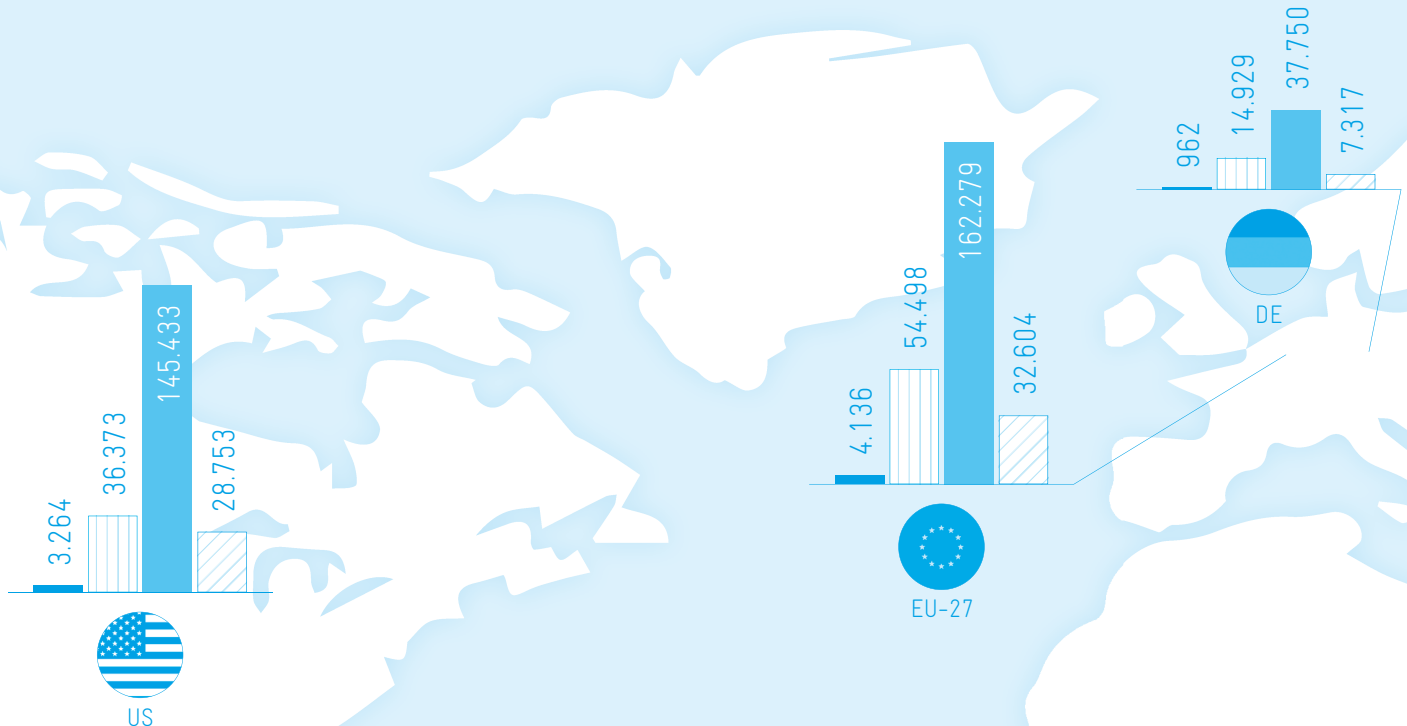
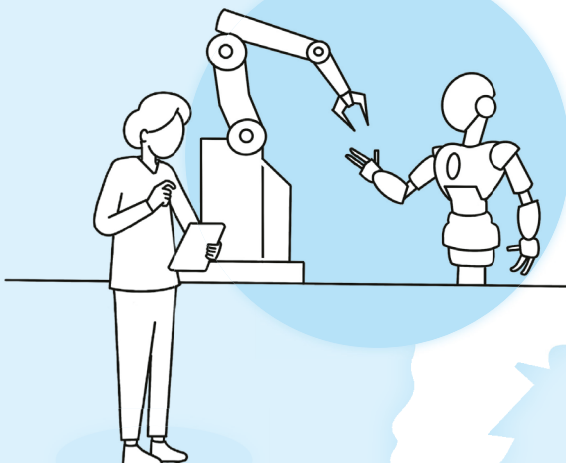


# B 1 Schlüsseltechnologien und technologische Souveränität



## Produktionstechnologien

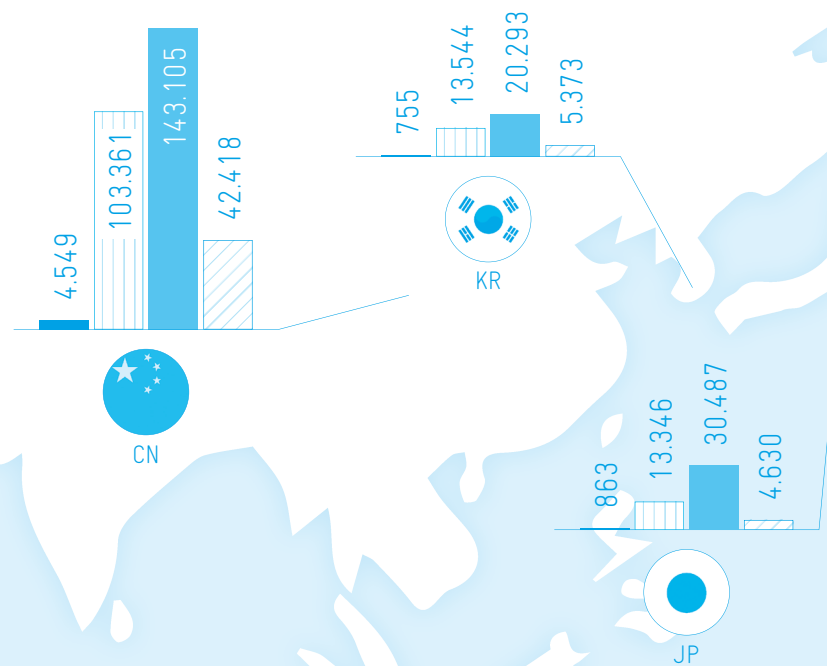
Advanced Manufacturing, Robotik, Photonik



## Materialtechnologien

Neue Werkstoffe, Nanotechnologien

Schlüsseltechnologien eröffnen einer Volkswirtschaft hohe Potenziale für eine prosperierende technologische und wirtschaftliche Entwicklung und damit für Wohlstand. Sie haben eine zentrale Bedeutung für die aktuellen und zukünftigen Wertschöpfungsaktivitäten. Alleinstellungsmerkmale und Innovationen bei den Schlüsseltechnologien tragen zur Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen einer Volkswirtschaft in diesen Technologien bei. Aus diesem Grund sind Schlüsseltechnologien zunehmend in den Fokus der Politik gerückt. Damit eine Volkswirtschaft bei etablierten wie auch bei zukünftigen Schlüsseltechnologien technologisch souverän agieren kann und nicht in wohlfahrtsmindernde Abhängigkeiten gerät, sehen sich politische Entscheidungsträger veranlasst, passende strategische Konzepte zu entwickeln.



