“. Förderportfolios müssen kontinuierlich angepasst werden, die Auswirkungen von Förderungen sind erst über einen längeren Zeitraum sichtbar. Es stellt sich die Frage: Kann eine Schlüsseltechnologie diesen Status auch verlieren? Die *unterschiedlichen Geschwindigkeiten* in der Entwicklung von Schlüsseltechnologien machen die Zuordnung noch komplizierter (Kroll et al. 2022). Manche etablierten Technologien (z.B. Lasertechnologien) haben eine geringe Dynamik, andere eine langfristige, kontinuierliche Dynamik (z.B. Mikroelektronik). Dann gibt es auch Schlüsseltechnologien mit einem schlagartigen, beinahe exponentiellen Wachstum (z.B.

künstliche Intelligenz). Um ihr Potential zu entfalten, brauchen Technologien jedoch in unterschiedlichen Phasen unterschiedliche Arten der Unterstützung. Das Design der Förderung von Schlüsseltechnologien muss auf diese Vielfältigkeit eingehen.

- **Ziel- und Interessenskonflikte:** Eine weitere Herausforderung ist die Frage, für wen die Technologien einen Schlüssel für was darstellen? Geht es um Schlüsselentwicklungen oder um Schlüsselanwendungen? („Key for Technology or Key for Users²“). Außerdem sind die unterschiedlichen Hoffnungen und Ziele, die mit der Förderung von Schlüsseltechnologien verbunden sind (Wettbewerbsfähigkeit, Technologische Souveränität, Beitrag zu großen gesellschaftlichen Herausforderungen) nicht notwendigerweise im Einklang miteinander. Wie positioniert man sich im Spannungsfeld von Anschlussfähigkeit, Vergleichbarkeit, Kooperation und Wettbewerb, sowohl national als auch international? Welche Herausforderungen können national, welche nur transnational gelöst werden?

Ziele der Studie

Die Förderung von Schlüsseltechnologien folgt also nicht einer rein technologischen Logik, sondern muss als politisches Instrument verstanden werden, bei dem strategische Dimensionen und eine Verortung im nationalen und internationalen Kontext im Vordergrund stehen. Ziel der vorliegenden Studie ist es, ein besseres Verständnis der Spannungsfelder und Herausforderungen für die Förderung von Schlüsseltechnologien zu entwickeln, um eine bewusste Positionierung zu ermöglichen und Definitionen und Kriterien für die Schlüsseltechnologieförderung in Österreich darzulegen. Dafür ist eine Einbettung in internationale Diskurse und Dynamiken und in den Wirtschafts- und Forschungsstandort Österreich relevant. Aufbauend auf eine Übersicht der europäischen Entwicklungen, spezifischer nationaler Zugänge zu Schlüsseltechnologien und nationalen Rahmenbedingungen in Österreich soll diese Studie aufzeigen, in welchem Kontext ein Wissensbedarf für die Zuordnung und Messung besteht, um aussagekräftige und anschlussfähige Indikatoren und Messgrößen für Schlüsseltechnologien in Österreich zu entwickeln.

Aufbau des Berichts

Im Folgenden wird in Kapitel 2 das Studiendesign dargelegt. Kapitel 3 beleuchtet den Diskurs zu Schlüsseltechnologien auf EU-Ebene über die letzten 20 Jahre, ergänzt durch internationale Literatur. In Kapitel 4 werden nationale Zugänge zu Schlüsseltechnologien ausgewählter Staaten reflektiert (China, US, Niederlande, Deutschland). Kapitel 5 nimmt den Schlüsseltechnologiestandort Österreich in den Blick, beschreibt konkrete Stärkefelder und Herausforderungen und zeigt anhand einiger Technologiefelder Ergebnisse von bibliometrischen Untersuchungen. Kapitel 6 fasst die Schlussfolgerungen und Empfehlungen der Studie zusammen.

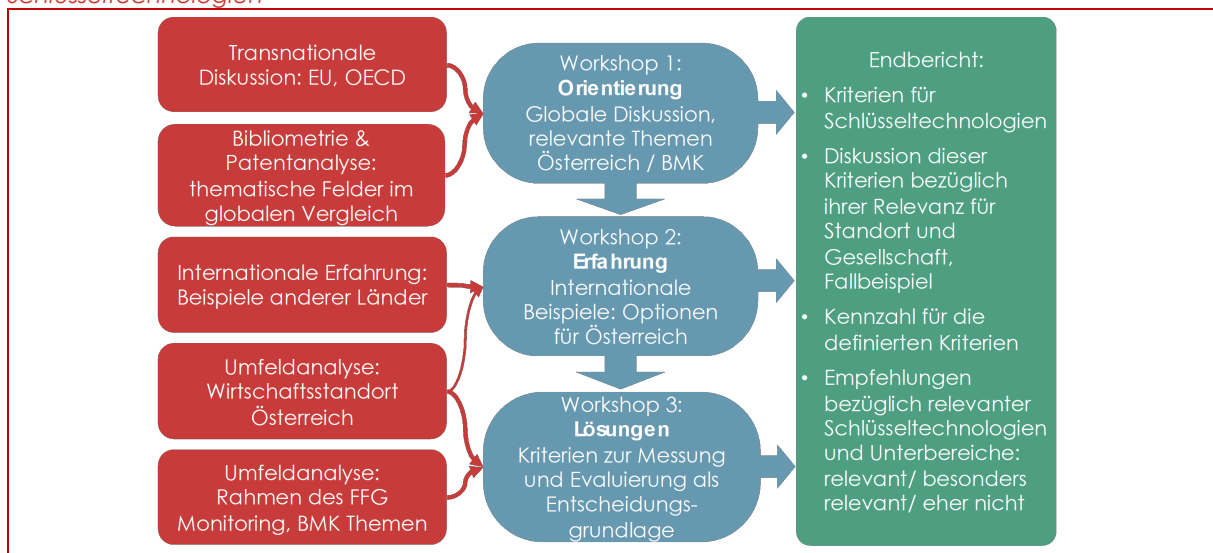
2 Studiendesign

Die Studie folgt einem pragmatischen und doch wissenschaftlich fundierten Zugang, indem Erfahrungen im Rahmen einer Reihe von Workshops interaktiv zusammengetragen werden und quantitative und qualitative Analysen vor und nach den Workshops den Wissensstand zu den aufgeworfenen Fragen unterstützen. Dies ermöglicht eine nuancierte Bearbeitung der

² Als „User“ werden hier sowohl Technologie- und Innovationsentwickler als auch Anwendende verstanden.

Thematik durch sich ergänzende Perspektiven. Analysen und konkrete Beispiele wurden in drei Workshops präsentiert und diskutiert. Die Ergebnisse wurden aufbauend auf den Erfahrungen und dem Wissen im BMK und in der FFG in einem Co-Creation Prozess gemeinsam weiterentwickelt. Zudem wurden in jedem der drei Workshops Expert*innen eingeladen spezifische Inputs zu geben. Die Workshops bildeten einen integralen Bestandteil dieses Projekts, da sie ermöglichen, bei der Entwicklung der Indikatoren mit der FFG und etwaigen anderen relevanten Stakeholdern in Austausch zu treten, blinde Flecken zu vermeiden und hilfreiche Ressourcen zu nutzen. Die Workshops bauten aufeinander auf und hatten unterschiedliche Zielsetzungen.

Abbildung 1 Kernelemente bei der Entwicklung von Kriterien zur Definition und Auswahl von Schlüsseltechnologien



Quelle: Technopolis

Der erste Workshop lenkte den Blick auf die konzeptuelle Literatur über Definitionen und Indikatoren und auf Analyse von Patenten und Bibliometrie. Auf Basis von Literaturrecherche³ wurde die Entwicklung und Veränderungen des Begriffs „Schlüsseltechnologie“ auf europäischer Ebene analysiert und präsentiert, die phasenweise dieses Konzept ins Zentrum ihrer Forschungs- und Innovationspolitik (F&I Politik) stellte. Im Unterschied zur Europäischen Kommission konzentriert sich die OECD in diesem Bereich lange Zeit eher auf einzelne Technologien als auf einen generischen Key Technology Begriff. Erst in den letzten Jahren wird vermehrt auf die strategische Bedeutung von „key emerging Technologies“ eingegangen (OECD, 2023). Zusätzlich wurden Publikations- und Patentdaten für drei Schlüsseltechnologiefelder analysiert, die in der Literaturrecherche als besonders zentral identifiziert wurden (Mikrochips / Integrierte Schaltkreise, advanced Materials und Quantentechnologien), sowohl was den Vergleich von Stärkefeldern zwischen wissenschaftlichem und angewandtem Transfer betrifft als auch den Vergleich mit anderen Ländern (Kapitel 5.2). Bei diesem Workshop nahmen Alistair Nolen vom OECD's Directorate for Science, Technology and Innovation und Diogo Machado, Head der Technopolis Data

³ Siehe Anhang A.

Science Unit, online teil. Ergänzend führten wir ein Interview über den europäischen Kontext mit Doris Schröcker von der europäischen Kommission.

Der zweite Workshop beschäftigte sich mit Erfahrungen mit der Umsetzung einer Schlüsseltechnologie-bezogenen Politik in anderen Ländern. Für diesen Workshop wurden Vortragende aus den Niederlanden (Leo Warmerdam, Direktor von Holland High Tech, dem Spitzensektor High-Tech Systems and Materials), aus Deutschland (Engelbert Beyer, Leiter Unterabteilung "Forschung für die Digitalisierung und Innovationen" im deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung) sowie aus Italien (Luca de Angelis, Generaldirektor für Emerging Technologies in Italiens Ministerium für Unternehmen und Made in Italy) eingeladen. Zudem wurden auch Recherchen über die Schlüsseltechnologienpolitik in China und den Vereinigten Staaten diskutiert.

Schließlich suchte der dritte Workshop konkret nach der Identifikation von Definitionen, Indikatoren und Messgrößen im österreichischen institutionellen Kontext und mit Relevanz für die österreichische Wirtschaft und Gesellschaft. Der Input für diesen Workshop baute auf Umfeldanalysen des Wirtschaftsstandortes sowie im Rahmen der FFG und des BMK auf, mit wertvollen Beiträgen von Jürgen Janger (WIFO) und Peter Klimek (ASCII – Supply Chain Intelligence Institute Austria). Zudem verfolgten wir als teilnehmende Beobachterinnen auf der IMAGE Konferenz des BMK 2024 Vernetzungs-Workshops den Austausch zur aktuell laufenden Ausschreibung der FFG zu „Schlüsseltechnologien im produktionsnahen Umfeld, 2024“.

3 Europäischer Kontext

Schlüsseltechnologien spielen seit rund 20 Jahren eine zentrale Rolle im europäischen Diskurs zu Koordinierung von Forschungs- und Entwicklungspolitik. Über diesen Zeitraum hinweg haben sich unterschiedliche Ziele, Interventionslogiken sowie Technologieverständnisse überlagert. Nach wie vor sind diese oft gleichzeitig präsent, dies führt zu Unschärfen in der Definition von Schlüsseltechnologien. Um mit dieser Studie zu einer bewussteren Positionierung in der österreichischen Politikgestaltung beizutragen, werden im Folgenden die Entwicklungen im europäischen Kontext möglichst kompakt nachgezeichnet.

„Key Technologies“

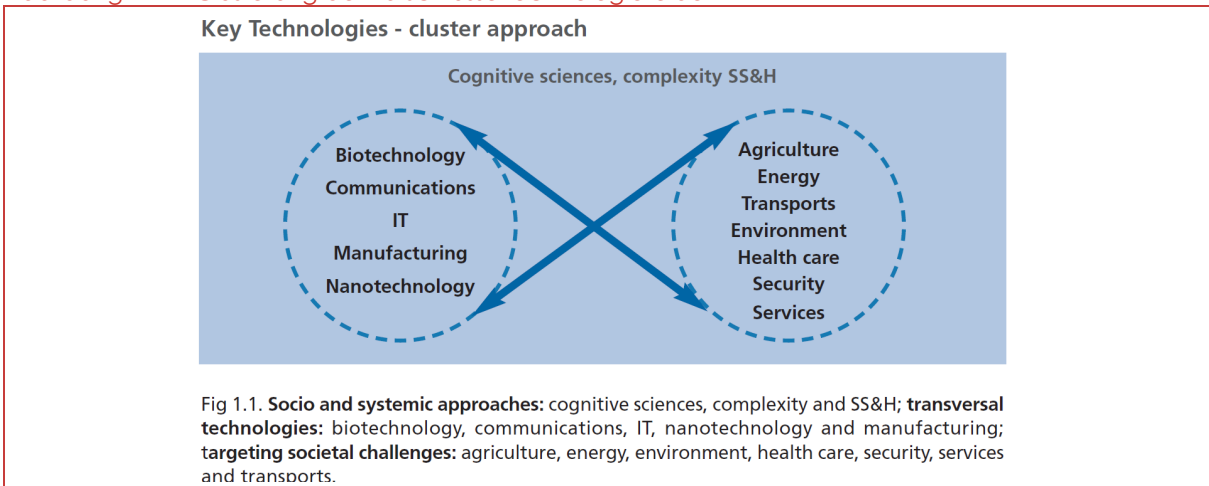
Im Jahr 2005, etwa in der Mitte der Laufzeit des 6. Rahmenprogramms für Forschung (2002-2007), mit dem die Stärkung des Europäischen Forschungsraums eingeführt wurde, wurde die „High-Level Key Technologies Expert Group“ von der europäischen Kommission damit beauftragt, das Potential von 15 Schlüsseltechnologiefeldern hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit und deren gesellschaftlichen Einfluss zu untersuchen (Key Technologies Expert Group, 2005). Die Expertengruppe sah in den langfristigen, strategischen Investitionen in Schlüsseltechnologien die Möglichkeit einer „creative system disruption“. Alte Technologietransfer-Paradigmen sollten durch eine gezielte Förderung von Schlüsseltechnologien aufgebrochen und die Aufnahme von wissenschaftlichen Ergebnissen in Wirtschaft und Gesellschaft effizienter gestaltet werden.⁴ Die Förderung von Schlüsseltechnologien wurde dabei als Balanceakt zwischen unterschiedlichen Trends und Ansätzen positioniert:

⁴ Original: "The European economic model is built upon old paradigms and a R&D system which is strong in generating knowledge but unable to transmit effectively its results to the economy. The way forward for Europe depends on a creative system disruption based on long-term coherent investments in Key Technologies." (Key Technologies Expert Group, 2005, S. 5)

- Differenzierungs- vs. Aufholstrategien ausgehend von bereits bestehenden Forschungsstärken in der EU
- Entwicklung einer langfristigen Vision für „creative system disruption“, anstatt sich mit Systemversagen und der Überwindung bestehender Schwächen zu befassen
- Formulierung kurzfristiger und langfristiger Strategien: langfristige Unterstützung der Grundlagenforschung vs. kurzfristigen Prioritäten der angewandten Forschung
- Abwägen von Kooperationsansätzen für eine langfristige Forschungsvision und dem Wettbewerbsdruck der Lissabon-Agenda.⁵

Aus heutiger Sicht erkennt man die Prägung der Zeit vor der Finanzkrise 2007, wo auf die Umsetzung der in der Lissabon-Agenda definierten Investitionsziele für Forschung- und Entwicklung von 3% geschaut wurde und man sich insbesondere auf die Positionierung Europas im globalen Wettbewerb bezog. Der Schlüsseltechnologiebegriff („Key Technologies“) dieser High-Level Expert Group baut auf einem breiten Verständnis von Technologie auf. Es wurde von 15 Forschungsfeldern gesprochen, welche nicht nur naturwissenschaftlich-technische Wissenschaften, sondern auch Geistes- und Sozialwissenschaften sowie angewandte Forschung in Bereichen der Landwirtschaft, Energie, Verkehr, Umwelt, Gesundheit, Sicherheit und Services (siehe Abbildung 1) umfassen. Somit standen nicht nur konkrete technologische Neuerungen und Innovationspotentiale im Zentrum, sondern auch die gesellschaftliche und wirtschaftliche Absorptionskapazität von neuen Technologien. Die Schlüsseltechnologiefelder wurden von der Kommission vorgeschlagen und es wurde jeweils ein ausführlicher Bericht zu den aktuellen und erwarteten Entwicklungen vorgelegt.

Abbildung 2 Clusterung der 15 Schlüsseltechnologiefelder



Quelle: Key Technologies Expert Group, 2005, S. 20

„Key Enabling Technologies - KET“

In den Jahren 2009 und 2012 bezog man sich (wohl infolge der Finanzkrise) auf das Wachstumspotenzial aus F&E. Nun präsentierte die Europäische Kommission Strategiepapiere,

⁵ Original: “Beyond Lisbon: balancing opposing trends and approaches: Differentiation vs. catching-up strategies building on existing EU research strengths; A long-term vision to engineer a creative system transition/disruption rather than merely addressing system failure and overcoming existing weaknesses; Articulating short-term and long-term strategies: support for long-term basic research opportunities vs. short-term applied research priorities.; Balancing cooperation approaches for a long-term research vision with the competitive pressures of the Lisbon agenda.” (Key Technologies Expert Group, 2005, S. 8)

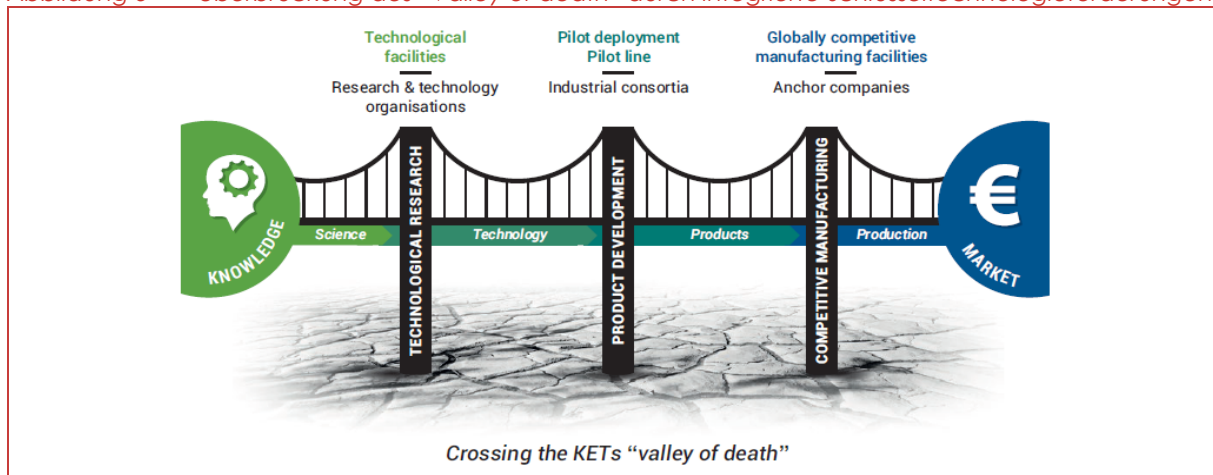
in denen ein integrierter Ansatz zur Förderung von Key Enabling Technologies (KETs) vorgestellt wurde (Commission of the European Communities, 2009; European Commission, 2012).