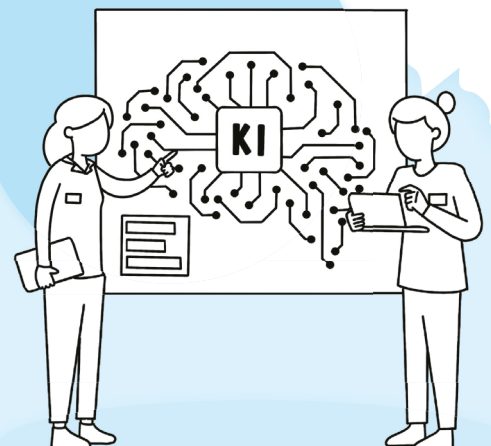
## Bio- und Lebenswissenschaften

Bioökonomie, Lebenswissenschaften



## Digitale Technologien

Mikroelektronik, künstliche Intelligenz, Internet of Things, Digitale Sicherheitstechnologien, Big Data, Digitale Mobilitätstechnologien



# B 1 Schlüsseltechnologien und technologische Souveränität

**A**ls Schlüsseltechnologien werden Technologien bezeichnet, die Schlüsselrollen bei technologischen und ökonomischen Entwicklungen einnehmen. Eine dieser Rollen ergibt sich durch die Bedeutung einer Schlüsseltechnologie für die innovative Weiterentwicklung und Anwendung anderer Technologien (Enabler-Funktion). So etwa kommt leistungsfähigen Steuerungschips in vielen Bereichen moderner Produktion (Industrie 4.0), bei Bereitstellung und Weiterentwicklung neuer Energie- und Mobilitätskonzepte sowie zunehmend im häuslichen Konsum (Smarthome) eine sehr wichtige, oft nicht zu ersetzende Rolle zu. Eine weitere Schlüsselrolle nehmen diese Technologien durch ihren zentralen Beitrag zur Entstehung und Entwicklung großer und dynamischer globaler Märkte ein. Bis 2024 wird beispielsweise erwartet, dass der weltweite Umsatz des Marktes für künstliche Intelligenz (KI) die 500-Milliarden-US-Dollar-Marke überschreitet, mit einer fünfjährigen durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 17,5 Prozent und einem Gesamtumsatz von 554,3 Milliarden US-Dollar.<sup>128</sup> Darüber hinaus wird Schlüsseltechnologien eine Schlüsselrolle bei wichtigen Transformationsprozessen in Wirtschaft und Gesellschaft zugesprochen. So können beispielsweise nachhaltigkeitsrelevante Technologien im Bereich der Bioökonomie oder der hochwertigen Gesundheitsversorgung bei der Bewältigung der großen gesellschaftlichen Herausforderungen und der Verfolgung der Sustainable Development Goals zum Tragen kommen.<sup>129</sup>

Schlüsseltechnologien eröffnen einer Volkswirtschaft hohe Potenziale für eine prosperierende technologische und wirtschaftliche Entwicklung und damit für Wohlstand. Sie haben eine zentrale Bedeutung für die aktuellen und zukünftigen Wert-

schöpfungsaktivitäten. Alleinstellungsmerkmale und Innovationen bei den Schlüsseltechnologien tragen zur Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen und weiterer Akteure des F&I-Systems einer Volkswirtschaft bei. Nicht zuletzt eröffnen sie einer Volkswirtschaft die Möglichkeit, globale wirtschaftliche und gesellschaftliche Transformationsprozesse aktiv mitzugestalten sowie zur Lösung der großen gesellschaftlichen Herausforderungen beizutragen.

Um diese Ziele selbstbestimmt verfolgen und die damit verbundenen Potenziale nutzen zu können, muss eine Volkswirtschaft im Umgang mit Schlüsseltechnologien ein hohes Maß an technologischer Souveränität aufweisen. Verliert eine Volkswirtschaft hierbei international den Anschluss und damit an Souveränität, können sich Abhängigkeiten ergeben, die wohlfahrtsmindernd und kurz- bzw. mittelfristig nur schwer zu beheben sind.

Aus diesem Grund sind Schlüsseltechnologien zunehmend in den Fokus der politischen Entscheidungsträger gerückt, die passende strategische Konzepte entwickeln müssen, damit eine Volkswirtschaft bei etablierten wie auch bei zukünftigen Schlüsseltechnologien technologisch souverän agieren kann und nicht in wohlfahrtsmindernde Abhängigkeiten gerät.

## B 1-1 Schlüsseltechnologien und ihre Relevanz für technologische Souveränität

### Schlüsseltechnologien durch drei Kriterien definiert

Die Definition des Konzepts Schlüsseltechnologien ist weder in der wissenschaftlichen Literatur noch

in der politischen Diskussion einheitlich und präzise.<sup>130</sup> Die folgenden drei Kriterien<sup>131</sup> werden in der bestehenden Literatur<sup>132</sup> für die Identifikation von Schlüsseltechnologien vorgeschlagen:

- 1) Breite Anwendbarkeit in einer Vielzahl von Technologiebereichen oder Branchen
- 2) Starke, nicht substituierbare Komplementarität zu einer Vielzahl anderer Technologien
- 3) Hohes Potenzial für Leistungssteigerung bei einer Schlüsseltechnologie selbst und bei ihren Anwendungsbereichen

Die Kriterien eins und zwei beziehen sich unmittelbar auf die Anwendungsseite von Schlüsseltechnologien, nämlich eine Anwendung in großer Breite bei anderen Technologien, und das sehr oft ohne technologische Alternativen. Kriterium drei stellt auf die Innovationspotenziale bei einer Schlüsseltechnologie sowie bei ihren Anwendungstechnologien ab.

In der F&I-politischen und wirtschaftspolitischen Praxis erfolgt die Klassifizierung einer Technologie als Schlüsseltechnologie wenig systematisch und definitionsgeleitet, sondern ergibt sich diskursiv aus den politischen Prozessen. Eine Instrumentalisierung des Begriffs der Schlüsseltechnologie für die Durchsetzung von Partikularinteressen ist bei einem solchen Ansatz nicht auszuschließen. Um dies zu vermeiden, müssen im politischen Prozess klare Kriterien – entsprechend der drei oben benannten – zur Einordnung einer Technologie als Schlüsseltechnologie herangezogen werden.

### Portfoliobetrachtung von Schlüsseltechnologien wichtig

Um die internationale Position einer Volkswirtschaft bei der Entwicklung und Nutzung von etablierten und zukünftigen Schlüsseltechnologien feststellen zu können, ist eine Portfoliobetrachtung wichtig. Die dabei zu berücksichtigenden etablierten Schlüsseltechnologien können anhand der oben genannten Kriterien identifiziert werden. Bei zukünftigen Schlüsseltechnologien ist zu prüfen, inwieweit erwartet werden kann, dass eine Technologie diese Kriterien in Zukunft erfüllen kann. Die Identifikation einer zukünftigen Schlüsseltechnologie in der Frühphase ihrer Entwicklung ist empirisch schwierig und mit hoher Unsicherheit verbunden. Ein möglicher Ansatz dafür ist ein

dialogbasierter Strategic-Foresight-Prozess,<sup>133</sup> bei dem Expertinnen und Experten aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft einbezogen werden und der durch ein strategisches Beratungsgremium<sup>134</sup> geleitet wird.

Diesem strategischen Beratungsgremium kann auch die Aufgabe übertragen werden, ein Portfolio etablierter und zukünftiger Schlüsseltechnologien aufzubauen und weiterzuentwickeln. Zu dieser Aufgabe würde es auch gehören, die Einordnung einer Technologie als Schlüsseltechnologie innerhalb des Portfolios regelmäßig zu überprüfen.

Der systematische Aufbau eines Portfolios kann dazu beitragen, mittels einer langfristigen Perspektive Schlüsseltechnologien schon früh zu erkennen und deren Entwicklung ggf. mit geeigneten Maßnahmen zu unterstützen. Bei etablierten Schlüsseltechnologien lassen sich im internationalen Vergleich Schwachpunkte und daraus resultierende Abhängigkeiten erkennen.

### Beherrschung und Verfügbarkeit für technologische Souveränität nötig

Der Begriff der technologischen Souveränität wird in der deutschen Politik ungefähr seit Anfang der 2010er-Jahre verwendet und konzentrierte sich zunächst auf digitale Technologien und digitale Sicherheit. Im Laufe der Zeit wurde der Begriff auf sämtliche Technologiebereiche ausgeweitet. Digitale Technologien und Sicherheitsaspekte werden heute unter dem Begriff der digitalen Souveränität diskutiert, die als wesentlicher Bestandteil der technologischen Souveränität eines Landes gilt.<sup>135</sup>

In der Literatur wird das Konzept der technologischen Souveränität recht unterschiedlich beschrieben und definiert.<sup>136</sup> Eine geeignete Definition setzt auf der Ebene einer Volkswirtschaft an und bezieht sich auf eine einzelne Technologie. Die Definition der Expertenkommission baut auf der Definition des Fraunhofer ISI<sup>137</sup> auf und passt diese entsprechend an:<sup>138</sup>

Eine Volkswirtschaft ist in einer Technologie souverän, wenn sie diese Technologie, die wesentlich zu ihrer Wohlfahrt und Wettbewerbsfähigkeit beiträgt oder kritisch im Sinne systemischer Relevanz ist, selbst vorhalten, weiterentwickeln und bei ihrer Standardisierung mitwirken kann oder über die Möglich-

keit verfügt, diese Technologie ohne einseitige Abhängigkeit von anderen Wirtschaftsräumen zu beziehen und anzuwenden.

Schlüsseltechnologien, die der Definition nach wesentlich zu Wohlfahrt und Wettbewerbsfähigkeit in einer Volkswirtschaft beitragen und zentrale, systemrelevante Positionen einnehmen, zählen zweifellos zu den Technologien, bei denen die Frage nach der technologischen Souveränität einer Volkswirtschaft von besonderer Relevanz ist. Ist diese nicht in ausreichendem Maße gegeben, können – insbesondere in Krisensituationen – wohlfahrtsmindernde Engpässe auftreten.

Technologische Souveränität ergibt sich zum einen aus dem Grad, mit dem eine Volkswirtschaft die Anwendung und Nutzung einer bestimmten Technologie beherrscht, und zum anderen aus dem Grad, mit dem diese Technologie einer Volkswirtschaft zur weiteren Nutzung zur Verfügung steht. Die Dimension der Beherrschung bemisst sich an dem Wissen und den Fähigkeiten, die hinsichtlich einer bestimmten Technologie innerhalb einer Volkswirtschaft vorhanden sind. Die Dimension der Verfügbarkeit erfasst, inwieweit eine Volkswirtschaft über eine bestimmte Technologie zur weiteren Nutzung verfügen kann, sei es durch eigene Herstellung oder durch den vollständigen oder teilweisen Bezug von außen über den internationalen Handel.

### Technologische Souveränität durch Rückstände bei Schlüsseltechnologien gefährdet

Wie die Beherrschung einer Schlüsseltechnologie zu einem kritischen Faktor werden kann, lässt sich mit einem Modell des technologischen Wissensaufbaus<sup>139</sup> erklären.<sup>140</sup> Danach vollzieht sich der Prozess des Aufbaus von Wissen in einem bestimmten technologischen Bereich auf kumulative, sich selbst verstärkende Weise. Das heißt, der weitere Wissenszuwachs in einem Technologiebereich hängt vom bisher erreichten Niveau in diesem Bereich ab. Bezogen auf eine Schlüsseltechnologie und den Innovationswettbewerb zwischen Ländern impliziert dieser Mechanismus, dass sich anfänglich bestehende Unterschiede im technologischen Wissen vergrößern. Es baut sich dadurch zwischen den Ländern eine wachsende technologische Lücke<sup>141</sup> auf.

Wie sich diese Entwicklung auf die beiden Dimensionen der technologischen Souveränität einer Volkswirtschaft auswirkt, stellt sich am Beispiel

einer einzigen Schlüsseltechnologie wie folgt dar: Bezüglich der Dimension Beherrschung einer Technologie besitzt die in einer Schlüsseltechnologie führende Volkswirtschaft stets eine hohe oder vollständige technologische Souveränität. Mit zunehmender technologischer Lücke nimmt hingegen für die technologisch nachfolgende Volkswirtschaft der Grad der Beherrschung dieser Schlüsseltechnologie Schritt für Schritt ab, ihre technologische Souveränität sinkt.

Dieser Rückgang an Souveränität lässt sich allerdings kompensieren, indem die nachfolgende Volkswirtschaft die internationale Arbeitsteilung nutzt und die neueste Version dieser Schlüsseltechnologie sowie die dazugehörige Anwendungsexpertise aus der technologisch führenden Volkswirtschaft importiert. Die technologische Souveränität wäre so hinsichtlich der Dimensionen Verfügbarkeit und Beherrschung der Technologie für diese Volkswirtschaft gesichert. Dieses Vorgehen impliziert allerdings, dass die komparativen Nachteile für die nachfolgende Volkswirtschaft mit wachsender technologischer Lücke zunehmen und sich deren Handelsbedingungen (Terms of Trade) verschlechtern.<sup>142</sup> Entsprechend wird der Import der Schlüsseltechnologie samt Anwendungsexpertise immer teurer, mit der Folge, dass sowohl der Grad der Verfügbarkeit als auch der Grad der Beherrschung abnehmen. Auf diese Weise verringert sich die technologische Souveränität des nachfolgenden Landes kontinuierlich, und dessen Abhängigkeit vom Ausland nimmt zu.

Wird die Betrachtung auf mehrere oder sehr breit aufgestellte Schlüsseltechnologien erweitert, dann ist es vorstellbar, dass sich Volkswirtschaften auf bestimmte Schlüsseltechnologien spezialisieren und darin gegenüber anderen Volkswirtschaften komparative Vorteile aufbauen. In diesem Kontext eines Portfolios an Schlüsseltechnologien spielt die Frage nach der technologischen Souveränität bei einer bestimmten Schlüsseltechnologie eine geringere Rolle. Volkswirtschaften können sich dementsprechend jeweils auf Schlüsseltechnologien spezialisieren, sind dann beim Bezug von Schlüsseltechnologien wechselseitig aufeinander angewiesen, wodurch einseitige Abhängigkeiten weniger wahrscheinlich werden.