Das Verständnis von Schlüsseltechnologien als ermöglichende („enabling“) Technologies legt einen Fokus auf Technologien, die Innovationen und Anwendungen in vielen unterschiedlichen Bereichen ermöglichen sollen. Die Zuspitzung auf „Key“ Enabling Technologies hebt weiterhin die strategische Bedeutung dieser Technologien für europäische Wertschöpfungsketten hervor. Dieser Fokus auf Key Enabling Technologies, bildet sich allerdings in der Übersetzung auf Deutsch nicht ab und es wird auch weiterhin von Schlüsseltechnologien gesprochen oder die englische Bezeichnung verwendet.

Sechs Schlüsseltechnologiefelder wurden von der EU-Kommission in den Fokus gesetzt, in denen die vorgestellten Maßnahmen einen effizienteren Wissens- und Technologietransfer unterstützen sollten: Advanced materials, Nanotechnology, Micro- and nano-electronics, Biotechnology, Photonics, und Advanced Manufacturing. Statt der umfassenden systemischen Perspektive beizubehalten, konzentrierte man sich nun stärker auf die Kombination von inhaltlichen Stärkefeldern und Lücken im Transferprozess.

Zentral war dabei die Abstimmung von Förderungen und Initiativen auf europäischer und nationaler Ebene entlang des gesamten Förderungs- und Entwicklungsprozesses. Durch bessere Koordination sollte das „Valley of Death“⁶ zwischen der Produktion von exzellentem Wissen und der Anwendung in Produkten und Dienstleistungen gemeinsam überbrückt werden (siehe Abbildung 3). Beobachtungen, dass Europa zunehmend seine globale Stellung als Schlüsseltechnologieproduzent verlieren könnte, gaben dem Thema besondere Brisanz.⁷

Abbildung 3 Überbrückung des „Valley of death“ durch integrierte Schlüsseltechnologieförderungen



Quelle: (High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies, 2015)

⁶ Original: "This situation, namely the gap between basic knowledge generation and the subsequent commercialisation of this knowledge in marketable products, has been commonly identified across the KETs and is known in broad terms as the "valley of death" issue. Its effects can include not only relocation of manufacturing and R&D, but also the disruption of entire value chains with their ultimate consequences on the sustainability of various strategic sectors in Europe. The "valley of death" is due to many factors including the absence of smart regulation, the unavailability of pre-commercial R&D support, insufficient access to large scale finance, and lack of political support and pro-active KET policies." (High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies, 2011)

⁷ Original: "The capacity of the European Union to develop and industrially deploy KETs will to a large extent determine how well it fares in the future. The European Union faces three major challenges: (a) to maintain global technological leadership; (b) to master societal challenges based on KETs applications; and (c) to modernise and reinforce its industrial base." (European Commission, 2012)

Die Eingrenzung auf sechs Schlüsseltechnologiefelder ermöglichte eine gezielte Priorisierung von Initiativen und Unterstützungsmaßnahmen. Die Idee dahinter war, dass Synergien zwischen verschiedenen Initiativen sowohl der Verbesserung von Rahmenbedingungen als auch dem Kapazitätsaufbau dienen, und so europaweite „Economies of Scale and Scope“ ermöglichen. Konkret wurden folgende Punkte vorgeschlagen:

- Ein integrierter Ansatz der Forschungs- und Innovationsförderung von KETs: Horizon2020, European Technology Plattform, Public-Private Partnerships, Joint Technology Initiatives
- Berücksichtigung der KETs in der europäischen Kohäsionspolitik: KETs als Investitionspriorität ERDF, Smart Specialisation, Cluster Policy, INTERREG
- Anpassung staatliche Beihilferegulungen zur Unterstützung von KETs
- Unterstützung für KETs, SME risk-sharing instruments durch die Europäische Investitionsbank (EIB)
- Verstärkte internationale Zusammenarbeit zugunsten der KETs: Sicherstellung von Marktzugang, Investmentmöglichkeiten, Schutz von intellektuellem Eigentum, Abbau von Handelshindernissen)
- Ausbau von Kompetenzen: Trainings und Professionalisierungsmaßnahmen, Partnerschaften von Industrie und Hochschulen
- KET Monitoring Mechanismen: Marktdaten zu KETs

Dieser Ansatz bildet sich auch in der Definition der Europäischen Kommission von KET ab:

“KET sind wissensintensiv und gehen mit einer hohen F&E-Intensität, schnellen Innovationszyklen, hohen Investitionsausgaben und hochqualifizierter Beschäftigung einher. Sie ermöglichen Prozess-, Güter- und Dienstleistungsinnovationen in der gesamten Wirtschaft und sind von systemischer Bedeutung. Sie sind multidisziplinär und erstrecken sich über viele Technologiebereiche, wobei ein Trend zur Konvergenz und Integration zu beobachten ist.“⁸ (Commission of the European Communities, 2009)

Hinsichtlich der Abgrenzung oder Einbindung sei an dieser Stelle ergänzt, dass in der Praxis viele der geförderten KETs auch neu entstehende („emerging“) Technologien sind. Auch wenn die Definition von „emerging“ Technologien nicht unumstritten ist (Rotolo et al., 2015), lässt sich zusammenfassen, dass darunter meist Technologien verstanden werden, denen bereits in einem frühen Entwicklungsstadium großes Potential zugeschrieben wird, bestehende Technologien zu revolutionieren, sich schnell weiterzuentwickeln und neue Märkte zu eröffnen. Die Abkürzung KET ist insofern etwas irreführend – was aber angesichts der Überlappungen grob gesprochen nicht so problematisch ist – weil unter dem „E“ nicht nur „enabling“, sondern auch „emerging“ verstanden wird. So beziehen sich Analysen der OECD, welche in den Strategiedokumente und Berichten häufig als Quellen herangezogen werden, nicht auf Key Enabling Technologies sondern auf (Key) Emerging Technologies (OECD, 2016).

“Key Enabling Technologies for the Future - KETs 4.0”

Eine dritte Phase in diesem Bereich steht im Zusammenhang mit der stärkeren Berücksichtigung problemorientierter Forschungsförderung seit dem 8. Rahmenprogramm „Horizon 2020“ (2014-

⁸ Original: „KETs are knowledge intensive and associated with high R&D intensity, rapid innovation cycles, high capital expenditure and highly-skilled employment. They enable process, goods and service innovation throughout the economy and are of systemic relevance. They are multidisciplinary, cutting across many technology areas with a trend towards convergence and integration.“ (Commission of the European Communities, 2009)

2020). Im Jahr 2018 veröffentlicht die „High-Level Group on Industrial Technologies“ einen Bericht zur Überarbeitung der bestehenden KET Strategie (High- Level Group on Industrial Technologies, 2018). Bei der Konzipierung und Umsetzung von Horizon 2020 wurden die Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen und die Bewältigung von EU politischen Prioritäten und globalen Herausforderungen durch F&I bereits gleichberechtigt mit der Förderung wissenschaftlicher Exzellenz und der Stärkung einer ökonomischen Führungsposition berücksichtigt. Eine zentrale Empfehlung des Berichts war dementsprechend auch im Zusammenhang mit KET eine Erweiterung des Schlüsseltechnologiebegriff um deren Beitrag zu großen gesellschaftlichen Herausforderungen. Es geht dabei darum zu verstehen, für welche Herausforderungen Schlüsseltechnologien sozusagen „der Schlüssel“ sein können.

Aus diesem Anspruch leiten sich die „Kriterien“ für KET ab – es wird sich zeigen, dass es sich eher um Ausrichtungen handelt. Diesen wird nicht nur ein potenzieller Beitrag zur europäischen Wettbewerbsfähigkeit, sondern auch ein großer Impact, eine hohe systemische Relevanz, zentrale Kapazitäten zur Verbesserung von Gesundheit, Sicherheit und Nachhaltigkeit, als auch die zentrale Kraft in der Unterstützung von grünem Wachstum und Kreislaufwirtschaft zugeschrieben. Aufbauend auf diesen Kriterien empfiehlt die High-Level Group eine Neugruppierung der KET Felder und eine Aufnahme von „Artificial intelligence “ und „Digital Security and Connectivity “. Die Felder sind nun: Advanced manufacturing technologies, Advanced materials and nanotechnologies, Life science, Micro- and nano-electronics and photonics, Artificial intelligence und Security and connectivity.

Die High-Level Group empfiehlt im Einklang mit Horizon Europe einen missions-orientierten Ansatz zur Förderung von Schlüsseltechnologien (siehe Abbildung 4). Dieser stößt jedoch – möglicherweise aufgrund der Komplexität – auf wenig Resonanz und es gibt kaum strategische Maßnahmen zur Umsetzung.

Abbildung 4 Missions-orientierter Ansatz zur Förderung von KETs 4.0



Quelle: (High- Level Group on Industrial Technologies, 2018)

Es lässt sich also eine Entwicklung beobachten, bei der in einem ersten Schritt Technologien in systemischer Hinsicht als Schlüsseltechnologien verstanden wurden, wobei dieser gesamtheitliche Zugang auch sozial- und Geisteswissenschaften einbezog, ein zweiter Schritt den Fokus wieder enger technologisch auslegte, und die ermöglichende Funktion von Schlüsseltechnologien in den Fokus rückte, und ein dritter Schritt das rein technologische Feld wieder öffnete, indem die Problemorientierung, Challenges und Missionen eingeführt wurden. Diese Öffnung hat jedoch – zumindest bis Ende der 2010-er Jahre – zu einer Diskursverschiebung geführt, in der der Fokus auf Technologien immer auch (implizit) begleitet war durch die Sorge, dass die Technologie an sich die Lösung der „wicked problems“ nicht mit sich bringt, ja, im Zeitalter des Anthropozäns sogar Probleme mitverursachen könnte. Technologien kamen teilweise unter einen Rechtfertigungsdruck, man war mit dem Fokus auf Technologie nicht mehr automatisch auf der sicheren Seite. Die Betonung von KETs schien abzuflauen.

Schlüsseltechnologien für Europas technologische Souveränität

Doch in jüngster Zeit gibt – teilweise geprägt durch die Erfahrungen während der Covid-19 Pandemie – es wieder eine neue Welle der Aufmerksamkeit für Schlüsseltechnologien: Eine Studie für das „Panel for the Future of Science and Technology“ analysierte die Herausforderungen von Schlüsseltechnologien in Bezug auf die technologische Souveränität Europas (Ramahandry et al., 2021). Aufgrund der veränderten geopolitischen Situation und globalen Krisen rückten die Sorge in Bezug auf Abhängigkeiten von Ressourcen und Rohstoffen für die Entwicklung und Produktion von Schlüsseltechnologien, insbesondere von nicht-europäischen Anbietern, ins Zentrum. In dieser Studie wird unter technologischer Souveränität sowohl als die Fähigkeit verstanden, kritische Technologien zu entwickeln, die zum Wohlergehen der europäischen Bürger*innen und dem Wohlstand der europäischen Unternehmen beitragen, als auch solche bereitzustellen, zu schützen und zu bewahren. Zudem soll die europäische Handlungsfähigkeit in einem globalisierten Umfeld erhalten bleiben.⁹ Für die Bewertung von technologischer Souveränität wurden Indikatoren entwickelt, die auf technologische, ökonomische und regulatorische Dimensionen Bezug nehmen (siehe Abbildung 5).

⁹ Original "The definition of technological sovereignty devised for this study aims to reconcile these two approaches in Europe's ability to develop, provide, protect and retain the critical technologies required for the welfare of European citizens and prosperity of European businesses, and the ability to act and decide independently in a globalised environment." (European Parliament. Directorate General for Parliamentary Research Services. et al., 2021)

Abbildung 5 Messung Technologischer Souveränität global und pro KET

Indicators	Advanced Manufacturing	Advanced Materials and Nanotechnologies	Life-science technologies	Micro/nano-electronics and photonics	AI	Security and connectivity technologies
Domestic R&D intensity	Low					
Amount of public research programmes funding	Medium					
Business/private R&D expenditures	Low					
Number of STEM graduates	Low					
Relative share in global patenting	High	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium
Number of international co-inventions	High					
Number of start-ups	High	High	High	Medium	High	Medium
Industrial leaders ranking	Medium	Medium	Low	Low	Low	Medium

Quelle: (Ramahandry et al., 2021, S. 39)

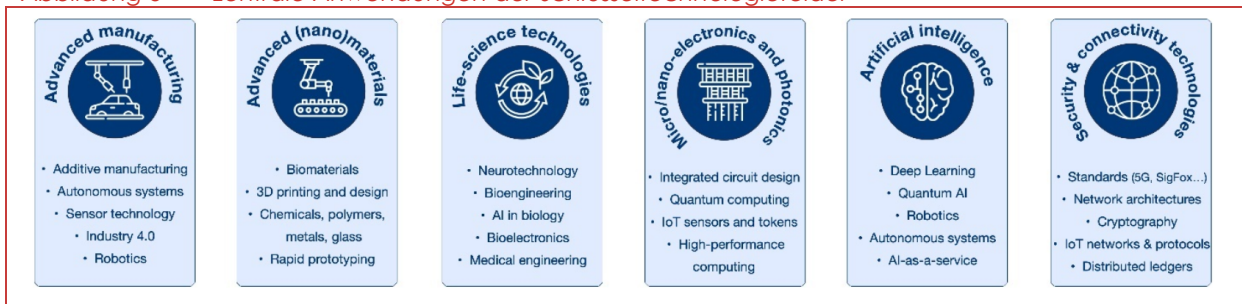
Der Begriff der Schlüsseltechnologien überlappt sich in dieser Studie in mit dem der kritischen Technologien. Es wird insbesondere auf die kritische Bedeutung von Schlüsseltechnologien für ein vernetztes, digitales, resilientes und gesundes Europa und die globale Wettbewerbsfähigkeit hingewiesen.¹⁰ Im Unterschied zu vorhergehenden Strategiepapieren wird hier auch auf einzelne Anwendungen von KETs eingegangen (siehe Abbildung 6). Eine klarere Ausdifferenzierung auf zentrale Anwendungen und Zuspitzung auf einzelne KET Felder kann zudem auch in Initiativen wie dem European Chips Act (European Parliament & Council of the European Union, 2023) oder den „Advanced Materials for Industrial Leadership“ (European Commission, 2024) beobachtet werden .

Die Beobachtung einer vermehrten Aufmerksamkeit auf die strategische Bedeutung von emerging Technologien, welche sich in der Praxis oftmals mit den KET Feldern überlappen aber nicht so bezeichnet werden, lässt sich in diesen Jahren auch in den Publikationen der OECD beobachten. Im OECD Science, Technology and Innovation Outlook 2023 wurde beispielsweise detailliert über die Auswirkungen der geopolitischen Spannungen und Krisen auf den Wettbewerb und die Abhängigkeit von emerging Technologien reflektiert (OECD, 2023). Weiters wurde beispielsweise auf die Bedeutung von Anticipatory Governance Tools (e.g. horizon scanning, strategic foresight, expert-driven technology assessment, participatory technology assessment and text mining) hingewiesen, um die strategische Bedeutung von Technologien frühzeitig zu begreifen (OECD, 2024b, 2024a). Ebenfalls sei das OECD Global Forum on Technology¹¹, zu erwähnen bei den Stakeholderdiskurse zur strategischen Bedeutung, den Risiken und dem verantwortungsvollen Umgang, der Nachhaltigen Entwicklung und Überbrückung des „digital and technology Divides“ von drei Schlüsseltechnologien (Quantentechnologien, synthetische Biologie, immersive Technologien) veranstaltet werden.

¹⁰ Original: “The six KETs identified as critical for Europe to reach technological sovereignty are presented in the figure below. Advances in these KETs contribute to an interconnected, digitalised, resilient and healthier European society, are important for the EU’s competitiveness and its position in the global economy.” (STOA)

¹¹ <https://www.oecd.org/en/networks/global-forum-on-technology.html>

Abbildung 6 Zentrale Anwendungen der Schlüsseltechnologiefelder



Quelle: (Ramahandry et al., 2021, p.5)

Der neue Fokus auf technologische Souveränität hat somit eine vierte Phase im Umgang mit KET eingeleitet, eine Art Renaissance des Fokus auf Technologien in ihren konkreten Zusammenhängen und Wertschöpfungsketten, durchaus mit Bedacht auf gesellschaftliche Herausforderungen, aber eben auch auf ihre Eigenheiten. Die Herausforderung liegt in der geopolitischen Dimension und dem Souveränitätsverständnis unterschiedlicher Ebenen (z.B. Regionen, Nationalstaaten, Europäische Union, internationale Allianzen). Erneut hat die EU hier eine wichtige Rolle in der Abstimmung kohärenter und damit auch effizienter nationaler Politiken.

4 Nationale Zugänge zu Schlüsseltechnologien in ausgewählten Ländern

Wie oben ausgeführt lag der Ursprung der europäischen Einführung des Schlüsseltechnologie-Begriffs in der Politik, den Europäischen Forschungsraum zu stärken und dadurch im globalen Wettbewerb eine Führungsposition zu halten bzw. zu gewinnen. Der Wettbewerb bezieht sich sowohl auf die USA als auch auf Schwellenländer. Die Recherchen zu nationalen Strategien in den USA und China haben schnell gezeigt, dass es den Rahmen dieser Studie sprengen würde, hier im Detail die Entwicklungen zusammenzufassen: Zum einen würde das der Komplexität dieser beiden großen Staaten nicht gerecht, zum anderen ist es für Österreich auch naheliegender, sich an Europäischen Partnerländern zu orientieren. In Bezug zu der globalen Dynamik sei an dieser Stelle nur darauf hingewiesen, dass Schlüsseltechnologien und die damit verbundenen langfristigen Dynamiken das Wirtschaftswachstum, internationale Interdependenzen prägen, und Impact auf Umweltbelastungen und damit auf den Klimawandel prägen.