Die Einbindung einer Volkswirtschaft in den Außenhandel wird durch ihre komparativen Vor- und Nachteile gegenüber dem Ausland bestimmt. Beim



Konzept der komparativen Vorteile können zwei Arten unterschieden werden: statische und dynamische komparative Vorteile. Statische komparative Vorteile sind auf Kontextfaktoren zurückzuführen, wie etwa natürliche Gegebenheiten; sie lassen sich nicht oder kaum beeinflussen. Dynamische komparative Vorteile hingegen sind auf veränderbare Faktoren zurückzuführen. Hierzu zählen Technologien, die durch technischen Wandel und Innovationen verbessert und weiterentwickelt werden können.

Eine Volkswirtschaft, die sich bei gegebenen statischen komparativen Vorteilen so spezialisiert, dass Schlüsseltechnologien aus dem Ausland importiert werden müssen, läuft aufgrund zunehmender technologischer Lücken Gefahr, technologische Souveränität in einer oder mehreren Schlüsseltechnologien zu verlieren und damit in Abhängigkeiten zu geraten.

Ein Ausweg aus dieser Situation ist, sich nicht weiter auf Bereiche mit bestehenden statischen komparativen Vorteilen zu spezialisieren. Vielmehr ist es sinnvoll, den Aufbau eigener komparativer Vorteile bei Schlüsseltechnologien mit geeigneten Fördermaßnahmen zu verfolgen. Diese aus statischer Sicht „falsche“ Spezialisierung ist zunächst mit wohlfahrtsmindernden Effekten verbunden.<sup>143</sup> In einer dynamischen und langfristigen Perspektive können diese jedoch durch Wohlfahrtsgewinne, die sich aus mittlerweile aufgebauten komparativen Vorteilen bei Schlüsseltechnologien ergeben, überkompensiert werden.<sup>144</sup> Südkorea in den 1980er Jahre ist ein gutes Beispiel dafür.<sup>145</sup> Seine sehr erfolgreiche Industrialisierung und sein Weg in die Gruppe der technologisch führenden Volkswirtschaften beruhen gerade darauf, dass es nicht auf bestehende statische komparative Vorteile im Reisanbau und in anderen technologisch wenig anspruchsvollen Bereichen gesetzt hat. Die Entwicklung hin zu technologie- und wissensintensiven Sektoren und Industrien – durch den Staat angeschoben und durch intensive Fördermaßnahmen unterstützt – hat es dem Land ermöglicht, nach einer gewissen Zeit komparative Vorteile in diesen anspruchsvollen Technologiebereichen zu etablieren.

## B 1-2 Deutschlands Positionierung bei aktuellen Schlüsseltechnologien

### Aktuelle Schlüsseltechnologien sehr heterogen

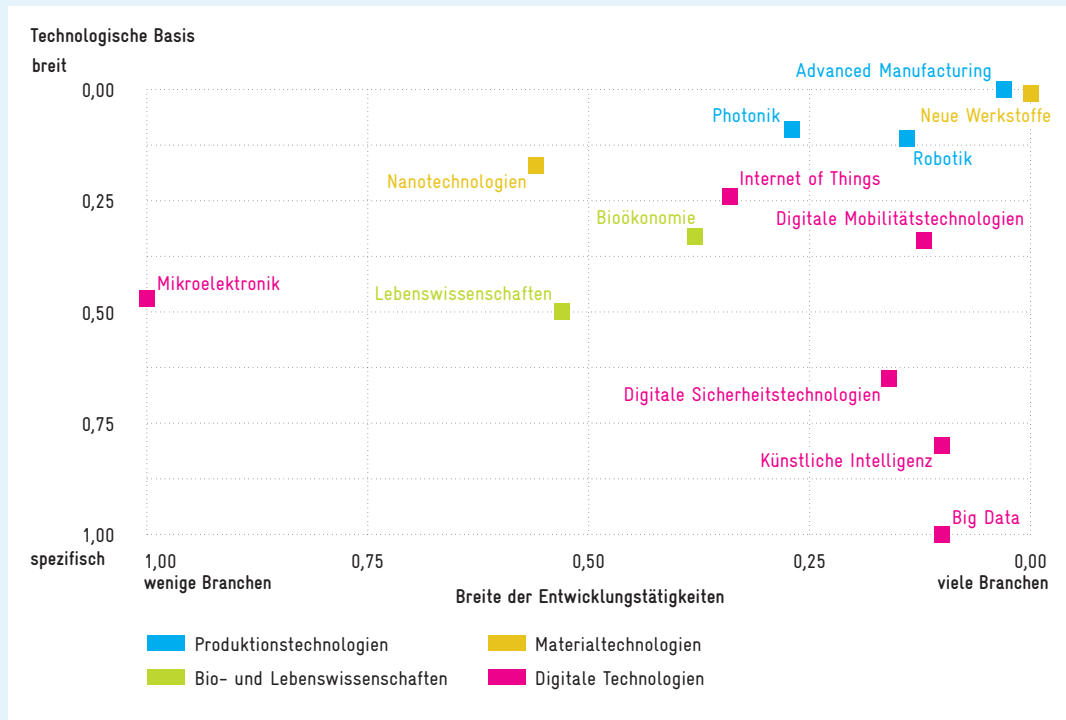
Die Expertenkommission weist darauf hin, dass die Identifizierung von Schlüsseltechnologien ein komplexes und kontroverses Unterfangen ist. Deshalb greift die Expertenkommission für das vorliegende Kapitel auf eine von ihr in Auftrag gegebene Studie<sup>146</sup> zurück, die für ihre Analysen eine Auswahl von Schlüsseltechnologien verwendet, welche bereits für Monitorings und Strategiepapiere auf europäischer und deutscher Ebene erstellt wurde.<sup>147</sup> In dieser Studie wurden 13 Einzeltechnologien (vgl. Abbildung B 1-1) identifiziert, die sich vier thematisch übergeordneten Schlüsseltechnologiebereichen zuordnen lassen: den Produktionstechnologien, den Materialtechnologien, den Bio- und Lebenswissenschaften, den Digitalen Technologien.

Da es für die Einordnung einer Technologie als Schlüsseltechnologie und für die technologische Souveränität eines Landes nur eine untergeordnete Rolle spielt, in welchen Branchen und Produkten eine Schlüsseltechnologie zur Anwendung kommt, werden die ausgewählten Schlüsseltechnologien im Folgenden nicht anwendungsseitig betrachtet. Dementsprechend werden die Technologien nachfolgend dahingehend analysiert, wie intensiv ihre Erforschung und Entwicklung verläuft und wie sich der internationale Handel mit ihnen gestaltet. Die vorliegende empirische Untersuchung basiert somit auf einer anbieterseitigen Charakterisierung von Schlüsseltechnologien.

Zunächst wird dargestellt, ob die einer Schlüsseltechnologie zugeordneten weltweiten Erfindungen, gemessen an Patentanmeldungen, überwiegend aus einigen wenigen oder aus vielen verschiedenen Branchen stammen; es geht somit um die Breite der ihr zugehörigen Entwicklungstätigkeiten.<sup>148</sup> Zusätzlich wird abgebildet, inwieweit die weltweiten Patentanmeldungen, die einer Schlüsseltechnologie zugeordnet werden können, auf ein klar definiertes Technologiefeld beschränkt sind oder sich breit über verschiedene Technologiefelder verteilen.<sup>149</sup>

In Abbildung B 1-1 werden die Schlüsseltechnologien gemäß dieser zwei Dimensionen angeordnet und untereinander verglichen.<sup>150</sup> Es zeigt sich eine heterogene Struktur. Während beispielsweise die Technologie Big Data von Unternehmen vieler

Abb. B 1-1 Entwicklungstätigkeiten und technologische Basis



Darstellung der 13 Einzeltechnologien anhand der Breite der Entwicklungstätigkeiten und der technologischen Basis.  
Lesebeispiel: Big Data hat mit einem Wert von 0,1 eine relativ große Breite der Entwicklungstätigkeit (entsprechende Technologien werden in vielen Branchen entwickelt). Big Data hat mit einem Wert von eins eine sehr spezifische technologische Basis.  
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Kroll et al. (2022).  
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2022.

Branchen weiterentwickelt wird, ist ihre technologische Basis vergleichsweise spezifisch. Mikroelektronik hingegen wird von Unternehmen aus nur wenigen Branchen entwickelt, bei einer technologischen Basis mittlerer Breite. Die Technologien Advanced Manufacturing und Neue Werkstoffe zeichnen sich sowohl durch eine vergleichsweise breite technologische Basis als auch Entwicklungstätigkeiten in vergleichsweise vielen Branchen aus.<sup>151</sup>

#### Indikatoren für einen internationalen Vergleich

Indikatoren aus den Bereichen Forschung (wissenschaftliche Publikationen) und Entwicklung (transnationale Patentanmeldungen), Handel (Handelsbilanzen und -spezialisierungen) und Standardsetzung (Mitarbeit in Normungsgremien) können die Position Deutschlands im internationalen Vergleich darstellen.<sup>152</sup> Anhand der Publikationen und Patentanmeldungen lässt sich der Grad der Beherrschung einer Schlüsseltechnologie abschätzen. Die Handelsbilanzen geben Auskunft über deren Verfügbarkeit. Aktivitäten bei der Standardsetzung

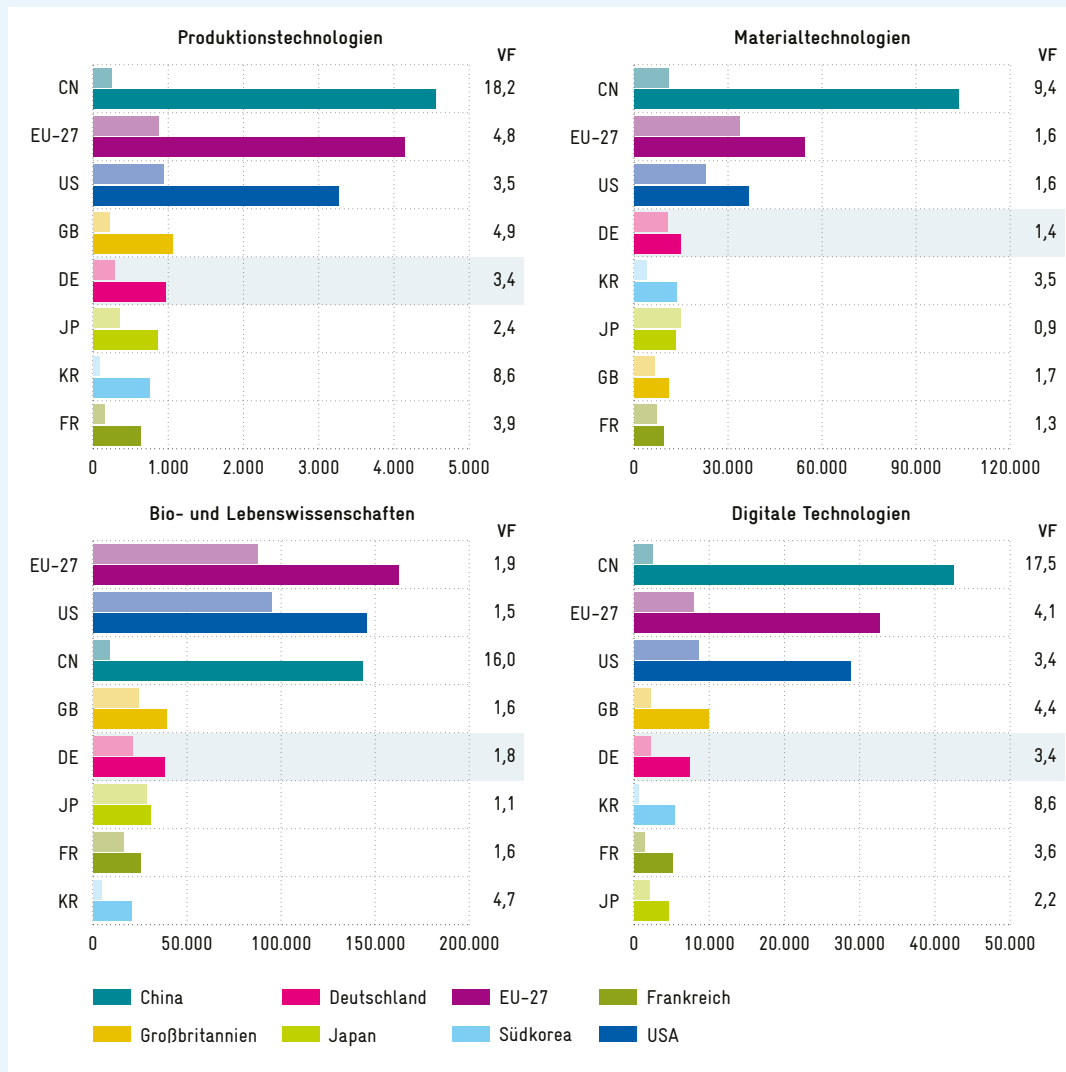
lassen Rückschlüsse sowohl auf die Beherrschung als auch die Verfügbarkeit von Schlüsseltechnologien zu.

#### Wissenschaftliche Publikationen: China besonders dynamisch

Um die Position zu bestimmen, die Deutschland im internationalen Vergleich bei der Forschung zu Schlüsseltechnologien einnimmt, werden wissenschaftliche Publikationen weltweit betrachtet, die von 2000 bis 2019 veröffentlicht wurden.<sup>153</sup> Da Veränderungen im Zeitverlauf und damit Positionsveränderungen von Interesse sind, wurden die Mittelwerte der ersten drei Jahre des Betrachtungszeitraums (2000–2002) und die der letzten drei Jahre (2017–2019) berechnet und miteinander verglichen. Der Veränderungsfaktor gibt an, wie sich die Publikationszahlen der letzten drei Jahre zu den Publikationszahlen der ersten drei Jahre verhalten.