Chinas rasanter Aufstieg in der Produktion und Entwicklung von Schlüsseltechnologien (Gaida et al., 2023) wird hier besonders beobachtet. Der Aufbau an nationalen Forschungs- und Produktionskapazitäten ist hier vor dem Hintergrund der historischen Entwicklungen beachtlich. Nach der kulturellen Revolution in den 1960er und 1970er Jahren fehlte eine Generation an Intellektuellen und für den Großteil des 20ten Jahrhunderts gab es kaum strategische Ansätze zur Förderung von Forschung und Entwicklung (Melaas & Zhang, 2016). Der Fokus lag auf der industriellen Entwicklung und dem Aufbau von Produktionskapazitäten. Diese Bestrebungen wurden auch durch das Outsourcing von westlichen (High)Tech-Produktion nach China (Li et al., 2020) unterstützt. Erst seit den 1990er Jahren liegt strategische Aufmerksamkeit darauf, chinesische Innovationen gezielt zu unterstützen, 2006 wurde dies zu einer nationalen Priorität erklärt. Im „Medium and Long-Term National Plan for Science and Technology Development 2006-2020“ wird das Ziel dargelegt, China zu einer weltweit führenden Innovationsnation zu

machen. Dafür soll die nationale Innovationsökonomie gestärkt und ausgebaut werden. Diese Bestrebungen werden durch gezielte Maßnahmen in den Fünfjahresplänen unterstützt und durch substanzielles finanzielles Investment gefördert. In der Technologieentwicklung werden hier besonders „Key Core Technologies“¹² gefördert, was zur Unabhängigkeit Chinas in der Produktion und Entwicklung von kritischen Technologien beitragen soll. Besonderes Augenmerk in diesen Bestrebungen ist auch ein genaues Verständnis von und die Kontrolle über „Bottleneck Technologies“, also Technologien, von denen viele Anwendungen und Prozesse abhängen. Die Entwicklung und Produktion von Schlüsseltechnologien werden vom hochindustrialisierten Westen dabei nicht nur als wirtschaftlicher Faktor, sondern zunehmend auch als politischer Hebel wahrgenommen und wohl auch teilweise gefürchtet. Die USA wiederum sehen ihren Anspruch auf die wirtschaftliche Führungsposition in Schlüsseltechnologiebranchen durch die chinesischen Entwicklungen gefährdet. China publiziert zunehmend mehr high-impact Publikationen in diesen Feldern (Gaida et al., 2023) und hat große Produktionskapazitäten in diesen hochspezialisierten Branchen. Um die Abhängigkeiten von China zu reduzieren, werden in den US zunehmend innovationspolitische, aber auch industriepolitische Maßnahmen, wie eine gezielte Reindustrialisierung, gesetzt. Parallel dazu fokussiert der Diskurs in den USA heute vor allem auf Künstliche Intelligenz und damit verbundene Chancen aber auch Sicherheitsrisiken (Hart et al., 2023).

Obwohl diese Entwicklungen von hoher Relevanz auch für den Standort Österreich sind, und einige Industriebetriebe unmittelbar von den globalen Entwicklungen betroffen sind, sehen wir ein konkretes Lernfeld für Österreichs KET-Politik eher bei Erfahrungen in Deutschland als wichtigstem Forschungs- und Handelspartner und im Austausch mit einer anderen kleinen, offenen Volkswirtschaft. Im Folgenden werden daher drei ausgewählte nationale Politiken zu Schlüsseltechnologien in Europa vorgestellt, die für den österreichischen Kontext als besonders relevant eingestuft wurden. Einerseits die Bemühungen in Deutschland zur Technologischen Souveränität, bei der Schlüsseltechnologieinitiativen beschrieben wurden, welche auf unterschiedliche Technologien, gezielte Anwendungsfelder oder die Kombinationen von Schlüsseltechnologien ins Zentrum setzen. Andererseits der partizipative Prozess in den Niederlanden, bei welchem durch langfristige Einbindung nationaler Stakeholder nicht nur konkrete Technologien definiert wurden, sondern auch konkrete von Stakeholdern getragene Aktionsagenden erarbeitet wurden. Außerdem wird auf eine Studie der schwedischen Innovationsagentur Vinnova verwiesen, die zeitlich mit der hier vorliegenden Studie über mögliche über die Identifikation von strategischen Technologien berichtet.

Deutschland

Aufgrund der veränderten geopolitischen Entwicklungen und Lieferkettenunterbrechungen während der Pandemie werden in nationalen Strategien wie erwähnt zunehmend Abhängigkeiten in der Entwicklung und Produktion von Schlüsseltechnologien betrachtet. Deutschland legte dem Impulspapier „Technologisch souverän die Zukunft gestalten“ (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2021) einen wichtigen Grundstein für Initiativen zur Förderung von Schlüsseltechnologien und beschreibt wie diese die technologischen Souveränität erhalten und ausbauen sollen. Dies wird als essenziell für die wirtschaftliche und gesellschaftliche Zukunftsfähigkeit und Resilienz betrachtet.

„Unter technologischer Souveränität versteht das BMBF den Anspruch und die Fähigkeit zur kooperativen (Mit-)Gestaltung von Schlüsseltechnologien und technologiebasierten

¹² <https://www.strategictranslation.org/glossary/key-core-technologies>

Innovationen. Diese umfasst die Fähigkeiten, Anforderungen an Technologien, Produkte und Dienstleistungen entsprechend der eigenen Werte zu formulieren, Schlüsseltechnologien entsprechend dieser Anforderungen (weiter) zu entwickeln und herzustellen sowie Standards auf den globalen Märkten mitzubestimmen. Technologische Souveränität kann dabei auch erfordern, Schlüsseltechnologien und deren technologiebasierte Innovationen in Europa eigenständig zu entwickeln und hierfür eigene Produktionskapazitäten aufzubauen, wenn dies zum Erhalt der staatlichen Handlungsfähigkeit oder zur Vermeidung einseitiger Abhängigkeiten notwendig ist.“ (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2021, S. 3)

Diese Überlegungen zielen jedoch nicht darauf ab, eine weltweite Spitzenposition in allen Schlüsseltechnologiefeldern zu erreichen. Vielmehr geht es darum, sich des Charakters der Abhängigkeiten in Entwicklungs- und Wertschöpfungsketten von Schlüsseltechnologien bewusst zu sein und auf dieser Basis den Zugang zu ihnen sicherzustellen. Eine gezielte Auswahl von relevanten Technologien, denen man heute und in Zukunft eine Schlüsselfunktion zuschreibt, soll national besonders gefördert werden. Außerdem sollen nachhaltige Kooperationsbeziehungen gepflegt und ausgebaut werden. Bestrebungen technologischer Souveränität werden nicht als nationaler Alleingang betrachtet. Vielmehr wird in dem Impulspapier darauf verwiesen, dass einzelne europäischen Nationalstaaten aufgrund ihrer vergleichsweise kleinen Wirtschafts- und Innovationsräume global kaum Impulse setzen könnten. Daher sei eine gute Abstimmung von europäischen und nationalen Initiativen wichtig. Deutschland versteht sich aufgrund seiner Position als wirtschafts- und innovationsstarkes Land als zentraler Treiber innerhalb der europäischen Union.

Das Impulspapier formuliert 12 Leitinitiativen zum Ausbau und Erhalt der Technologischen Souveränität in Deutschland durch Schlüsseltechnologien. Diese Initiativen fokussieren teilweise auf einzelne Technologiebereiche, teilweise stehen konkrete Anwendungen im Zentrum, bei denen eine Kombination aus unterschiedlichen Schlüsseltechnologien zur Zielerreichung notwendig ist. Die Initiativen haben unterschiedliche zugrundeliegende Strategien, zum einen den Ausbau bestehender Stärken, zum anderen das Beheben von Schwachstellen (z.B. Lücken in der Innovationskette, Reduktion von Abhängigkeiten), Leapfrogging, oder auch die gezielte Einbindung von führenden Akteuren in eigene Innovationsnetzwerke. Die Themen der 12 Leitinitiativen sind wie folgt:

- Elektronik der nächsten Generation
- Zurück an die Weltspitze der Kommunikation
- Software und Künstliche Intelligenz souverän entwickeln
- Datentechnologien – für die souveräne Datenökonomie und -gesellschaft
- Ein Quantencomputer „Made in Europe“
- Die Zukunft der Wertschöpfung technologisch souverän mitgestalten
- Kreislaufwirtschaft: Neue Technologien für mehr Ressourceneffizienz und Rohstoffsicherheit
- Materialinnovationen: Basis für Nachhaltigkeit, Wettbewerbsfähigkeit und Wohlstand
- Batterieforschung – Eine Innovationspipeline für die Rückkehr an die Weltspitze
- Grüner Wasserstoff – Deutschland zum Leitmarkt und weltweiten Leitanbieter machen
- Souveränität in der Impfstoff-Forschung und – Entwicklung
- Etablierung neuer und starker Partnerschaften für Deutschland und Europa

Ein ganzheitlicher Politikansatz für die Unterstützung von Schlüsseltechnologien, bei dem sowohl unterschiedliche Stufen der Innovationskette von Bildung, Forschung, Entwicklung und Produktionskapazitäten als auch die rechtlichen Rahmenbedingungen zusammen gedacht werden, wird als wesentlich anerkannt. Betont wird auch die notwendige Balance zwischen

themenspezifischen Ansätzen, die es ermöglichen Kompetenzen zu bündeln, als auch themenoffene Ansätze, die ausreichend Raum für neuartige Ansätze bieten. Damit sind wichtige Weichen gesetzt, aus unterschiedlicher Perspektive immer wieder angesichts der multiplen Krisen und der Dynamik technologische Entwicklung den Fokus auf technologische Souveränität nicht aus den Augen zu verlieren.

Der Rat für technologische Souveränität berät das BMBF in strategischen Fragen zu Schlüsseltechnologien sowie der Identifikation zukünftiger Technologiefelder. Diese Expert*innen aus Wissenschaft und Wirtschaft analysieren regelmäßig das Potential von Technologiefeldern, sowie die Wechselwirkungen der Technologien untereinander und erarbeiten darauf aufbauend Handlungsempfehlungen. Ein für die vorliegende Studie besonders relevanter Bericht befasst sich mit unterschiedlichen nationalstaatlichen Initiativen zur Unterstützung von Schlüsseltechnologien (Rat für technologische Souveränität, 2024). Dieser vergleichende Überblick über Definitionen, Strategien und deren institutionelle Verankerung verdeutlicht, dass es große Überlappungen zwischen den Ländern gibt, insofern sie die gleichen Technologien als zentrale Entwicklungsfelder sehen. Diese werden jedoch sehr unterschiedliche benannt: Schlüsseltechnologien hier, prioritäre Technologien dort, kritische Technologien wieder wo anders. Zudem unterscheiden sich die Zugänge auch im Grad an Detaillierung und dahingehend, ob lediglich Entwicklungsfelder oder konkrete Anwendungen genannt werden. Während die USA und China konkrete Prozesse und Einrichtungen für die Früherkennung technologischer Trends institutionalisiert haben (e.g. US - „Fast Track Action Subcommittee on Critical and emerging Technologies“), gibt es in Deutschland keine Ressort-übergreifende Liste an Technologien. Zudem wird in dem Bericht auf die unterschiedlichen Bedeutungen von F&E Förderung und dem Aufbau von Produktionskapazitäten in unterschiedlichen Schlüsseltechnologieentwicklungsstadien hingewiesen.

Die Bestrebungen in Deutschland die technologische Souveränität stärker ins Zentrum zu rücken und auch gezielte Initiativen zu formulieren, kann für Österreich insofern interessant sein, als dadurch gezielt auch strategische Zusammenarbeit zur Reduktion von externen Abhängigkeiten angestrebt werden kann. Zudem ist die Begleitung durch den Rat für technologische Souveränität, welcher die aktuellen Entwicklungen im Auge behält und dem Ministerium beratend zur Seite steht eine gute Möglichkeit in den regelmäßigen Austausch mit Stakeholdern zu treten und deren Einschätzung in der Policygestaltung zu berücksichtigen.

Abbildung 7 Liste von adressierten Schlüsseltechnologiefeldern in internationalen Vergleich

Land	Schlüsseltechnologien
Deutschland ¹⁶	Elektronik der nächsten Generation; Informations- und Kommunikationstechnologien; Software und künstliche Intelligenz; Datentechnologien; Quantencomputing; Produktionstechnologien; Recyclingtechnologien (Kreislaufwirtschaft); Materialinnovationen; Batterieforschung; Grüner Wasserstoff; Impfstoff-Forschung und -Entwicklung; Photonische Technologien und Quantentechnologien; Biotechnologie; Umwelttechnologien; Analysetechnologien und Messtechnik; IT-Sicherheitsforschung; Hoch- und Höchstleistungsrechnen; Forschung für die zivile Sicherheit
EU ¹⁷	Fortschrittliche Halbleitertechnologien; Technologien der Künstlichen Intelligenz; Quantentechnologien; Biotechnologien; Fortschrittliche Konnektivitäts-, Navigations- und Digitaltechnologien; Fortschrittliche Sensortechnologien; Weltraum- und Antriebstechnologien; Energietechnologien; Robotik und autonome Systeme; Fortschrittliche Materialien sowie Fertigungs- und Recyclingtechnologien
USA ¹⁸	Fortschrittliches Computing; Fortschrittliche Materialien; Fortschrittliche Technologien für Gasturbinen-Motore; Fortschrittliche Produktion; Fortschrittliche und Netzwerk-Sensorik und Signatur Management; Fortschrittliche nukleare Energietechnologien; Künstliche Intelligenz; Autonome Systeme und Robotik; Biotechnologien; Kommunikations- und Netzwerktechnologien; Laser; Finanztechnologien; Mensch-Maschine Interfaces; Hyperschalltechnologien; Netzwerk-Sensoren und Sensorik; Quanteninformationstechnologien; Erzeugung und Speicherung erneuerbarer Energien; Halbleiter und Mikroelektronik; Weltraumtechnologien und -systeme
China ¹⁹	Quanteninformation; Photonik und Mikro-Nano-Elektronik; Netzwerkkommunikation; Künstliche Intelligenz; Biomedizin; Moderne Energiesysteme; Integrierte Schaltkreise; Leben und Gesundheit; Hirnforschung; Biologische Züchtung; Luft- und Weltraumwissenschaft und -technologie; Tiefsee und Erde; Sicherheit vor Infektionskrankheiten und Biosicherheitsrisiken; Pharmazeutika und medizinische Geräte; Neue Generation künstlicher Intelligenz; Quanteninformation; integrierte Schaltung; Hirnforschung und vom Gehirn inspizierte Forschung; Gene und Biotechnologie; Klinische Medizin und Gesundheit; Weltraum, tiefe Erde, Tiefsee und Polarforschung; neue High-End-Materialien; Wichtige technische Ausrüstung; Intelligente Fertigung und Robotik; Flugmotoren und Gasturbinen; Beidou industrielle Anwendung; Neue Energiefahrzeuge und intelligente vernetzte Fahrzeuge; Hochwertige medizinische Geräte und innovative Medikamente; Landwirtschaftliche Maschinen und Geräte
Japan ²⁰	Biotechnologie; Medizinische und Gesundheitstechnologien; Künstliche Intelligenz und Machine Learning; Fortschrittliches Computing; Mikroprozessoren und Halbleitertechnologien; Datenwissenschaften, -analyse, -speicherung und -management; Fortschrittliche Werkstoff- und Produktionstechnologien; Robotik; Quanteninformationswissenschaft; Fortschrittliche Überwachungs-, Verortungs- und Sensortechnologien; Neurocomputing und Gehirn-Schnittstellen Technologien; Fortschrittliche Energie- und Energiespeichertechnologien; Fortschrittliche Informations-, Kommunikations- und Netzwerktechnologien; Cybersicherheit; Weltraum- und Marinetchnologien; Transport Technologie; Hyperschall Technologie; Chemische, biologische, nukleare und Strahlungstechnologien; Fortschrittliche Materialwissenschaften.
Korea ²¹	Halbleiter und Displays; Akkumulatoren; Spitzentechnologien in Mobilität; Nuklearenergie der nächsten Generation; Spitzenbionotechnologien; Luft-, Raumfahrt und Marine; Wasserstoff; Cybersicherheit; KI; Kommunikationstechnologien der nächsten Generation; Spitzentechnologien in Robotik und Produktion; Quantentechnologien

Quelle: (Rat für technologische Souveränität, 2024, S. 7)

Abbildung 8 Übersicht über Schlüsseltechnologiefelder, Strategien, Institutionen, Ziele, Investitionen und ausgewählter Fördermaßnahmen

	Deutschland	Europäische Union	USA	China	Japan	Südkorea
Anzahl der Schlüsseltechnologiefelder (komplette Liste siehe Anhang)	12 „Schlüsseltechnologien“	10 „critical technology areas“ / „Technologiebereiche“ Mit jeweils 4-5 Technologien (insgesamt 42 Technologien)	19 „critical and emerging technologies“ Mit jeweils 2-15 „Critical and Emerging Technology Subfields“ (insgesamt 103 subfields)	7 „Spitzenbereiche der Wissenschaft und Technologie“ Mit jeweils 3-5 Spezifizierungen (insgesamt 28)	20 „technologies as critical fields“	12 „strategic technologies“
Strategien	„Technologisch souverän die Zukunft gestalten“, Impulspapier des BMBF, April 2021	Empfehlung der Kommission zu sicherheitsrelevanten Technologiebereichen , Oktober 2023 ¹¹	„ United States Government National Standards Strategy for Critical and Emerging Technology “, Mai 2023	14. Fünfjahresplan, März 2021	„ Economic Security Strategy “, Februar 2022	„ National Strategic technology Nurture Plan “, Oktober 2022
Institutionen	Distinkte Projekte und Initiativen in auf Bundesebene: BMBF , BMWK , BMDV , Bundeskanzleramt	Steering Board of Sovereignty	Office of Science and technology Policy in the White House Special Envoy for Critical and Emerging Technology	Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China	Council of Experts on Economic Security Legislation Japan Science and Technology Agency (ähnlich der DFG)	Ministry of Science and ICT National Strategic Technology Special Committee
Zentrales Ziel	Werte wahren, Wohlstand und Arbeitsplätze sichern	Stärkung der wirtschaftlichen Basis und Wettbewerbsfähigkeit, Schutz vor Risiken (disruptive Technologien, Dual Use, Risiko des Missbrauchs)	Wirtschaftliche Führung in Zukunftstechnologie, nationale Sicherheit und Autarkie in ausgewählten Technologiebereichen	„Self Reliance“	Wirtschaftliche Sicherheit	Technologische Hegemonie
Investitionen (Schätzung 2019¹²)	\$19 Milliarden PPP (0,41% BIP)	n.a.	\$84 Milliarden PPP (0,39% BIP)	\$406 Milliarden PPP (1,73% BIP)	\$27 Milliarden PPP (0,5% BIP)	\$15 Milliarden PPP (0,67% BIP)
Ausgewählte Fördermaßnahmen¹³	\$5,4 Milliarden bis 2025 für die KI Strategie \$3,3 Milliarden bis 2026 in Quantencomputer	\$294 Milliarden für den „Green Industrial Deal“ \$141,5 Milliarden für „NextGenerationEU“ \$762 Millionen für 5G Infrastruktur (Horizon 2020) \$980 Millionen für Smarte Netzwerke und Services	\$369 Milliarden IRA \$230 Milliarden zur Herstellung von Halbleitern \$140 Milliarden für elektrische Fahrzeuge und Batterien \$20 Milliarden für Biomanufacturing	\$1 400 Milliarden für neue Infrastruktur: 5G, KI, IoT, etc. \$150 Milliarden für einen Entwicklungsplan der nächsten KI Generation	Investitionen sollen vornehmlich aus dem privaten Sektor kommen. Hinzu sollen \$1,05 Billionen aus öffentlich-privaten Partnerschaften in den nächsten 10 Jahren kommen. ¹⁴	\$262 Milliarden für Halbleiter bis 2026 \$10 Milliarden für Biotechnologien bis 2026 \$73 Milliarden für Mobilität/Fahrzeuge bis 2026 \$1,3 Milliarden für Robotik bis 2026 ¹⁵

Quelle: Rat für technologische Souveränität, 2024, S. 4

Niederlande

In den Niederlanden hat man großen Wert daraufgelegt, eine national gut verankerte Strategie und von Stakeholdern getragene Aktionspläne zur Förderung von Schlüsseltechnologien zu entwickeln. In der Nationalen Technologie Strategie (Ministry of Economic Affairs and Climate Policy, 2024) sind die Ambitionen und Ziele bis 2035 beschrieben und konkrete Schlüsseltechnologien priorisiert, in denen die Niederlande eine starke wissenschaftliche Position einnehmen und in denen wichtige soziale und wirtschaftliche Auswirkungen zu erwarten sind. Die Initiativen zielen auf das gesamte niederländische Innovationsökosystem an, in dem es eine starke Tradition der sektoralen Politik und Beteiligungsformate gibt.