Anhand der Differenz der Veränderungsfaktoren zwischen zwei Ländern lässt sich beurteilen, wie

**Abb. B 1-2 Mittelwert der Publikationen in den Schlüsseltechnologiebereichen für ausgewählte Länder und Regionen 2000–2002 und 2017–2019**



Der hellere Farbton zeigt die gemittelte Publikationsanzahl der Jahre 2000 bis 2002, der dunklere Farbton die der Jahre 2017 bis 2019. Die Sortierung und somit die Reihenfolge der Länder innerhalb eines jeden Schlüsseltechnologiebereichs folgt den Mittelwerten der Jahre 2017 bis 2019. Der Veränderungsfaktor (VF) gibt an, wie sich Publikationszahlen der letzten drei Jahre zu den Publikationszahlen der ersten drei Jahre verhalten. Ein Veränderungsfaktor kleiner als eins bedeutet einen Rückgang und ein Veränderungsfaktor größer als eins einen Anstieg der Publikationszahlen im betrachteten Zeitraum. Ein Veränderungsfaktor von eins bedeutet, dass sich die Publikationszahlen zwischen den Betrachtungszeiträumen nicht verändert haben.  
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Kroll et al. (2022).  
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2022.

sich der Abstand, in diesem Fall die wissenschaftliche Lücke, zwischen zwei Ländern entwickelt hat. Wenn beispielsweise ein Land bei den absoluten Publikationszahlen hinter einem anderen Land zurücklag, aber einen höheren Veränderungsfaktor aufwies, konnte das zurückliegende Land den wissenschaftlichen Abstand im Laufe der Zeit verringern oder möglicherweise sogar das zunächst führende Land überholen. Ist jedoch der Veränderungsfaktor des führenden Landes größer als der

des zurückliegenden Landes, dann hat sich der wissenschaftliche Abstand zwischen den beiden Ländern vergrößert.

Abbildung B 1-2 macht deutlich, dass China,<sup>154</sup> die USA und die EU-27 die Publikationsaktivitäten in allen vier Schlüsseltechnologiebereichen am aktuellen Rand dominieren. Der rasante Anstieg der Publikationsaktivitäten in China sticht hervor. Zwar haben auch Deutschland und andere Länder



ihr Publikationsaufkommen deutlich erhöht, keines jedoch in vergleichbarem Umfang. So konnte Deutschland im Bereich der Digitalen Technologien das Publikationsaufkommen um den Faktor 3,4 erhöhen, China jedoch um den Faktor 17,5. China ist es so in weniger als 20 Jahren gelungen, im Bereich der Digitalen Technologien, Materialtechnologien und Produktionstechnologien die USA und die EU-27 zu überholen sowie im Bereich der Bio- und Lebenswissenschaften aufzuschließen.<sup>155</sup>

Deutschland nimmt in allen Schlüsseltechnologiebereichen eine seiner Größe entsprechende Position im Mittelfeld ein. Hinsichtlich des Veränderungsfaktors liegt es im Allgemeinen gleichauf mit den europäischen Ländern und den USA. Im Vergleich zu Südkorea und China, die deutlich höhere Veränderungsfaktoren aufweisen, verschlechtert sich die anfänglich gute Position Deutschlands bzw. wandelt sich in eine Folgeposition. Eine starke Position an der Spitze ist für Deutschland nur im Verbund mit den übrigen EU-27-Ländern möglich.

Im Folgenden werden die sechs Einzeltechnologien im Bereich der Digitalen Technologien dargestellt. Diese Detailanalyse ist durch die besondere Rolle der Digitalen Technologien begründet. Sie wirken zunehmend in fast alle anderen Technologiebereiche hinein. Als treibende Kraft entfalten sie eine ausgeprägte Querschnittswirkung, sie stoßen in anderen Technologiebereichen Entwicklungsprozesse an oder beschleunigen diese.

Dem Veränderungsfaktor zufolge entwickelt sich die Publikationstätigkeit in Deutschland in allen Digitalen Einzeltechnologien ähnlich dynamisch (vgl. Abbildung B 1-3) wie in den anderen westlichen Vergleichsländern. Bei dieser Detailbetrachtung fällt erneut die starke Position Chinas auf, das in allen Digitalen Technologien, mit Ausnahme der Digitalen Sicherheit, die Führungsposition einnimmt.

#### Patentanmeldungen: Bild in Deutschland gemischt

Als Indikator für Neuerungen in der Anwendung von Schlüsseltechnologien können transnationale Patentanmeldungen<sup>156</sup> im Zeitraum von 2000 bis 2018 herangezogen werden.<sup>157</sup> Auch hier wurden die Mittelwerte der ersten drei Jahre des Betrachtungszeitraums (2000–2002) und die der letzten drei Jahre (2016–2018) berechnet und miteinander verglichen. Der Veränderungsfaktor gibt an,

wie sich die Patentzahlen der letzten drei Jahre zu den Patentzahlen der ersten drei Jahre verhalten. Analog zum Veränderungsfaktor bei Publikationen kann dieser in Ländervergleichen dazu herangezogen werden, um die Entwicklung der – da auf Patenten basierend – technologischen Lücken zu interpretieren.

Die Übersicht zeigt, dass insbesondere in den asiatischen Ländern (Japan, China, Südkorea) die Patentierungsaktivitäten stark zugenommen haben, während sie in einigen westlichen Ländern zurückgegangen sind (vgl. Abbildung B 1-4). Dies betrifft in Deutschland die Schlüsseltechnologiebereiche der Materialtechnologien sowie der Bio- und Lebenswissenschaften.

Deutschland liegt mit seinen Patentanmeldungen in den Schlüsseltechnologiebereichen Produktions- und Materialtechnologien sowie den Bio- und Lebenswissenschaften im Mittelfeld. Japan, die EU-27 sowie die USA führen die Liste an. China folgt auf Platz vier und weist auch hier eine sehr dynamische Entwicklung auf. Beim Veränderungsfaktor liegt Deutschland wiederum auf einem ähnlichen Niveau wie die anderen westlichen Länder; die deutlich höheren Faktoren bei China, Japan und Südkorea zeigen allerdings einen zunehmenden technologischen Rückstand Deutschlands auf. In den Produktionstechnologien und mit Abstrichen auch in den Bio- und Lebenswissenschaften steht Deutschland in dieser Hinsicht noch recht gut da.

Im Schlüsseltechnologiebereich der Digitalen Technologien haben sich China und Südkorea besonders dynamisch entwickelt. Es führen Japan und die USA gefolgt von China.