Neben dem Ergebnis ist auch der Prozess der Auswahl und Priorisierung dieser Schlüsseltechnologien von großem Interesse, da er stark partizipativ gestaltet war. In mehreren Entwicklungsrunden wurden unterschiedliche Stakeholder in den Prozess eingebunden.

- **Definition von KETs:** Durch eine iterative Konsultation von rund 60 vorwiegend wissenschaftlichen Expert*innen wurden 44 KETs definiert, welche einen großen Impact auf Wirtschaft, Gesellschaft und Wissenschaft haben. Die Auswahl dieser Technologien orientiert sich an den acht KET-Feldern, die auf europäischer Ebene festgelegt wurden, legt jedoch einen Fokus auf konkrete Technologien, in welchen die Niederlande besonders gut aufgestellt sind.
- **Datenanalyse:** Eine Analyse von a) Wachstumsmärkten, b) Sozialen Herausforderungen, c) Investitionsoptionen; d) bibliometrischen Analysen und Teilnahme an Horizon Europe, durchgeführt von entsprechenden Stakeholdern und Expert*innen.
- **Gesprächsrunden** mit Expert*innen entlang dieser vier Analysedimensionen mit Expert*innen aus Wissensinstitutionen, großen Wirtschaftsbetrieben, KMUs, Start-ups und Investor*innen in den Niederlanden.
- **Shortlist und Agenden:** In den abschließenden Reflexionsrunden wurden mit Vertreter*innen aus Wissenschaft und Wirtschaft die Auswahl der zehn priorisierten Felder und der entsprechenden Technologien besprochen und konkrete Agenden gemeinsam entwickelt.

Die Priorisierung von zehn Feldern baute auf einer multidisziplinären Analyse auf, bei der neben der wirtschaftlichen Ertragsfähigkeit und der aktuellen Position der Niederlande in dem Feld auch der Beitrag zu gesellschaftlichen Herausforderungen, nationaler Sicherheit und offenen strategischen Autonomie betrachtet wurden (siehe Tabelle 1). Für jede der priorisierten Technologien wurden Schlüsseltechnologien herausgearbeitet, deren Bedeutung für andere Technologien, ein Vergleich der nationalen und internationalen Position, die betrachtenden Stärken und Herausforderungen, und konkrete Ambitionen, die bis 2035 verfolgt werden sollen.

Tabelle 1 10 Schlüsseltechnologieprioritäten und 44 Schlüsseltechnologien in den Niederlanden

<p>Advanced Materials</p> <p>Energy materials; Optical, electronic, magnetic and nanomechanical materials; Meta materials; Soft/bio materials; Thin films and coatings; Construction and structural materials; Smart materials</p>	<p>Photonics and Optical Technologies</p> <p>Photovoltaics; Optical systems and Integrated photonics; Photonic/Optical detection and processing; Photon generation technologies</p>
<p>Chemical Technologies</p> <p>Process technology, including process intensification, (Advanced) Reactor engineering, Separation technology, Catalysis, Analytical technologies, Electricity-driven chemical reaction technologies</p>	<p>Digital and Information Technologies</p> <p>Artificial intelligence, Data science, data analytics and data spaces, Cyber security technologies, Software technologies and computing, Digital Connectivity Technologies, Digital Twinning and Immersive technologies, Neuromorphic technologies</p>

<p>Quantum Technologies</p> <p>Quantum computing, Quantum communication, Quantum sensing</p>	<p>Nanotechnology</p> <p>Nanomanufacturing, Nanomaterials, Functional devices and structures (on nanoscale), Micro- and nanofluidics, Nanobiotechnology / Bionanotechnology</p>
<p>Engineering and Fabrication Technology</p> <p>Sensor and actuator technologies, Imaging technologies, Mechatronics and opto-mechatronics, Additive manufacturing, Robotics, Digital manufacturing technologies, Semiconductor technologies, Systems engineering</p>	<p>Life Sciences and Biotechnology</p> <p>Biomolecular and cell technologies, Biosystems and organoids, Biomanufacturing and bioprocessing, Bioinformatics</p>

Quelle: <https://www.nwo.nl/en/key-enabling-technologies>, Darstellung Technopolis

Ein erster Vergleich mit den Feldern, die auch in Österreich hervorgehoben werden (vergl. Janger et al. 2024) zeigt, dass hier chemischen Technologien explizit adressiert werden und dafür die Mikro- und Nanoelektronik nicht als extra Feld genannt werden.

Die „Aktionsagenden“ wurden vom niederländischen Wirtschaftsministerium gemeinsam mit dem Forschungsrat (NWO) und der Organisation für angewandte Wissenschaften (TNO) sowie Firmen, Forschungsinstitutionen, und entwickelt. Die Stakeholder, die in den Entwicklungsprozess der Agenden eingebunden waren, übernehmen auch Verantwortung für deren Umsetzung in Forschung, Entwicklung und Innovation und werden vom Ministerium in ihren Bestrebungen unterstützt. Ein zentraler Akteur für die Umsetzung der Aktionsagenden ist [KIA ST \(Knowledge and Innovation Agenda Sleuteltechnologieën\)](#), welches im Rahmen der Top-Sector Policies niederländische Stakeholder der Schlüsseltechnologieentwicklung zusammenbringt.

Für Österreich kann dieses Beispiel in zweierlei Hinsicht interessant sein: Zum einen kann man durch einen vertieften Vergleich von Stärke- und Bedarfsfeldern die jeweils eigene Positionierung auch innerhalb der Technologie(sub)felder stärken. Zum anderen dürfte der Beteiligungsprozess nicht nur inhaltlich, sondern auch in Bezug auf die Mobilisierung der involvierten Stakeholder nützlich gewesen sein.

Schweden

Zeitgleich mit der vorliegenden Studie beauftragte die schwedische Regierung die Innovationsagentur Vinnova mit der Identifikation von strategischen Technologien für Schweden (Strander et al., 2024) um eine Wissensbasis für zukünftige Initiativen zur Förderung strategisch wichtiger Technologien zu schaffen und Methoden für das regelmäßige Monitoring vorzuschlagen. Aufbauend auf qualitativen und quantitativen Analysen wurden die Stärken und Schwächen, sowie der notwendige Handlungsbedarf für ausgewählte Felder dargelegt.

Der Bericht spricht nicht von „Schlüsseltechnologien“, sondern von „strategic techniques“, welchen eine zentrale Rolle für die schwedische Wirtschafts- und Wettbewerbsfähigkeit, nationale Sicherheit und Versorgungssicherheit sowie die ökologische Transformation haben. Der Bericht verortet die Anstrengungen auf europäischer Ebene nicht in den expliziten Diskursen zu Schlüsseltechnologien, sondern orientiert sich viel mehr an aktuellen Publikationen wie dem Draghi Report¹³ oder dem „Align, Act, Accelerate“ Report¹⁴. Als Ausgangsbasis der für die

¹³ https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead_en#paragraph_47059

¹⁴ <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2f9fc221-86bb-11ef-a67d-01aa75ed71a1/language-en>

Diskussion wurden die Technologiebereiche der „Empfehlungen der Europäischen Kommission zu „kritischen Technologiebereichen für die wirtschaftliche Sicherheit“¹⁵ genutzt. Diese Liste wurde durch Technologiebereiche ergänzt, welche für Schwedens Wettbewerbsfähigkeit zentral sind, und neu gruppiert.

Der Bericht betont, dass die Förderung von zentralen Technologien nicht um der reinen Technologieentwicklung willen passieren soll, sondern ein klares Verständnis des Anwendungskontexts in Wirtschaft und Gesellschaft für einen nachhaltigen Erfolg notwendig ist. Eine langfristig wettbewerbsfähige Technologiepolitik kann daher nicht unabhängig von Industriepolitik, Außenpolitik, Energiepolitik und Verteidigungspolitik gedacht werden.

Konkret empfiehlt Vinnova folgende Bereiche Technologiebereiche und ordnet diese in der Darstellung bereits den Zielen zu, zu denen sie beitragen sollen:

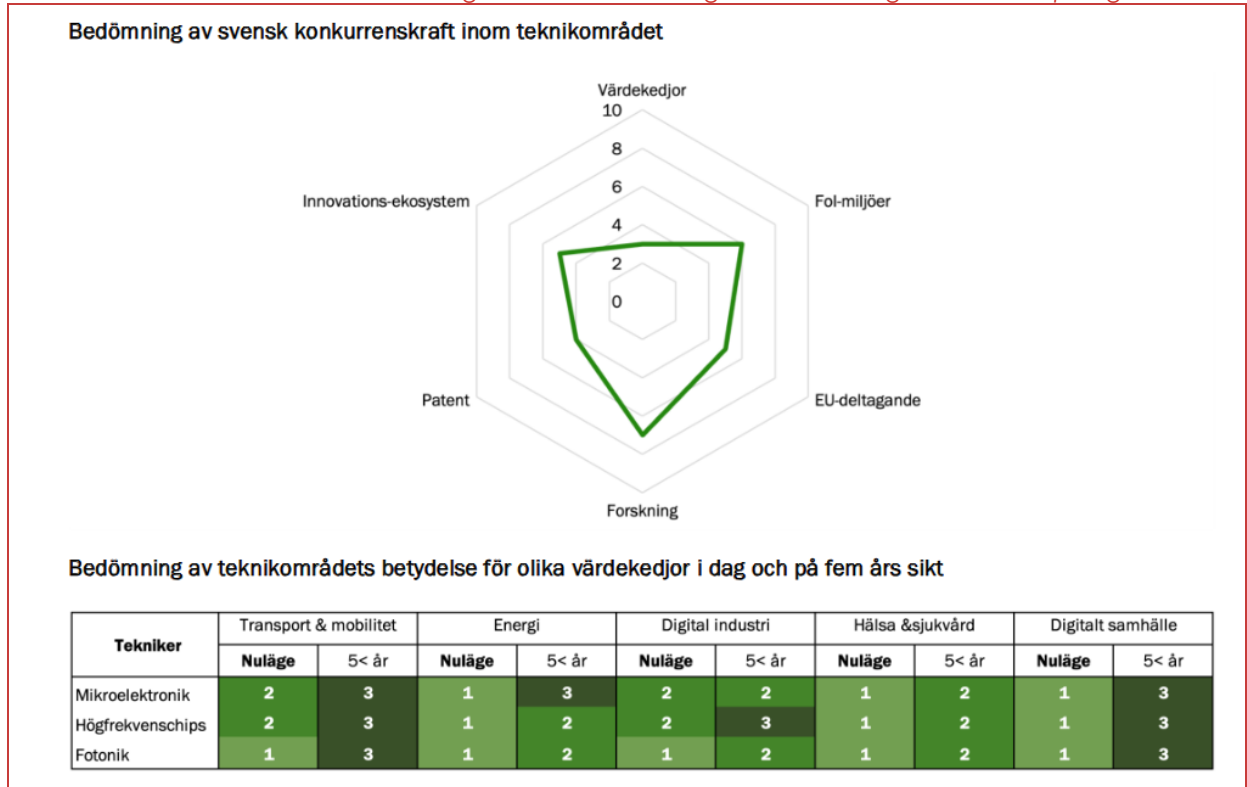
- Künstliche Intelligenz und autonome Systeme für den gesellschaftlichen Wandel
- Fortschrittliche digitale Technologien für Produktivität und Sicherheit
- Quantentechnologien für Sicherheit und industrielle Anwendungen
- Energietechnologien für eine Elektrifizierung ohne fossile Brennstoffe
- Materialien und Produktionstechnologien für die Transformation
- Biotechnologie für Gesundheit und Klimawandel

Methodologisch baut die Studie sowohl auf qualitativen Beobachtungen und Einschätzungen von Stakeholder*innen als auch auf einer quantitativen Messung der Performance in den jeweiligen Bereichen auf. Die qualitativen Analysen beziehen sich auf die KI-gestützte Auswertung von nationalen und internationalen Berichten, Interviews und Fragebögen von Stakeholder*innen, sowie den Austausch mit Interessensgruppen in „Round table“-Diskussionen. Dabei wurden sowohl technologie- und forschungsintensiven Unternehmen (Großbetriebe/KMUs), Industrieverbände, der schwedischen Forschungsrat sowie Forschungsförderer, Behörden im Bereich der Gesamtverteidigung, Forschungsinstituten und Universitäten eingebunden. Zudem gab es einen kontinuierlichen Austausch mit Regierungsvertretenden. Die quantitative Analyse basiert auf bibliometrischen Daten, Patentdaten sowie eine Auswertung von Schwedens Teilnahme am europäischen Rahmenprogramm.

Eine graphische Zusammenfassung der Analysen zeigt für alle analysierten Schlüsseltechnologiefelder auf, wie Schweden im Vergleich mit 15 Ländern ähnlicher Größe abschneidet in der Analyse von Wertschöpfungsketten, F&I-Umfeld, EU-Beteiligung, Forschung, Patenten und Innovationsökosystemen. Zudem wurde die Bedeutung des jeweiligen Technologiefelds für schwedische Wertschöpfungsketten in unterschiedlichen Industriezweigen beurteilt.

¹⁵ Commission recommendation (EU) 2023/2113 of October 2023 on critical technology areas for the EU's economic security for further risk assessment with Member States, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302113

Abbildung 9 Beispielhafte Darstellung der Einordnung von Schlüsseltechnologien in der internationalen Positionierung sowie der Einstufung der Bedeutung für Wertschöpfungsketten



Quelle: (Strander et al., 2024, s. 39) Übersetzung : „Bewertung der schwedischen Wettbewerbsfähigkeit im Technologiebereich: Wertschöpfungsketten, F&I-Umfeld, EU-Beteiligung, Forschung, Patente und Innovationsökosysteme“ (0=niedrigstes Niveau; 10=höchstes Niveau); „ Bewertung der Bedeutung des Technologiebereichs für verschiedene Wertschöpfungsketten heute und in fünf Jahren: Technologie, Mikroelektronik, Hochfrequenz Chips, Photonik / Transport & Mobilität, Energie, Digitale Industrie, Gesundheit & Gesundheitswesen, Digitale Gesellschaft / Aktueller Stand 5<Jahre“ (0=keine Bedeutung; 3=kritische Bedeutung)

Im Zusammenspiel von qualitativen Einschätzungen und quantitativer Datenanalyse wurde für jeden der Technologiebereiche eine Liste konkreter technologiespezifischer Empfehlungen erarbeitet. Diese gehen im Detail auf konkrete Potentiale und Risiken für den Einsatz in spezifischen Anwendungs- und Forschungsgebieten ein. Dabei wird insbesondere auch auf die strategische geopolitische Bedeutung von speziellen Technologien und deren Dynamik (e.g. KI in frühem Stadium – schnelle Weiterentwicklung zu erwarten) Bezug genommen.

Insgesamt betont der Bericht in seiner allgemeinen Empfehlung die Wichtigkeit von koordinierten Initiativen, welche sowohl Spitzenforschung, Infrastrukturen, Unternehmen sowie die vorkommerzielle Beschaffung umfassen. Initiativen müssen von Interessensgruppen getragen werden und möglichst konkrete Programme definieren. Dabei müssen auch relevante Ministerien und Behörden eingebunden sein, nicht nur um eine kontinuierliche Aktualisierung der strategischen Ausrichtung sicherzustellen, sondern auch um die relevanten regulatorischen Rahmenbedingungen möglichst gut auszugestalten (e.g. Regulatory Sandboxes für KI-Anwendungen).

Im Prozess wurde weiters die Herausforderung für Schweden als kleines Land mit großen internationalen Abhängigkeiten reflektiert. Es wird als praktisch unmöglich eingeschätzt, in kritischen Technologiebereichen, abgesehen von bestimmten Nischen, eine führende Position einzunehmen. Einerseits wurde in den Reflexionen darauf verwiesen, dass es wichtig ist, den

eigenen Handlungsspielraum durch das Ausbauen von bestehenden strukturellen Stärken¹⁶ zu erhalten. Andererseits wird die Zusammenarbeit auf internationaler, vor allem europäischer Ebene immer zentraler werden. Es geht daher darum, Synergien mit Partnerländern auszubauen, um ein attraktiver Partner zu sein bzw. zu bleiben. Dabei beruft sich der Bericht auf die OECD, wonach die Stärkung von technologischer Souveränität sowohl durch den Abbau von technologischen Abhängigkeiten, die Stärkung der nationalen Fähigkeiten von Forschung und Technologie sowie durch die Stärkung internationaler Forschungs- und Entwicklungsallianzen ermöglicht wird (OECD, 2023).

Für Österreich ist hier besonders die Frage relevant, wie man sich als kleines Land positionieren möchte. Ähnlich wie in Schweden gibt es konkrete *Nischen* in denen Österreich sehr gut dasteht. Die Empfehlungen der Studie schlagen daher ein *Portfolio* an Maßnahmen vor, um sowohl Stärkefelder auszubauen, Potentiale zu nutzen, und die Kompetenzen für die Nutzung von Schlüsseltechnologien im Innovationsökosystem zu erhalten. Besonders interessant ist dabei, dass die Schlüsseltechnologien hier direkt im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Industrieanwendungen diskutiert werden, für die sie als besonders zentral eingestuft wurden, um deren Bedeutung für aktuelle und zukünftige Wertschöpfungsketten herauszuarbeiten.

Weiters ist die Studie inspirierend für KI-Analysen, da sie aufzeigt, wie die gezielte Nutzung von KI-Technologien hilfreich sein kann. Die Eingrenzung von konkreten Technologiebereichen und Abwesenheit von eindeutigen Nomenklaturen stellt für Studien, sowie das Monitoring, oft eine große Herausforderung dar. Vinnova zeigt auf, wie KI-Analysen Querverbindungen und Analysesynthesen durch die Kombination von Nomenklaturen ermöglichen.

5 Nationale Rahmenbedingungen in Österreich

5.1 Stärkefelder und Herausforderungen

Etwa zeitgleich mit der vorliegenden Studie wurde vom WIFO in Zusammenarbeit mit Joanneum Research ein Studie zu Position dem Potential Österreichs in Schlüsseltechnologien verfasst (Hofmann et al., 2024). Diese stützt sich auf statistische Analysen (Patentdaten, Handelsdaten) und kontextualisiert diese durch Interviews mit Vertreter*innen der österreichischen Technologieplattformen.

Um die Potentiale von Schlüsseltechnologien zu realisieren, kommt es darauf an, ihre Entwicklung in bestehende Systeme gut einzubetten und auf Kompetenzen aufzubauen. Die genannte Untersuchung zeigt die Spezialisierungen Österreichs auf: Diese liegen schon länger und daher bekanntermaßen auf Wirtschaftsbranchen mit mittlerer bis mittelhoher Technologieintensität (Janger, 2012; Janger et al., 2011), die aufgrund hoher Qualität und forschungsgetriebener Modernisierung als wettbewerbsfähig eingestuft werden (Janger et al., 2017). Es gibt für Österreich jedoch kaum Analysen zu Spezialisierungsmustern und Stärkefeldern in Schlüsseltechnologien. Eine Studie aus dem Jahr 2014 (Reinstaller, 2014) analysiert die Wettbewerbsfähigkeit einzelner Technologiefelder der Sachgütererzeugung und weist eine

¹⁶ „Technologisch fortschrittliche Industrie mit vielen verflochtenen Wertschöpfungsketten; Internationale Konnektivität in globalen Wertschöpfungsketten, Forschung und Gesellschaft; Führende Fähigkeit zur Entwicklung von Systemlösungen - System-of-systems; Hohes Maß an Vertrauen und Zusammenarbeit zwischen Unternehmen, Sektoren und F&I-Akteuren; Starkes und dynamisches Ökosystem von innovativen Start-ups; Starkes F&I-Umfeld in mehreren kritischen Technologiebereichen; Gut ausgebildete Bevölkerung, die neue Technologien schnell annimmt; Traditionell führend im Bereich Umwelt und Klima, sowohl in der Forschung als auch in der Industrie; Tradition und Erfahrung in der Arbeit mit Ethik und Gleichstellung“

Spezialisierung Österreichs in fortgeschrittenen Werkstoffen, Produktionstechnologien, sowie Umwelttechnologien nach.

Um die aktuelle Positionierung Österreichs in Schlüsseltechnologien zu analysieren, wurden Spezialisierungsindikatoren nach Exportgütern (RCA – Revealed Comparative Advantage) und Patenten (RTA – Revealed Technological Advantage) kombiniert, wobei die Auswahl der Schlüsseltechnologien der Klassifikation der Advanced Technologies for Industry (ATI) der Europäischen Kommission sowie nach Umwelttechnologien erfolgte.

So lassen sich drei Gruppen von Spezialisierungen unterscheiden, welche sich auch mit den qualitativen Erhebungen in Interviews decken.

- Patent- als auch Handelsdaten zeigen eindeutige Spezialisierungsstärken in den Feldern fortschrittlichen Werkstoffen/Materialtechnologien, Produktionstechnologien sowie Umwelttechnologien.
- Eine Spezialisierung Österreichs in Exporten gibt es in den Feldern industrieller Biotechnologie und erneuerbaren Energien, die jedoch keinen hohen Anteil an Patenten aufweisen.
- Umgekehrt gibt es eine Spezialisierung hinsichtlich der Patente in den Feldern der Photonik und Internet der Dinge, welche sich nicht in den Handelsdaten niederschlägt.

Das Feld der Mikro- und Nanoelektronik weist ebenfalls eine Spezialisierung auf, allerdings ist dieser Bereich zu weit weg von einer Handelsspezialisierung und wird daher von den Autoren der Studie – auf Basis der konsequenten Anwendung der gewählten quantitativen Methode - als Teilschwächefeld identifiziert. Im Unterschied zu den anderen Bereichen steht dies im Widerspruch zu der Erfahrung der Interviewpartner*innen, da Österreich hier in einigen Nischen hohe Anerkennung und erfährt. Wie auch die Autor*innen der Studie anmerken, sind manche Bereiche wie Quantentechnologien in der genutzten ATI-Klassifikation nicht berücksichtigt, und „andere Bereiche, die stark in der öffentlichen Diskussion standen, wie z.B. Batterien oder Halbleiter, sind zwar Teil der Klassifikationen (z.B. Mikro. Und Nanoelektronik), jedoch nicht extra ausgewiesen. Auch in den Interviews werden die ATIs teils als zu grobkörnig beschrieben, etwa versteckten sich die für Österreich relevanten Bereiche Sensorik und Leistungselektronik in der Mikro- und Nanoelektronik.“ (ebd. S. 6).

Unter Anerkennung solcher Einschränkungen gibt der Bericht jedoch durchaus relevante Orientierungen. So lassen sich auch eindeutige Schwächefelder erkennen, bei denen weder die Handelsdaten noch die Patente ausreichend positiv ausfallen. Hierbei unterscheidet die Studie zwischen zwei Gruppen:

- In den Felder der Robotik, Nanotechnologie oder auch IT für Mobilität performt Österreich unterdurchschnittlich, ist allerdings nicht weit abgeschlagen positioniert.
- In einer weiteren Gruppe an Technologiefeldern liegt Österreich weit abgeschlagen von globalen Entwicklungen. Hierzu gehören die Felder der künstlichen Intelligenz, Big Data oder Cybersicherheit. Dies ist insofern interessant, da diese Bereiche aktuell als besonders zentrale Treiber für grundlegende wirtschaftliche Transformationen gehandhabt werden (Kroll et al., 2022).

Weiters betrachtet die Studie auch die Unternehmensebene. Dabei werden erstens die meistpatentierenden österreichischen Unternehmen in Schlüsseltechnologiefeldern betrachtet, zweitens wird die Zahl der aktiven Start-ups nach Dealroom untersucht. Es zeigt sich, dass große österreichische Betriebe, wie Tridonic, AMS, AT&S, oft patentaktiv in vielen unterschiedlichen Schlüsseltechnologien sind. Eine klare Abgrenzung rein nach Branche ist hier oft unzureichend, um die Positionierung eines Unternehmens zu verstehen. Auf die Schwierigkeit der klaren Einordnung von Schlüsseltechnologien kommt die Studie an unterschiedlichen Stellen zurück. Vor allem in den Interviews mit den Technologieplattformen wird betont, dass

Schlüsseltechnologien oft nicht als disjunkte Felder wahrgenommen werden, sondern die spezifischen Innovationen und Potentiale oft erst in der Verbindung von Technologien sichtbar werden.

Hervorzuheben ist auch die Beobachtung, dass sich besonders viele Start-ups in Feldern gibt, in denen Handels- und Patentdaten schlecht ausfallen, also in den Feldern Künstlichen Intelligenz, industriellen Biotechnologien, Big Data, Cybersicherheit, Robotik oder IT für Mobilität. Dies wird auf die vergleichsweise geringen Kosten bei der Gründung von Start-ups im Softwarebereich im Gegensatz zu Hardwareproduktion zurückgeführt. Hier besteht großes Potential, da es sowohl österreich- wie auch europaweit an großem spezialisierten Unternehmen in diesen Bereichen fehlt (Draghi, 2024).

Die Studie kommentiert zudem die Förderlandschaft zu Schlüsseltechnologien in Österreich. Die Auswertung der FFG-Förderdaten aus den Jahren 2020-2023 erlaubt, eine approximative Verteilung der Fördermittel auf Schlüsseltechnologien abzuschätzen. Erneut sind die Autor*innen mit unterschiedlichen Klassifikationen konfrontiert: Die im Bericht verwendete Klassifizierung von Schlüsseltechnologien stimmt nicht ganz mit den FFG Subject Index Codes (SIC) überein. Vor allem in den Feldern der „Digitalen Technologien“ wird in den SIC Codes nicht klar unterschieden zwischen unterschiedlichen IT-Feldern und Anwendungen, worauf auch der große Anteil an Förderungen in der Liste zurückzuführen ist und ein größerer Anteil an FFG Förderungen in den Bereichen der fortschrittlichen Produktionstechnologien sowie der Mikro- und Nanoelektronik aufgezeigt wird. Die so ausgewerteten Zahlen kommen zu dem Ergebnis, dass 51% der FFG Fördermittel in Fortgeschrittene Technologien für die Industrie (ATI) in Schlüsseltechnologiebereichen fließen, mit einem Schwerpunkt auf Digitale Technologien (29% und Produktionstechnologien (16,3%).

In Bezug auf die Förderlandschaft werden auch FWF-Förderprogramme genannt, die Schlüsseltechnologiefelder adressieren, wie z.B. excellent=austria mit spezifischen Clustern „Quantum Science Austria“, „Bilaterale künstliche Intelligenz“, sowie „Materialien für Energiekonversion und Speicherung“. Zudem gibt es auch an einigen Hochschulen spezifische Schwerpunkte (z.B. TU Wien – Materials and Matter, Information and Communication Technologies; TU Graz z.B. mit Advanced Materials Science, Mobility and Production).

Für weitere Schritte gilt es strategisch zu entscheiden, worin der größte Impact von Förderungen der öffentlichen Hand gesehen wird – Wie geht man zur Förderung technologischer Souveränität mit relativen Schwachstellen um, wie will man Österreichs Spezialisierungen stärken und weiter akzentuieren?

5.2 Ausgewählte bibliometrische Fallbeispiele

Im Rahmen dieser Studie wurde das Potential von bibliometrischen Analysen für die Positionierung Österreichs in drei Schlüsseltechnologiefeldern erprobt: Quantentechnologien, Mikrochips (Integrierte Schaltkreise) und Advanced Materials, und damit Technologiefeldern, in denen aktuell sowohl auf nationaler als auch auf Europäischer Ebene diverse Initiativen gesetzt werden. Bibliometrischen Analysen erlauben eine detaillierte Aufschlüsselung nach Subthemen, also konkreten Technologieentwicklungsbereichen. Die Analysen erstellten wir mit dem Tool „OpenAlex“, die Liste der betrachteten Themenfelder ist im Anhang zu finden.

In einem ersten Analyseschritt wurden die Entwicklung aller globalen Publikationen in einem Schlüsseltechnologiefeld nach Subfeldern aufgeschlüsselt. Abbildung 10 zeigt in jedem der drei Felder die Entwicklung der Zahl an Publikationen mit Autor*innen an österreichischen Forschungsinstitutionen seit dem Jahr 2000. So sieht man, in welchen Entwicklungsfeldern besonders intensiv geforscht wird oder wurde. Teilweise sind bereits in diesem Überblick klare Tendenzen sichtbar, wie bspw. der Anstieg an „Applications of Quantum Dots in

Nanotechnology“, „Quantum Information and Computing“, der Fokus auf „Silicon Photonics Technology“ oder „Polymer Research“.

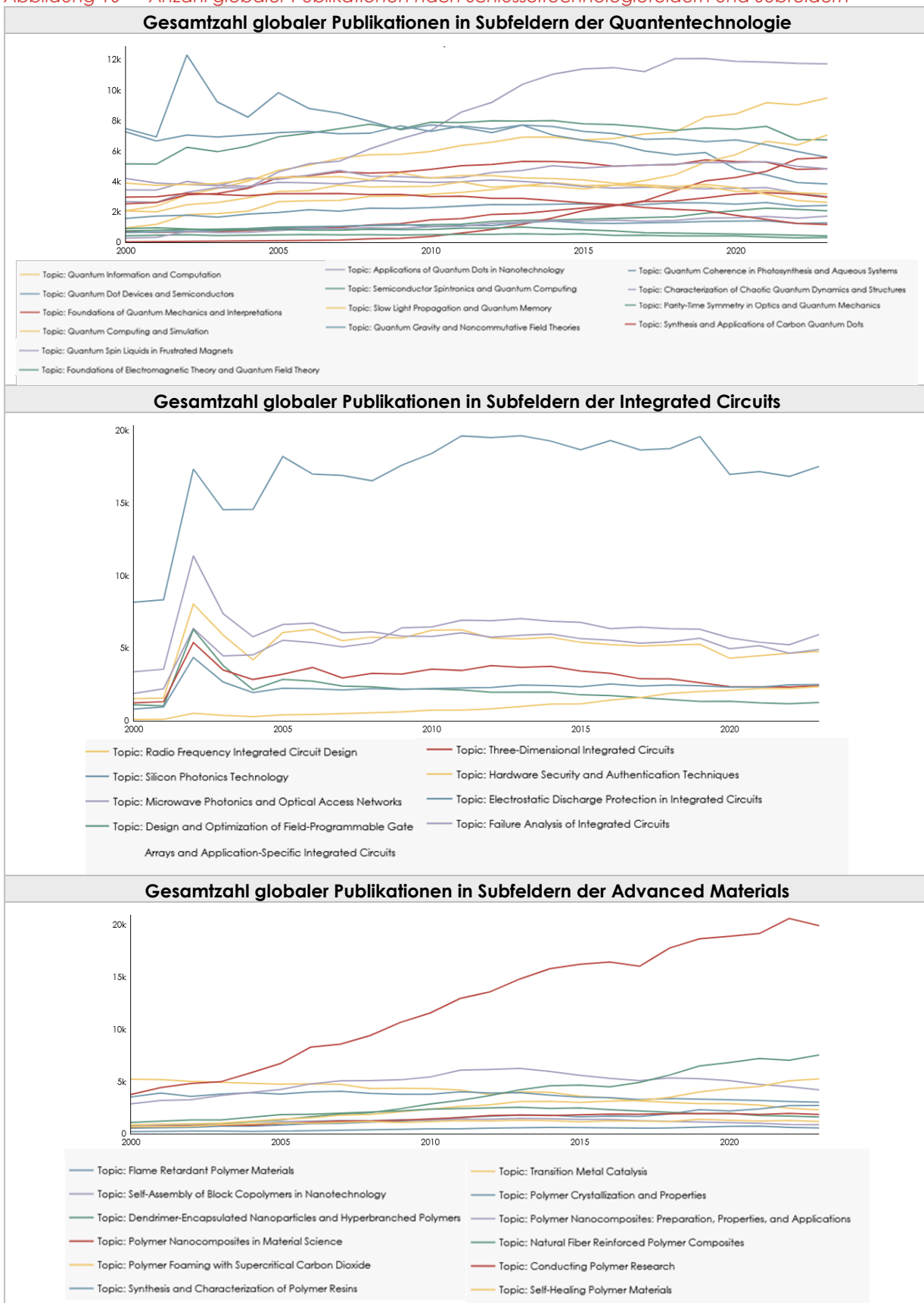
Darauf aufbauend (siehe die Abbildung 11 bis Abbildung 13) wurden Stärkefelder Österreichs über einen Vergleich der nationalen Performance mit ausgewählten Ländern¹⁷ und der globalen Entwicklung identifiziert, und dies in dreierlei Hinsicht:

- **Wissenschaftlicher Impact:** Wie oft werden österreichische Publikationen in diesem Subfeld im Vergleich zum weltweiten Durchschnitt im selben Subfeld pro Jahr zitiert?
- **Spezialisierung:** Wie hoch ist der Anteil der nationalen Publikationen in diesem Subfeld an allen österreichischen Publikationen und wie verhält sich das zum Anteil aller Publikationen in diesem Feld an allen Publikationen weltweit?
- **Patent Impact:** Wie oft wurden österreichische Publikationen in Patenten zitiert?

Die folgenden Abbildungen zeigen für jedes der Themenfelder beispielhaft ein Subfeld, das sich zumindest in einem der Kriterien als besonders erfolgreich erwiesen hat. Für diese Auswahl wurden die Indikatoren des wissenschaftlichen Impacts und der Spezialisierung für alle Subfelder erhoben. In einem zweiten Schritt wurden „auffällig erfolgreiche“ Subfelder ausgewählt und deren Patent Impact ausgewertet. Österreich ist in den folgenden Abbildungen jeweils durch die strichlierte Linie zu erkennen.

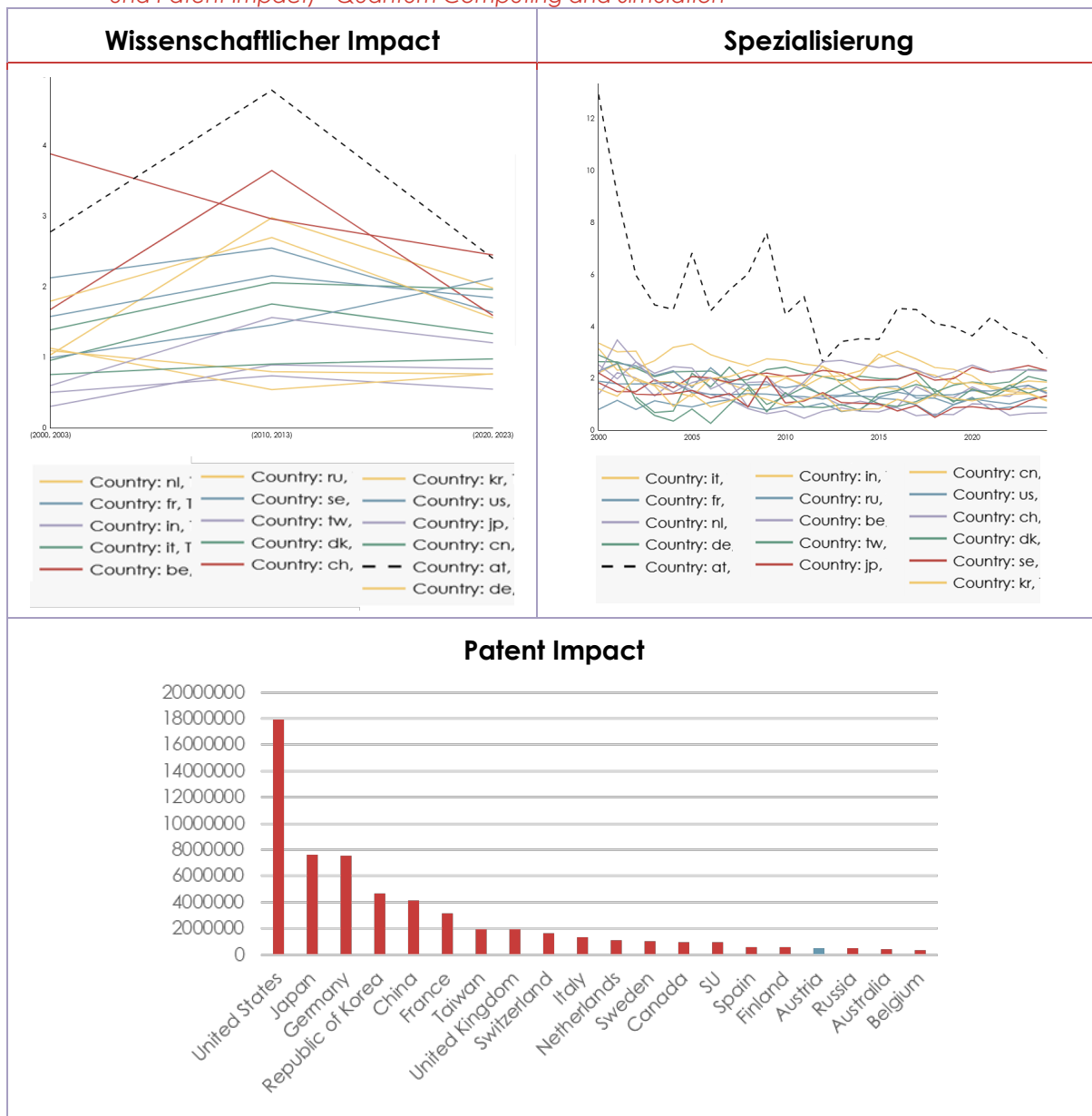
¹⁷ Deutschland, Niederlande, Frankreich, Italien, Belgien, Schweden, Dänemark, Schweiz, Vereinigten Staaten, China, Japan, South Korea, Taiwan, Russia, Indien