Bei der Detailbetrachtung der einzelnen Digitalen Technologien (vgl. Abbildung B 1-5) zeigt sich, dass die deutschen Patentanmeldungen in allen Einzeltechnologien bis auf die Mikroelektronik moderat gestiegen sind. In der Mikroelektronik gab es einen leichten Rückgang. Der Vergleich der Veränderungsfaktoren zeigt, dass Deutschland die technologische Führung gegenüber China, Südkorea und teilweise auch Japan verloren bzw. sich der Abstand zu diesen Ländern vergrößert hat. Auffällig ist in diesem Zusammenhang der Aufstieg Chinas. China ist in allen Einzeltechnologien – mit Ausnahme der Digitalen Mobilität – unter den ersten drei Plätzen zu finden, obwohl es im Vergleich zu den anderen Ländern die niedrigsten Ausgangswerte aufweist.

**Abb. B 1-3 Mittelwert der Publikationen in Digitalen Technologien für ausgewählte Länder und Regionen 2000-2002 und 2017-2019**

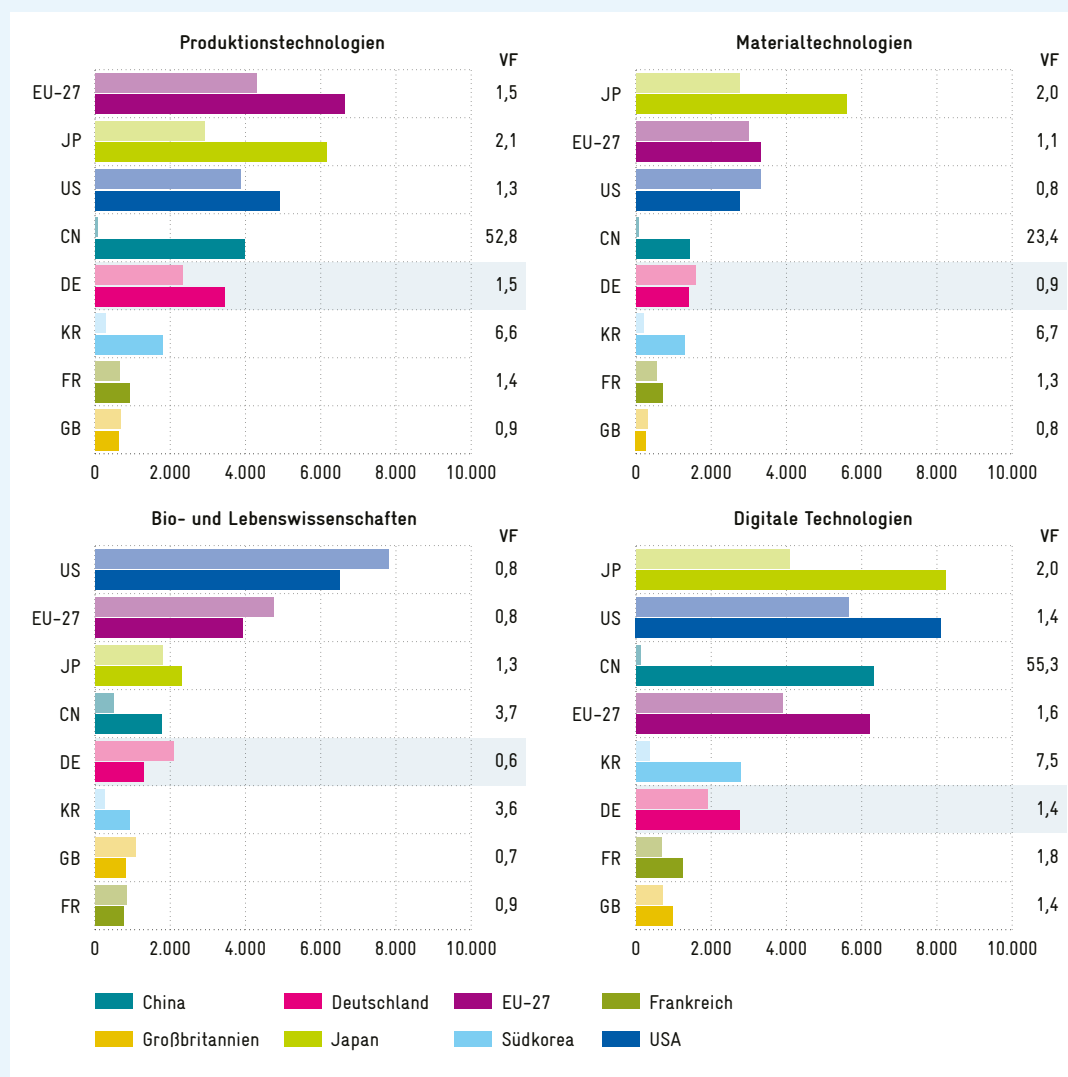


Der hellere Farbton zeigt die gemittelte Publikationsanzahl der Jahre 2000 bis 2002, der dunklere Farbton die der Jahre 2017 bis 2019. Die Sortierung und somit die Reihenfolge der Länder innerhalb einer jeden Einzeltechnologie folgt den Mittelwerten der Jahre 2017 bis 2019. Eine einzelne Publikation kann aus inhaltlichen Gründen mehreren Einzeltechnologien zugeordnet sein. Der Veränderungsfaktor (VF) gibt an, wie sich die Publikationszahlen der letzten drei Jahre zu den Publikationszahlen der ersten drei Jahre verhalten. Ein Veränderungsfaktor kleiner als eins bedeutet einen Rückgang und ein Veränderungsfaktor größer als eins einen Anstieg der Publikationszahlen im betrachteten Zeitraum. Ein Veränderungsfaktor von eins bedeutet, dass sich die Publikationszahlen zwischen den Betrachtungszeiträumen nicht verändert haben. \* werden verwendet, wenn der Veränderungsfaktor aufgrund eines geringfügigen Ausgangswerts extreme Werte annimmt.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Kroll et al. (2022).

© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2022.

**Abb. B 1-4 Mittelwert der transnationalen Patentanmeldungen in den Schlüsseltechnologiebereichen für ausgewählte Länder und Regionen 2000–2002 und 2016–2018**