Abbildung 10 Anzahl globaler Publikationen nach Schlüsseltechnologiefeldern und Subfeldern



Quelle: Technopolis

Abbildung 11 Internationaler Vergleich der Performance (wissenschaftlicher Impact, Spezialisierung und Patent Impact) - Quantum Computing and Simulation

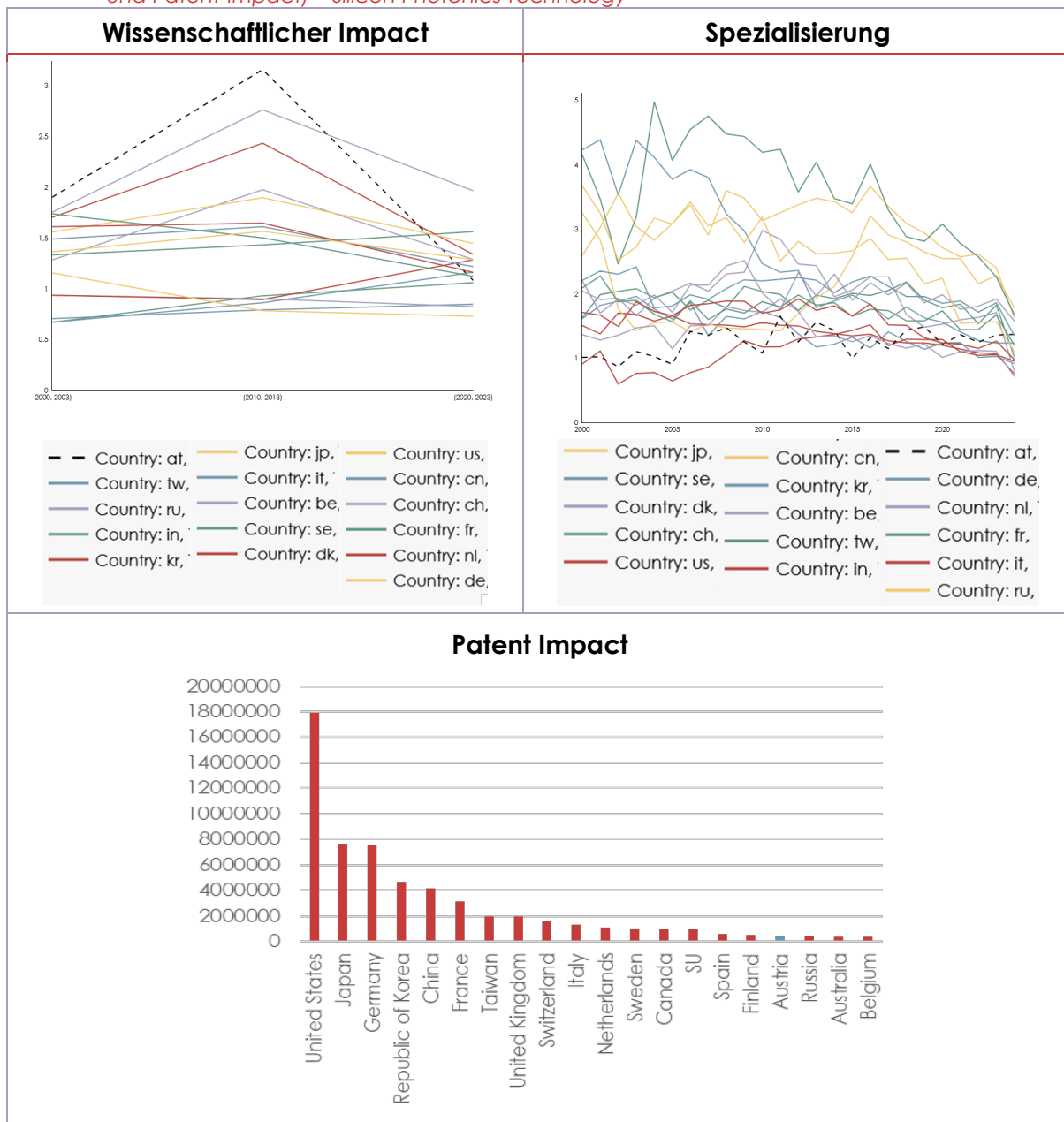


Quelle: Daten: OpenAlex, Lens.org, Berechnung und Darstellung: Technopolis

Der herausragende Erfolg der Wissenschaft in Österreich im Bereich Quanten Computing und Simulation ist bekannt, hier ist Österreich auch in den jüngsten Jahren erfolgreicher als alle Vergleichsländer. Auch der Spezialisierungsgrad in der Wissenschaft ist hier überdurchschnittlich hoch, pendelt sich aber in den jüngeren Jahren auf international vergleichbarem Niveau an der Spitze aber mit weniger großem Abstand ein.

Sucht man jedoch in diesem Subfeld den Impact der wissenschaftlichen Publikationen in österreichischen Patenten, so liegt Österreich weit hinten, die Publikationen werden weit mehr in den USA, Japan, Deutschland, Korea, China und auch Frankreich aufgegriffen, als hierzulande.

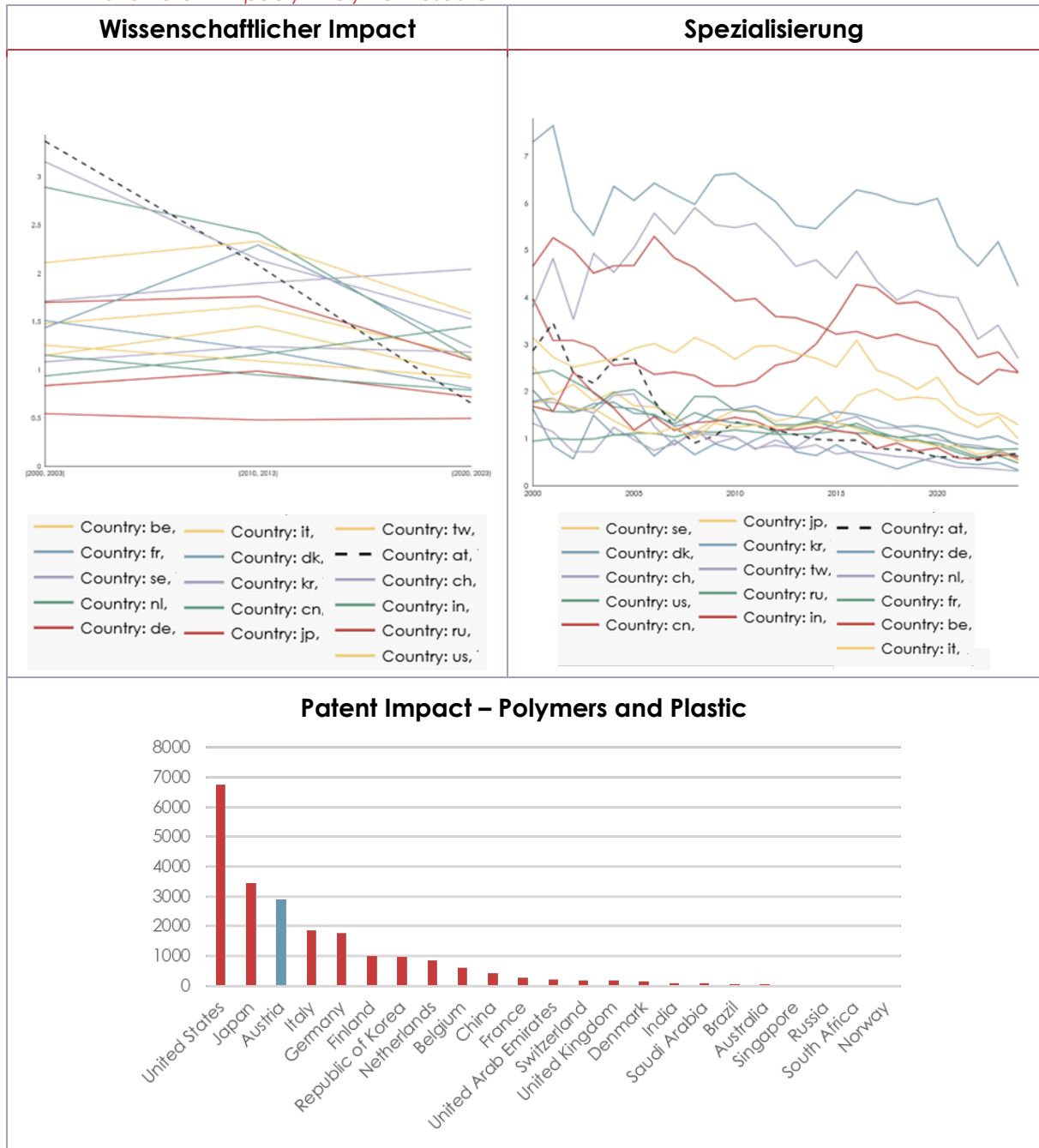
Abbildung 12 Internationaler Vergleich der Performance (wissenschaftlicher Impact, Spezialisierung und Patent-Impact) – Silicon Photonics Technology



Quelle: Daten: OpenAlex, Lens.org, Berechnung und Darstellung: Technopolis

Im Feld der Silicon Photonics Technology zeigt sich, dass hier der wissenschaftliche Impact in den Jahren 2000-2003 sowie 2010-2013 besonders ausgeprägt war. Österreichische Publikationen in diesem Feld wurden besonders häufig zitiert. Allerdings zeigt sich, dass diese Spitzenposition in den letzten Jahren zurück gegangen ist. In den Jahren 2020-2023 liegt Österreich hier lediglich im Mittelfeld. Interessant ist diese Beobachtung vor allem, da die Spezialisierung Österreichs auf das Feld der Silicon Photonics Technology im betrachteten Zeitraum zugenommen hat. Der Anteil der Publikationen in diesem Feld in Österreich hat sich also im Vergleich zum Weltschnitt erhöht. Diese erhöhte Spezialisierung bildet sich weder im Impact in Publikationen noch im Impact in Patenten ab.

Abbildung 13 Internationaler Vergleich der Performance (wissenschaftlicher Impact, Spezialisierung und Patent-Impact) – Polymer Research



Die Analyse der Polymerforschung ist besonders spannend. Im Laufe der Jahre hat sowohl der Grad der Spezialisierung in diesem Feld als auch der wissenschaftliche Impact abgenommen. Es zeigt sich jedoch eine besonders starke Positionierung österreichischer Publikationen in Patenten zu Polymeren und Plastik. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass, im Gegensatz zu den oben betrachteten Beispielen, die genaue Bezeichnung der Themen leicht unterschiedlich ist. OpenAlex spricht von „Conducting Polymer Research“ und Lens.org beschreibt die Patente zu „Polymers and Plastic“.

Die Analysen zeigen, dass Österreich in mehreren Feldern sehr gute bibliometrische Resultate (überdurchschnittlich gute Zitationswerte, überdurchschnittlich hohe Spezialisierungswerte) aufweist, dass jedoch die Verbindung zwischen wissenschaftlichem Transfer und der Umsetzung in die Anwendung – als Proxy wird hierfür die Berücksichtigung der wissenschaftlichen Publikationen in Patenten herangezogen – zu schwach ist. Umgekehrt gibt es wiederum Bereiche, in denen erfolgreich patentiert wird, obwohl Österreich kein Standort der Spitzenforschung im internationalen Vergleich ist.

Welche Schlüsse sind hieraus zu ziehen: Zum einen ist für ein kleines Land wie Österreich die Vernetzung innerhalb Europas fraglos die wichtigste Komponente, um Stärkefelder auszubauen. Zum anderen gilt es jedoch auch darauf zu achten, dass potentielle Synergieeffekte zwischen wissenschaftlicher Exzellenz und technologischer Entwicklung verloren gehen, und ebenso, dass technologische Überlegenheit im internationalen Vergleich auch durch eine angemessene wissenschaftliche Unterstützung nachhaltig gesichert wird.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

6.1 Definition von Schlüsseltechnologien

Ein zentrales Anliegen dieser Studie ist, eine Definition von Schlüsseltechnologie anzubieten. Wie eingangs diskutiert, ist die Verwendung dieses Konzepts stark von der Europäischen FTI-Politik geprägt, und hat sich über die Zeit verändert: Ausgehend von einem eher breiten Begriff von Schlüsseltechnologien (2005) über eine Einschränkung auf ausgewählte Technologien die einen „enabling“ Charakter und dadurch noch höhere systematische Relevanz hatten (2009). Nach fast einem Jahrzehnt wurde die mittlerweile dominante Ausrichtung an gesellschaftlichen Herausforderungen und Missionen auch in das KET Konzept integriert, das dadurch jedoch an Kraft verlor. Schließlich hat es durch die Sorge um technologische Souveränität angesichts der Effekte multipler Krisen kürzlich wieder an Aufmerksamkeit gewonnen.

Aufbauend auf der Definition von Schlüsseltechnologien der Europäischen Kommission (2009)¹⁸ schlagen wir folgende Definition vor, Erweiterungen sind farblich hervorgehoben:

Schlüsseltechnologien sind wissensintensiv und gehen mit einer hohen F&E-Intensität, schnellen Innovationszyklen, hohen Investitionsausgaben und hochqualifizierter Beschäftigung sowie hochspezifischen Produktionskapazitäten einher.

Sie ermöglichen Prozess-, Güter- und Dienstleistungsinnovationen in der Wirtschaft und Gesellschaft.

Sie sind multidisziplinär und erstrecken sich über viele Technologiebereiche, wobei ein Trend zur Konvergenz und Integration in Schlüsseltechnologien sowie zur Interdependenz von Schlüsseltechnologien zu beobachten ist.

¹⁸ Original: „KETs are knowledge intensive and associated with high R&D intensity, rapid innovation cycles, high capital expenditure and highly-skilled employment. They enable processes, goods and service innovation throughout the economy and are of systemic relevance. They are multidisciplinary, cutting across many technology areas with a trend towards convergence and integration.“ (Commission of the European Communities, 2009)

Sie sind von systemischer Bedeutung, als Input zu kritischen Schlüsselanwendungen und durch ihren potenziell hohen Einfluss auf die nachhaltige Entwicklung von Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt.

Die Erweiterungen beziehen sich auf die in Kapitel 3 ausgeführten Analysen:

- In Deutschland wird der Bedarf nach sehr spezifischen Produktionskapazitäten in der Förderung von Schlüsseltechnologien berücksichtigt. Auch die Analysen des ASCII zeigen, dass Schlüsseltechnologien eigentlich nicht in den großen Technologiebereichen strategisch zu verorten sind, sondern dass sich darunter hochgradig differenzierte Wertschöpfungsketten verbergen, die wiederum für Schlüsseltechnologien teilweise sehr spezialisierte Produktionsstätten brauchen.
- In Anerkennung der vereinbarten Nachhaltigkeitsziele ist neben der Wirtschaft auch die Gesellschaft (als Begriff für die Gesamtheit von Interessen heute und in Zukunft) zu nennen.
- Die Definition der Europäischen Kommission ließ das Kriterium der Konvergenz und Integration u.E. zu unscharf. Wir sehen einen Bedarf, auch Schlüsselanwendungen – insbesondere als Ort der Konvergenz und Integration - in der Definition von Schlüsseltechnologien zu berücksichtigen.
- Ein wesentlicher Zug von Schlüsseltechnologien, der bislang keine Erwähnung fand, ist die Interdependenz technologischer Entwicklungen in diesem Feld, die sich nicht für Förderungen als Herausforderung erweist. Abstimmung auf Europäischer Ebene kann daher zunehmend wichtig werden.
- Der Begriff systemischer Bedeutung hat sich in den vergangenen 2-3 Jahrzehnten gewandelt. Während wir in den 90er Jahren des letzten Jahrhundert FTI-Politik an nationalen Innovationssystemen ausgerichtet haben, wird der systemische Zugang heute (ähnlich wie vor 100 Jahren) stärker holistisch verwendet. Dies lässt sich durch die globalen Herausforderungen erklären und durch die Schwierigkeit, Kausalbeziehungen zwischen Intervention und Impact nachzuweisen. Wir halten es für notwendig, diese Dimension in der Definition von Schlüsseltechnologien aufzugreifen.
- Schließlich sind in dieser Definition auch kritische Schlüsselanwendungen erwähnt, dies ist als Hinweis für deren Relevanz im Bemühen um technologische Souveränität zu verstehen.

6.2 Kriterien und Indikatoren für die Identifikation und Verortung von Schlüsseltechnologien

Ausgehend von der oben genannten Definition lassen sich Kriterien und Indikatoren für die Identifikation und Verortung von Schlüsseltechnologien ableiten. Aus diesen Kriterien lässt sich keine Methode für eine scharfe Abgrenzung ableiten – schon allein deswegen, weil gewisse Technologien sich erst über die Zeit als Schlüsseltechnologien herausstellen oder diese Rolle verlieren können. Die Kriterien sollen jedoch helfen, Überlegungen zu Schlüsseltechnologien zu schärfen, für bestimmte Zwecke – z.B. spezifische Förderungen, oder Stakeholder-Mobilisierung aber auch für Monitoring – Zuordnungen zu organisieren und so die Wechselwirkung und Positionierung im Innovationsökosystem besser zu verstehen. Die Methode wird jeweils von diesen Zielen abhängen, da, wie die Studie von Wifo und Joanneum Research (2024) gezeigt hat, eine Herausforderung in der empirischen Erfassung z.B. in der Wahl der geeigneten Granularität liegt.

Tabelle 2 Kriterien und Indikatoren für die Identifikation von Schlüsseltechnologien

Dimension	Kriterien	Indikator
Inhärente Eigenschaften		
Wissensintensität	<p>Wissenschaftlicher Impact</p> <p>Wissenschaftliche Spezialisierung</p> <p>Verbindung Wissenschaft-Innovation</p>	<p>Anzahl Zitate österreichischer Publikationen im Subfeld im Vergleich zum weltweiten Durchschnitt</p> <p>Anteil der nationalen Publikationen im Subfeld an allen österreichischen Publikationen im Vergleich zum Anteil aller Publikationen in diesem Feld an allen Publikationen weltweit?</p> <p>Zitate österreichischer wissenschaftlicher Publikationen in Patenten</p>
Hohe F&E Intensität	<p>Relevanz des Schutzes von Intellektuellem Eigentum</p> <p>Revealed Technological Advantage -RTA</p>	<p>Anteil der nationalen Patentanmeldungen /Lizensierungen in einzelnen Schlüsseltechnologien an allen nationalen Patentanmeldungen/Lizensierungen</p> <p>Anteil der transnationalen Patentanmeldungen/Lizensierungen in einzelnen Schlüsseltechnologien an allen transnationalen Patentanmeldungen/Lizensierungen von AT</p> <p>Anteil der transnationalen Patentanmeldungen/Lizensierungen im Bereich der einzelnen Schlüsseltechnologien an allen (weltweit) transnationalen Patentanmeldungen/Lizensierungen im Bereich der Schlüsseltechnologien</p> <p>Anteil computerimplementierter Erfindungen (Softwarepatente) an allen Erfindungen im Bereich der jeweiligen Schlüsseltechnologie</p>
schnelle Innovationszyklen	Frühzeitige Erkennung von Potenzialen	Anzahl Start-Ups und Spin-Offs in dem jeweiligen Technologiefeld
hohe Investitionsausgaben	<p>Sektorspezifische Forschungsausgaben</p> <p>Öffentliche Ausgaben in Forschungsinfrastruktur</p>	<p>F&E Ausgaben des Industriesektors in dem jeweiligen Technologiefeld</p> <p>Zuordnung in der F&E Infrastrukturdatenbank nach Technologiebereichen</p> <p>Institutionelle Forschungsförderung (Grundfinanzierung, Infrastruktur) in den Technologiebereichen bzw., für die Weiterentwicklung dieser Bereiche</p>
hochqualifizierte Beschäftigung	Hochschulabsolvent*innen, eventuell auch internationale Mobilität berücksichtigen	Hochschulabsolvent*innen in Schlüsseltechnologie-relevanten Beschäftigungen
hochspezifische Produktionskapazitäten	Exportintensität	<p>Exportanteil an Österreichs Exporten</p> <p>Weltmarktanteil</p> <p>RCA (Revealed Comparative Advantage)</p>
Zieldimensionen		
Innovationen in der Wirtschaft	Integration in Innovationsprozessen	<p>Lizensierungen</p> <p>Absorption von Universitätsabsolvent*innen in Anwendungsbereichen</p>
Innovationen in der Gesellschaft	Zuordnung der Projektinhalte (Vorhaben / Ergebnisse) zu Challenges, Missionen, sowie strategischen Nachhaltigkeitszielen	<p>Fördermonitoring (FFG, Nachhaltigkeitsziele): Semantische Auswertung von Anträgen und Endberichten entlang gesellschaftlichen Impacts, bedarfsorientiert (Granularität)</p> <p>Partizipative Prozesse, Mehrdimensionale Zuordnungen: Auslotung von Ökosystemen und Interdependenzen, Berücksichtigung von Produktion und Nutzung</p>

Dimension	Kriterien	Indikator
		Auswertung nach Stichwortclustern Policy Dokumente
Disziplinäre Verortung		
Multidisziplinarität	Neue Kombinationen von Wissenschaftsgebieten in Publikationen	Novelty, Anteil involvierter Disziplinen Aufgreifen /Zitate relevanter Publikationen in unterschiedlich ausgerichteten Publikationen
Relevanz für unterschiedliche Technologiebereiche	Kooperationsbreite	Sektor-übergreifende Kooperationen in Europäischen und nationalen geförderten Innovationsprojekten
Konvergenz in Schlüsselanwendungen	Gewicht spezifischer Schlüsseltechnologien im Innovations- und Produktionsprozess	Fallbeispiele Schlüsselanwendungen
Systemische Bedeutung		
Input zu kritischen Schlüsselanwendungen	Ausgehend von kritischen Schlüsselanwendungen: Präsenz von Schlüsseltechnologien in Produktion und Entwicklung	Backward tracing in Schlüsselanwendungen (Qualitativ)
Relevanz für Missionen	Berücksichtigung von Schlüsseltechnologien in Evaluierungen der Missionen	Holistischer Zugang, Berücksichtigung im Monitoring, setzt die Identifikation der Schlüsseltechnologien voraus
Relevanz für Grand Challenges	Berücksichtigung von Schlüsseltechnologien in Evaluierungen der Beiträge zu Grand Challenges	Holistischer Zugang, Berücksichtigung im Monitoring, setzt die Identifikation der Schlüsseltechnologien voraus

Quelle: Technopolis

6.3 Schlüsseltechnologiefelder und Schlüsseltechnologien

Aufbauend auf den Analysen dieser Studie empfehlen wir acht Schlüsseltechnologiefelder. Diese spiegeln die aktuellen europäischen Bestrebungen wieder und sollen – ausgehend auch von hiesigen Stärkefeldern – die Positionierung Österreichs im internationalen Kontext sicherstellen.¹⁹ Diese Felder sind auf unterschiedlichen Ebenen angesiedelt, beschreiben Technologiebereiche in unterschiedlichen Entwicklungsstadien und mit unterschiedlich Dynamischer Entwicklung. In allen diesen Schlüsseltechnologiefeldern wird ein zentrales, strategische Entwicklungspotential gesehen und aktuell international Mittel gezielt in Forschung und Entwicklung investiert.

Im Rahmen dieser Studie war es nicht möglich detaillierte Analysen über die Positionierung Österreichs in all diesen Feldern sowie die konkrete Bedeutung einzelner Technologien für Wertschöpfungsketten umfassen zu begreifen. Wie im nächsten Unterkapitel genauer

¹⁹ z.B. Key Enabling Technologies for Europe's technological Sovereignty: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/697184/EPRS_STU\(2021\)697184_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/697184/EPRS_STU(2021)697184_EN.pdf); Strategic Technologies for Europe Platform (STEP): https://strategic-technologies.europa.eu/be-inspired_en?prefLang=de; Digital Decade Programme 2030: <https://apre.it/wp-content/uploads/2024/07/Report-on-the-state-of-the-Digital-Decade-2024.pdf>; Commission Recommendation on Critical Technology Areas for the EU's economic security for future risk assessment with Member States: https://defence-industry-space.ec.europa.eu/document/download/d2649f7e-44c4-49a9-a59d-bffd298f8fa7_en?filename=C_2023_6689_1_EN_annexe_acte_autonome_part1_v9.pdf; NWO – Recalibrated List of Key Enabling Technologies per Category: <https://www.nwo.nl/en/key-enabling-technologies>; Net Zero Industry Act: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401735

ausgeführt, verstehen wir diese Liste daher als Grundlage für weitere Stakeholderprozesse, in denen die genauere Ausformulierung and – ausgehend auch von hiesigen Stärkefeldern – an bereits bestehende aktuelle Forschungs- und Entwicklungsbestrebungen sichergestellt wird. Im Sinne eines Portfolioansatzes wird es wichtig sein herauszuarbeiten, bei in welchen dieser Schlüsseltechnologiefelder das größte Potential für eine Vormachstellung besteht, welche Rolle Technologien für die Wertschöpfungsketen spielen, einen Ausbau von technologischen Nischen, oder wo es lediglich darum geht den Kompetenzerhalt/aufbau zur Nutzung von Technologien und der Bewahrung internationalen Anschlussfähigkeit zu fördern. Unabhängig der konkreten Initiativen, die gesetzt werden können, ist es wichtig ein gutes Verständnis der Positionierung Österreichs in diesen Schlüsseltechnologiefeldern zu haben, um auf Veränderungen in diesen zentralen Bereichen reagieren zu können.

Für eine Operationalisierung und das Monitoring dieser Felder ist es notwendig, nicht nur über grobe Schlüsseltechnologiefelder zu sprechen, sondern konkrete Schlüsseltechnologien zu benennen. Erst diese Ausdifferenzierung erlaubt es, auf die spezifischen Anforderungen und Ziele (z.B. Nachhaltigkeitsdiskussionen, Souveränitätsanliegen) einzugehen, und gesondert etwaige (potentielle oder realisierte) Beiträge der Technologie zu spezifischen Missionen zur Bewältigung der Grand Challenges oder sonstiger strategischer Ziele zu ermitteln.

Die in Tabelle 3 gelisteten Technologien werden auf internationaler Ebene als zentral diskutiert und spielen auch auf nationaler Ebene eine Rolle. In weiterer Folge wird es wichtig sein noch in mehr Detail der Frage nach spezifischen Potentialen und Bedarfsmomenten zur Förderung nachzugehen, um bestmöglich auf österreichische spezifische Stärkefelder, Anwendungsgebiete und Bedürfnisse einzugehen. Zusätzlich können diese regelmäßig evaluiert und angepasst werden. Daher ist die unten genannten Liste als Orientierungspunkt für einen detaillierten Dialog mit Stakeholder*innen zu verstehen.

Tabelle 3 Empfohlene Schlüsseltechnologiefelder und exemplarische Schlüsseltechnologien.

Schlüsseltechnologiefelder	Schlüsseltechnologien - exemplarisch
Fortschrittliche Materialien inkl. Nanotechnologie	Nanomaterialien, intelligente Materialien, Biomaterialien, fortgeschrittene keramische Materialien, Metamaterialien, Soft/Biomaterialien, Dünnschichten und Beschichtungen, Energiematerialien, Technologien für die Gewinnung, Verarbeitung und Wiederverwertung kritischer Rohstoffe
Künstliche Intelligenz, Big Data, Digitale und Informationstechnologien	Künstliche Intelligenz, Datenwissenschaften, Hochleistungsrechnen, Cloud and Edge Computing, Computer Vision, Sprachverarbeitung, Internet der Dinge, virtuelle Realität, digitale Zwillinge, immersive Technologien, sichere digitale Kommunikation und Konnektivität (z.B. 6G, RAN), Technologien der Cyber-Sicherheit
Quantentechnologie und Photonik	Quanteninformatik, Quantenkryptografie, Quantenkommunikation, Quantensensoren, Quantenradar, Quantenverschlüsselung
Fortgeschrittene Mikroelektronik/Halbleiter	Mikroelektronik (inkl. Prozessoren), Photoniktechnologien (inkl. Hochenergie-Laser), Hochfrequenzchips, Halbleiterfertigungsanlagen, weltraumtaugliche Halbleitertechnologien
Fortgeschrittene Produktionstechnologien und Robotik, fortgeschrittene Sensortechnologie	Additive Fertigung, Industry 4.0 Konzepte, AI-gestützte Fertigung, Drohnen, intelligente Robotik, autonome Systeme, chemische Sensoren, biologische Sensoren, Strahlungssensoren, Magnetometer, Magnetfeldgradientenmesser, elektro-optische Sensoren, Unterwasser-Elektrosensoren, Schwerkraftmesser und Gradientenmesser
Life-Science Technologien	Nanobiotechnologie, Bioinformatik, Gen- und RNA Vektoren, Bioprozesstechnologie, synthetische Biologie, regenerative Medizin,

Schlüsseltechnologiefelder	Schlüsseltechnologien - exemplarisch
	Agrarbiotechnologie, biomolekulare und zelluläre Technologien, Impfungen, Neurotechnologie, Biooptik und bildgebende Verfahren, neue Gentechnologie, molekularbiologische Analyseverfahren, Arzneimittel für neuartige Therapien (Advanced Therapy Medicinal Products, ATMPs)
Energieerzeugung und -speicherung	Fortschrittliche Batterien und Energiespeicherung (z.B. Festkörperbatterien, Durchflussbatterien), intelligente Netztechnologien, alternative Kraftstoffe, erneuerbare Energietechnologien (inkl. Solartechnologien, Windtechnologien, Wärmepumpen, Elektrolyseure, Brennstoffzellen, etc.),
Nachhaltige Technologien: Kreislaufwirtschaft, Gebäude, Abfall/Wasser	Recyclingtechnologien zur Rückführung von Materialien in den Stoffkreislauf, saubere und nachhaltige Technologien im Gebäudebereich, saubere und nachhaltige Technologie im Abfall/Abwasser-Bereich, Kohlenstoffabscheidung- und -speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS).

Quelle: Technopolis

6.4 Schlüsseltechnologien, Technologieförderung im Kontext der FTI-Politik

Österreich hat in mehreren Feldern erfolgreiche und international gut sichtbare Kompetenzen und Kapazitäten in der Entwicklung, Produktion und Nutzung von Schlüsseltechnologien. Beispielhaft seien hier die fortgeschrittenen Werkstoffe and fortgeschrittene Materialtechnologien, Produktionstechnologien, Umwelttechnologien erwähnt. Diese Kompetenz baut auf den Säulen wissenschaftlicher Forschung, kooperativer Forschung, und kompetenter Industrie sowie mittelständischen Produktionsbetrieben auf. In den Feldern der Produktionstechnologien, Mikro- & Nanoelektronik, sowie der digitalen Technologien – die Liste ist bei weitem nicht vollständig – fördert Österreich schon lange mit unterschiedlichen Instrumenten (thematische Förderung, institutionelle Förderung, Universitäten, Unterstützungsmaßnahmen zur Beteiligung an ERA etc.) eine starke Basis in Wissen und Wissenstransfer.

Dennoch stellen sich neue Herausforderungen, insbesondere durch einige spezifische Aspekte von Schlüsseltechnologien:

- **Ein- und Abgrenzung von Schlüsseltechnologien:** Die unterschiedlichen Schlüsseltechnologiefelder sind von vielschichten Interdependenzen untereinander aber auch mit bereits bestehenden Schlüsseltechnologien gekennzeichnet. Auch die unterschiedlichen Entwicklungsstufen von Schlüsseltechnologien sind hier zu erwähnen.
- **Dynamische Entwicklung:** Schlüsseltechnologien sind angesichts unterschiedlicher Entwicklungs- und Verbreitungsgeschwindigkeiten an sich ein „Moving Target“; entsprechend der unterschiedlichen Dynamik (etablierte Technologien mit geringen Änderungen, langfristige kontinuierliche Entwicklung, exponentielles Wachstum) sind unterschiedliche Arten von Unterstützung zielführend.
- **Ziel- und Interessenskonflikte:** Es können unterschiedliche Ziele definiert werden, zu denen Schlüsseltechnologien einen Beitrag leisten sollen: Wettbewerbsfähigkeit, Nachhaltigkeit, technologische Souveränität, sowie ein Beitrag zu großen gesellschaftlichen Herausforderungen und Transformationen. Spezifische Interessen, die mit der Zielerreichung verbunden sind, stehen jedoch teilweise in Konflikt miteinander.

Wir empfehlen, bei der Auswahl von Schlüsseltechnologien im Sinne des Aikido Prinzips folgende drei Dynamiken zu nutzen:

- **Einbindung vielfältiger Stakeholder- und Nutzer*innenperspektiven:** Aktuelle Studien verweisen auf die Komplexität und inhärente Weiterentwicklung von Schlüsseltechnologien, die die Definition und das Eingrenzen schwierig machen. Zudem gibt es kaum langfristige, themenübergreifend etablierte Nomenklaturen, auf quantitative Analysen zurückgreifen können. Daher wird auf die Einbindung von Expert*innen und Nutzer*innen verwiesen, um die konkrete Bedeutung von Technologien als Schlüsseltechnologien zu erfassen und diese zu beschreiben. Wir empfehlen einen Partizipationsprozess, bei dem vielfältige Perspektiven aus Wirtschaft und Gesellschaft eingebunden werden. So eine bottom-up entwickelte Beschreibung eröffnet auch die Chance, relevante Schlüsseltechnologien frühzeitig zu erkennen bzw. die Bedeutung einzelner Schlüsseltechnologieentwicklungen für österreichische Nischenstärken herauszuarbeiten.
- **Monitoring von Positionierung und Potentialen:** Um die Positionierung von Österreich in der Schlüsseltechnologieforschung, -entwicklung und -nutzung gut zu monitoren, wurde im Rahmen dieser Studie ein Set an Kriterien vorgeschlagen, welches sowohl die inhärenten Dimensionen von Schlüsseltechnologien, Zieldimensionen, deren disziplinäre Verortung sowie systemische Bedeutung betrachtet. Zusätzlich könnten die Bedeutung und Potentiale spezifischer Technologien für konkrete Wertschöpfungsketten analysiert werden. Experimentelle KI-basierte Datenanalysemethoden zur Entwicklung und Früherkennung von Trends und Potentialen, wie beispielsweise vom ASCII vorgestellt, könnten hierfür herangezogen werden.
- **Differenzierung von konkreten Schlüsseltechnologien in den breiteren Schlüsseltechnologiefeldern:** Internationale Beispiele haben gezeigt, wie wichtig es ist, sowohl die großen Schlüsseltechnologiefelder im Auge zu behalten als auch einen klaren Fokus auf einzelne Technologieentwicklungen zu legen. So eine proaktive Beschreibung und Differenzierung einzelner Technologien ist notwendig, wenn allgemeine Kriterien den Schlüsselcharakter einer Technologie ausreichend erfassen können. Das kann für Schlüsseltechnologien gelten, die technologisch determiniert sind (z.B. in Konvergenz für bestimmten Schlüsselanwendungen) und für solche, die sich aus der systemischen Relevanz ergeben (z.B. Nachhaltigkeitskriterien oder Souveränität). Weitere Spannungsfelder – die sich durchaus harmonisch auflösen können! – sind emergente und enabling Technologies.

Inspiziert von nationalen Erfahrungen in anderen europäischen Ländern empfehlen wir für die Umsetzung dieser Bestrebungen wir einen Prozess entlang von vier Schritten:

In einem ersten Schritt gilt es, die **Positionierung** von Stakeholdern Österreichs in der Entwicklung, der Produktion und Nutzung sowie in den notwendigen wissenschaftlichen Kompetenzbereichen von Schlüsseltechnologiefeldern und konkreten Schlüsseltechnologien zu bewerten. Hierzu gehören sowohl die Positionierung Österreichs entlang von Kennzahlen²⁰ der Innovationsökosysteme, wie Patente, Forschungsleistungen, Beteiligung an europäischen Programmen, sowie eine Abschätzung der Bedeutung für Wertschöpfungsketten der heimischen Industrie. Weiters gehört hierzu ein Set an „enabling factors“ wie Förderung, wissenschaftliche Grundlagen, spezifische Produktionskapazitäten, angewandte Forschungseinrichtungen. Für alle Schlüsseltechnologien gilt ein gemeinsames Set an Kriterien der Zuordnung.

²⁰ Die aktuelle Studie von Hofmann, et al (2024) hat eine Auswahl an einschlägigen Kennzahlen hierzu bereits aufgearbeitet.

In einem zweiten Schritt soll für Schlüsseltechnologien, bei denen sich ein nicht ausgeschöpftes Potenzial (sei es an der Spitze, sei es über Lückenschließen) erkennen lässt, durch erneute Einbindung von **Stakeholdern und Szenarien-Workshops**, (vorerst virtuell) an diesen „Schrauben gedreht“ werden. So soll erstens das Potenzial, hier wirksam durch Fördermaßnahmen zu unterstützen, abgeschätzt werden. Außerdem sind solche Workshops eine Gelegenheit, Zielkonflikte frühzeitig zu erkennen und in der Strategie mit zu berücksichtigen.

In einen dritten Schritt können – ähnlich wie dies in den Niederlanden bereits durchgeführt wurde – **konkrete Initiativen** definiert werden. Dabei kann ein Portfolio aus Maßnahmen erarbeitet werden, die es ermöglichen auf explizite Ziele, Anwendungsgebiete, oder Nischen einzugehen. Im Zentrum der Aufmerksamkeit steht jeweils die Schlüsseltechnologie, sie wird jedoch mit ihrem systemischen Charakter anerkannt, und vorrangig mit existierenden Instrumenten, unterstützt. Im Sinne eines „Whole of Government-Ansatzes“ ist eine Abstimmung der unterschiedlichen Ressorts auf nationaler und länderebene (BMAW, BMBWF, BMF, BMK) für die Förderung von Technologien, Export, Ausbildung, Wissenschaft erstrebenswert. Weiters gilt es in der Entwicklung der Initiativen die Anbindung an europäische Maßnahmen sicherzustellen.

Abschließend empfehlen wir, diese Maßnahmen von einer **Expert*innengruppe** für Schlüsseltechnologien begleiten zu lassen, um z.B. zweimal pro Jahr für ausgewählte Schlüsseltechnologien die Ergebnisse des Monitorings zu diskutieren und im jeweiligen Kontext zu analysieren, und zweitens das Bild über Maßnahmen und Initiativen oder auch (neue) Herausforderungen und Chancen für Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft zu aktualisieren.

7 Quellenverzeichnis

- Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2021). *Technologisch souverän die Zukunft gestalten*.
https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/5/24032_Impulspapier_zur_technologischen_Souveraenitaet.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Commission of the European Communities. (2009). *Preparing for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies in the EU*.
- Draghi, M. (2024). *The future of European competitiveness—Part A: A competitiveness strategy for Europe*. European Commission.
- European Commission. (2012). *European strategy for Key Enabling Technologies – A bridge to growth and jobs. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, EC COM 2012/341*.
<https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2012:0341:FIN:EN:PDF>
- European Commission. (2024). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions—Advanced Materials for Industrial Leadership*.
https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/0fcf06ea-c242-44a6-b2cb-daed39584996_en?filename=com_2024_98_1_en_act_part1.pdf
- European Parliament, & Council of the European Union. (2023). *Regulation (EU) 2023/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 establishing a framework of measures for strengthening Europe's semiconductor ecosystem and amending Regulation (EU) 2021/694 (Chips Act)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1781>
- European Parliament. Directorate General for Parliamentary Research Services., IDATE., ECORYS., & Fraunhofer Fokus. (2021). *Key enabling technologies for Europe's technological sovereignty*. Publications Office.
<https://data.europa.eu/doi/10.2861/24482>
- Gaida, J., Wong-Leung, J., Robin, S., & Cave, D. (2023). *Policy Brief: ASPI's Critical Technology Tracker: The global race for future power*. https://ad-aspi.s3.ap-southeast-2.amazonaws.com/2023-08/ASPIs%20Critical%20Technology%20Tracker.pdf?VersionId=nVmWySgLSX2FMaS1U.uQVgQvvd_W427G
- Hart, A., Lau, R., & Kennedy, P. (2023). *2023 US Tech Policy Year in Review: Five Issues that Shaped the Year*. Tech Policy Press. <https://techpolicy.press/2023-us-tech-policy-year-in-review-five-issues-that-shaped-the-year>
- High- Level Group on Industrial Technologies. (2018). *Re-finding industry: Defining Innovation*. Publications Office of the European Union.
<https://data.europa.eu/doi/10.2777/927953>
- High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies. (2011). *Final Report*.
https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2009_2014/documents/imco/dv/hlg_report_ket/hlg_report_ket_en.pdf

- High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies. (2015). *Final Report—KETs: Time to Act*. https://www.eusemiconductors.eu/sites/default/files/uploads/20150622_HLG-KETs_Final-Report.pdf
- Hofmann, K., Janger, J., Strauss-Kollin, A., Uhl, M., Unterlass, F., Hartmann, C., & Schütz, M. (2024). *Schlüsseltechnologien: Position und Potenzial Österreichs*.
- Janger, J. (2012). Strukturwandel und Wettbewerbsfähigkeit in der EU. *WIFO-Monatsberichte*, 85(8), 625–640.
- Janger, J., Hölzl, W., Kaniovski, S., Kutsam, J., Peneder, M., Reinstaller, A., Sieber, S., Stadler, I., & Unterlass, F. (2011). Structural Change and the Competitiveness of EU Member States. *WIFO*. <http://www.wifo.ac.at/wwa/pubid/42956>
- Janger, J., Schubert, T., Andries, P., Rammer, C., & Hoskens, M. (2017). The EU 2020 innovation indicator: A step forward in measuring innovation outputs and outcomes? *Research Policy*, 46(1), 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.10.001>
- Key Technologies Expert Group. (2005). *Creative system disruption: Towards a research strategy beyond Lisbon - Expert Group on Key Technologies*.
- Kroll, H., Berghäuser, H., Blind, K., Neuhäusler, P., Scheifele, F., Thielmann, A., & Wydra, S. (2022). *Schlüsseltechnologien*. Studien zum deutschen Innovationssystem.
- Li, Z., Zhou, X., Jung, S., & Li, J. (2020). China's 40-year road to innovation. *Chinese Management Studies*, 14(2), 335–357. <https://doi.org/10.1108/CMS-01-2019-0019>
- Melaas, A., & Zhang, F. (2016). *National Innovation Systems in the United States and China—A Brief Review of the Literature*.
- Ministry of Economic Affairs and Climate Policy. (2024). *National Technology Strategy: Building blocks for strategic technology policy*. https://www.kia-st.nl/_asset/_public/_site_4/257-034_Nationale_Technologie_Strategie-EN_met_agenda.pdf
- OECD. (2016). *OECD Science, Technology and Innovation Outlook 2016*. OECD Publishing. http://dx.doi.org/10.1787/sti_in_outlook-2016-en
- OECD. (2023). *OECD Science, Technology and Innovation Outlook 2023*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/0b55736e-en>
- OECD. (2024a). *Framework for Anticipatory Governance of Emerging Technologies*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/0248ead5-en>
- OECD. (2024b). *Strategic Intelligence for Emerging Technology Governance: An introduction to tools for agile and anticipatory technology appraisal*. OECD Publishing.
- Ramahandry, T., Bonneau, V., Bani, E., Vlasov, N., Flickenschild, M., Batura, O., Tcholtchev, N., Lämmel, P., & Boerger, M. (2021). *Key enabling technologies for Europe's technological sovereignty*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2861/24482>
- Rat für technologische Souveränität. (2024). *Schlüsseltechnologien im Fokus Der Wettlauf um industrie- und technologiepolitische Führung „Technologische Souveränität“ im internationalen Vergleich*.

https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2024/kritische-technologien-papier.pdf?__blob=publicationFile&v=7

Reinstaller, A. (2014). *Technologiegeber Österreich. Österreichs Wettbewerbsfähigkeit in Schlüsseltechnologien und Entwicklungspotentiale als Technologiegeber*. WIFO. <http://www.wifo.ac.at/wwa/pubid/47444>

Rotolo, D., Hicks, D., & Martin, B. (2015). What Is an Emerging Technology? *Research Policy*, 44, 1827–1843. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.06.006>

Strander, Y., Marklund, G., Zika, A., Stenberg, L., Lundin, N., Johansson, D., & Hallding, K. (2024). *Strategically important areas within technology and innovation for Sweden*. Vinnova. <https://www.vinnova.se/en/publikationer/strategic-technology-areas-for-sweden/>

Waßenhoven, A., Rennings, M., Laibach, N., & Bröring, S. (2023). What constitutes a “Key Enabling Technology” for transition processes: Insights from the bioeconomy's technological landscape. *Technological Forecasting and Social Change*, 197, 122873. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122873>

Anhang A Analyisierte Dokumente

- European Commission DG Research: Key Technologies Experts Group (2005). Key Technologies for Europe: Communications. Final Draft. http://www.madrid.org/media/mtec/9-ING_communications.pdf aufgerufen 8.10.2024
- Harper, J. (2005). Creative System Disruption: Towards a Research Strategy beyond Lisbon – Foresight Brief No. 102.
- Key Technologies Expert Group (2005) Creative System Disruption: Towards a Research Strategy beyond Lisbon. https://www.researchgate.net/publication/265964321_Creative_system_disruption_towards_a_research_strategy_beyond_Lisbon_-_Expert_Group_on_Key_Technologies aufgerufen 8.10.2024
- Van der Zee, F. and Brandes, F. (2007). Manufacturing Futures for Europe – A survey on the Literature. Background Report to the Study “The Future of Manufacturing in Europe”. https://www.researchgate.net/publication/272620822_Manufacturing_Futures_for_Europe_-_A_Survey_of_the_Literature aufgerufen 8.10.2024
- Commission of the European Communities (2009). Preparing for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies in the EU {SEC(2009) 1257} <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52009SC1257> aufgerufen 8.10.2024
- Commission of the European Communities (2009). Preparing for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies in the EU - Current situation of key enabling technologies in Europe. Commission Staff Working Document {COM(2009) 512} <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52009SC1257> aufgerufen 8.10.2024
- Peter Bjørn Larsen, Els Van de Velde; Eveline Durinck, Henrik Noes Piester, Leif Jakobsen and Hanne Shapiro (2011): Cross-sectoral Analysis of the Impact of International industrial Policy on Key Enabling Technologies. Published by European Commission, DG Enterprise and Industry. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/713f63c6-9d8a-4680-99f3-de63d489e79e> aufgerufen 8.10.2024
- High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies. (2011). *Final Report*. https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2009_2014/documents/imco/dv/hlg_report_ket/hlg_report_ket_en.pdf aufgerufen 8.10.2024
- European Commission. (2012) A European strategy for Key Enabling Technologies – A bridge to growth and jobs. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, EC COM 2012/341. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2012:0341:FIN:EN:PDF> aufgerufen am 8.10.2024
- European Commission (2013). Innovation – How to convert research into commercial success story? Part 2: Analysis of innovation successes in the field of industrial technologies. http://publications.europa.eu/resource/cellar/14ff6fe1-023d-4291-8c4d-4ae779aa78a4.0001.02/DOC_1 aufgerufen 8.10.2024
- High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies (2013) Status Implementation Report. <https://economie.wallonie.be/sites/default/files/Status%20Implementation%20Report.pdf> aufgerufen 8.10.2024
- European Parliament (2014). Horizon 2020: Key Enabling Technologies (KETs), Booster for European Leadership in the Manufacturing Sector. – Study for the ITRE Committee.

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2014/536282/IPOL_STU\(2014\)536282_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2014/536282/IPOL_STU(2014)536282_EN.pdf) aufgerufen 8.10.2024

- High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies. (2015). Final Report. KETs: Time to Act. <https://era.gv.at/horizon-europe/key-enabling-technologies/kets-time-to-act-final-report/> aufgerufen 8.10.2024
- European Commission. (2015). *IPTS Working Papers on Corporate R&D and Innovation – No 5/2015 - Key Enabling Technologies and Smart Specialization Strategies*. European Regional Evidence from patent data. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/document/download/eedce0f2-84ba-4210-bf86-96d295525b0a_en aufgerufen 8.10.2024
- European Commission (2015) Study on EU Positioning: An Analysis of the International Positioning of the EU Using Revealed Comparative Advantages and the Control of Key Technologies Final Report. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2016/Final-report-EU-positioning.pdf&ved=2ahUKewis-nRhv-lAxXV7rsIHVEjBOgQFnoECAkQAQ&usq=AOvVaw2l09BkoYlugMYHQ0pXLd28> aufgerufen 8.10.2024
- European Commission. (2015). Study on skills related to Key Enabling Technologies (KETs) Final report. https://www.cecimo.eu/wp-content/uploads/2016/03/Study_on_skills_related_to_Key_Enabling_Technologies.pdf aufgerufen 8.10.2024
- European Commission. (2015). JRC- Technical Reports: The Specialisation of EU Regions in Fast Growing and Key Enabling Technologies. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/e30766b0-9275-11e5-983e-01aa75ed71a1/language-en>
- European Commission. (2015). Pilot Production in Key Enabling Technologies – Crossing the Valley of Death and Boosting the Industrial deployment of Key Enabling Technologies in Europe. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/123aac0f-24cd-11e7-b611-01aa75ed71a1> aufgerufen 8.10.2024
- European Commission. (2018). Re-finding Industry. Defining Innovation. Report of the independent High Level Group on industrial technologies. Bericht für die Europäische Kommission. Directorate-General for Research and Innovation. Directorate D – Industrial Technologies. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/28e1c485-476a-11e8-be1d-01aa75ed71a1>. Aufgerufen am 5.2.2024 aufgerufen 8.10.2024
- European Commission. (2019). Curriculum Guidelines for Key Enabling Technologies (KETs) and Advanced Manufacturing Technologies (AMT) – Interim Report. <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/4dcaeee3-29c2-11e9-8d04-01aa75ed71a1> aufgerufen 8.10.2024
- European Commission. (2019). Future technology for prosperity - Horizon scanning by Europe's technology leaders. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ae785b63-dba9-11e9-9c4e-01aa75ed71a1> aufgerufen 8.10.2024
- European Commission. (2021). Key enabling technologies for Europe's technological sovereignty. Panel for the Future of Science and Technology - European Parliamentary Research Service [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/697184/EPRS_STU\(2021\)697184_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/697184/EPRS_STU(2021)697184_EN.pdf) aufgerufen 8.10.2024
- European Commission (2021). JRC Technical Reports – Exploring Synergies between EU Cohesion Policy and Horizon 2020 Funding across European Regions: An analysis of regional

funding concentration on key enabling technologies and societal grand challenges. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC123485> aufgerufen 8.10.2024

- European Parliament. (2021). Key enabling technologies for Europe's technological sovereignty. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2861/24482> aufgerufen 8.10.2024
- European Commission, European Innovation Council and SMEs Executive Agency. (2022). Identification of emerging technologies and breakthrough innovations, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2826/06288> aufgerufen 8.10.2024

Anhang B Themenlisten der bibliometrischen Analysen

Tabelle 4 Themenliste Integriertes Schaltkreise

topic	topic_name	subfield_name	field_name	domain_name
T10187	Radio Frequency Integrated Circuit Design	Electrical and Electronic Engineering	Engineering	Physical Sciences
T10299	Silicon Photonics Technology	Electrical and Electronic Engineering	Engineering	Physical Sciences
T10767	Microwave Photonics and Optical Access Networks	Electrical and Electronic Engineering	Engineering	Physical Sciences
T11522	Design and Optimization of Field-Programmable ...	Electrical and Electronic Engineering	Engineering	Physical Sciences
T11527	Three-Dimensional Integrated Circuits	Electrical and Electronic Engineering	Engineering	Physical Sciences
T12122	Hardware Security and Authentication Techniques	Hardware and Architecture	Computer Science	Physical Sciences
T12495	Electrostatic Discharge Protection in Integrat...	Electrical and Electronic Engineering	Engineering	Physical Sciences
T14117	Failure Analysis of Integrated Circuits	Electrical and Electronic Engineering	Engineering	Physical Sciences

Quelle: Technopolis

Tabelle 5 Themenliste Advanced Materials

topic	topic_name	subfield_name	field_name	domain_name
T10092	Transition Metal Catalysis	Organic Chemistry	Chemistry	Physical Sciences
T10389	Polymer Crystallization and Properties	Polymers and Plastics	Materials Science	Physical Sciences
T10501	Polymer Nanocomposites: Preparation, Propertie...	Polymers and Plastics	Materials Science	Physical Sciences
T10513	Natural Fiber Reinforced Polymer Composites	Polymers and Plastics	Materials Science	Physical Sciences
T10660	Conducting Polymer Research	Polymers and Plastics	Materials Science	Physical Sciences
T10810	Self-Healing Polymer Materials	Polymers and Plastics	Materials Science	Physical Sciences
T11360	Flame Retardant Polymer Materials	Polymers and Plastics	Materials Science	Physical Sciences
T11471	Self-Assembly of Block Copolymers in Nanotechn...	Materials Chemistry	Materials Science	Physical Sciences
T11686	Dendrimer-Encapsulated Nanoparticles and Hyper...	Polymers and Plastics	Materials Science	Physical Sciences
T12416	Polymer Nanocomposites in Material Science	Polymers and Plastics	Materials Science	Physical Sciences
T12628	Polymer Foaming with Supercritical Carbon Dioxide	Polymers and Plastics	Materials Science	Physical Sciences
T14303	Synthesis and Characterization of Polymer Resins	Polymers and Plastics	Materials Science	Physical Sciences

Quelle: Technopolis

Tabelle 6 Themenliste Quantentechnologien

topic	topic_name	subfield_name	field_name	domain_name
T13253	Chemical Reactions Involving Quantum Tunneling	Physical and Theoretical Chemistry	Chemistry	Physical Sciences
T10020	Quantum Information and Computation	Artificial Intelligence	Computer Science	Physical Sciences
T10682	Quantum Computing and Simulation	Artificial Intelligence	Computer Science	Physical Sciences
T13182	Design and Simulation of Quantum-dot Cellular ...	Computational Theory and Mathematics	Computer Science	Physical Sciences
T10321	Applications of Quantum Dots in Nanotechnology	Materials Chemistry	Materials Science	Physical Sciences
T11342	Synthesis and Applications of Carbon Quantum Dots	Materials Chemistry	Materials Science	Physical Sciences
T10022	Quantum Dot Devices and Semiconductors	Atomic and Molecular Physics, and Optics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T10382	Semiconductor Spintronics and Quantum Computing	Atomic and Molecular Physics, and Optics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T10622	Foundations of Quantum Mechanics and Interpret...	Atomic and Molecular Physics, and Optics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T11177	Quantum Coherence in Photosynthesis and Aqueou...	Atomic and Molecular Physics, and Optics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T11262	Parity-Time Symmetry in Optics and Quantum Mec...	Atomic and Molecular Physics, and Optics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T11414	Slow Light Propagation and Quantum Memory	Atomic and Molecular Physics, and Optics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T11683	Foundations of Electromagnetic Theory and Quan...	Atomic and Molecular Physics, and Optics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T11804	Quantum Many-Body Systems and Entanglement Dyn...	Atomic and Molecular Physics, and Optics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T11965	Quantum Effects in Helium Nanodroplets and Solids	Atomic and Molecular Physics, and Optics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T13531	Quantum Size Effects in Metallic Nanostructures	Atomic and Molecular Physics, and Optics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T11682	Quantum Spin Liquids in Frustrated Magnets	Condensed Matter Physics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T11261	Characterization of Chaotic Quantum Dynamics a...	Statistical and Nonlinear Physics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T11415	Quantum Gravity and Noncommutative Field Theories	Statistical and Nonlinear Physics	Physics and Astronomy	Physical Sciences
T12516	Cantorian-Fractal Theory of Quantum Physics	Statistical and Nonlinear Physics	Physics and Astronomy	Physical Sciences

Quelle: Technopolis



www.technopolis-group.com