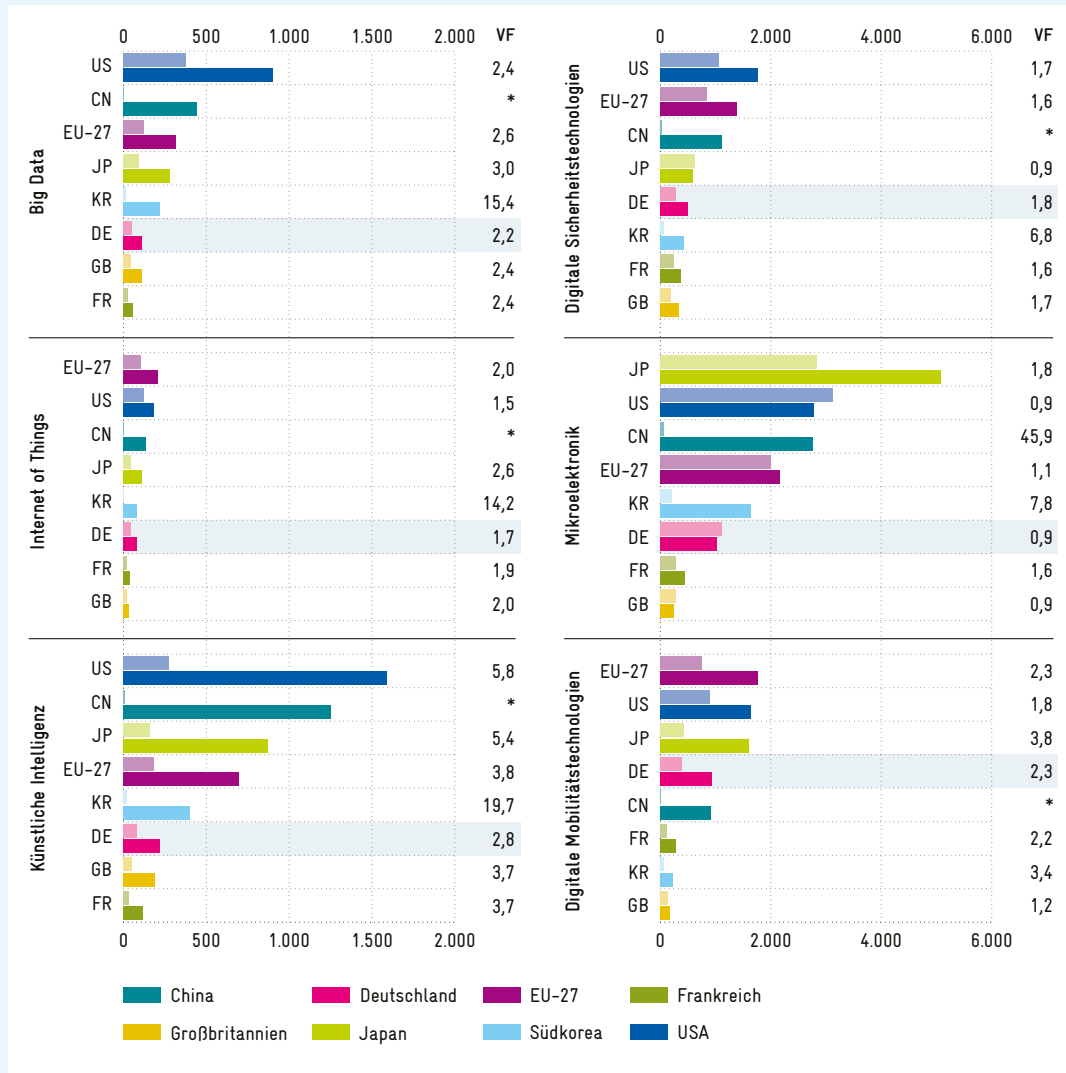


Der hellere Farbton zeigt die gemittelte Anzahl der Patentanmeldungen der Jahre 2000 bis 2002, der dunklere Farbton die der Jahre 2016 bis 2018. Die Sortierung und somit die Reihenfolge der Länder innerhalb eines jeden Schlüsseltechnologiebereichs folgt den Mittelwerten der Jahre 2016 bis 2018. Der Veränderungsfaktor (VF) gibt an, wie sich Patentanmeldungen der letzten drei Jahre zu den Patentanmeldungen der ersten drei Jahre verhalten. Ein Veränderungsfaktor kleiner als eins bedeutet einen Rückgang und ein Veränderungsfaktor größer als eins einen Anstieg der Patentanmeldungen im betrachteten Zeitraum. Ein Veränderungsfaktor von eins bedeutet, dass sich die Patentanmeldungen zwischen den Betrachtungszeiträumen nicht verändert haben.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Kroll et al. (2022).

© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2022.

**Abb. B 1-5 Mittelwert der transnationalen Patentanmeldungen in Digitalen Technologien für ausgewählte Länder und Regionen 2000–2002 und 2016–2018**

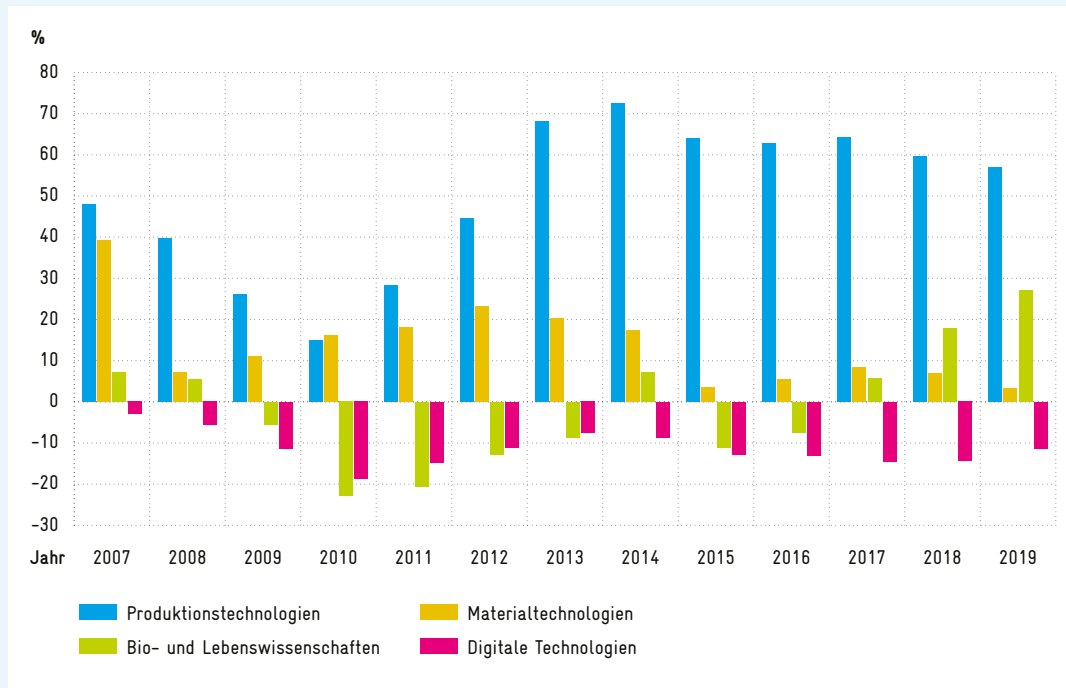


Der hellere Farbton zeigt die gemittelte Anzahl der Patentanmeldung der Jahre 2000 bis 2002, der dunklere Farbton die der Jahre 2016 bis 2018. Die Sortierung und somit die Reihenfolge der Länder innerhalb einer Einzeltechnologie folgt den Mittelwerten der Jahre 2016 bis 2018. Ein einzelnes Patent kann aus inhaltlichen Gründen mehreren Einzeltechnologien zugeordnet sein. Der Veränderungsfaktor (VF) gibt an, wie sich Patentanmeldungen der letzten drei Jahre zu den Patentanmeldungen der ersten drei Jahre verhalten. Ein Veränderungsfaktor kleiner als eins bedeutet einen Rückgang und ein Veränderungsfaktor größer als eins einen Anstieg der Patentanmeldungen im betrachteten Zeitraum. Ein Veränderungsfaktor von eins bedeutet, dass sich die Patentanmeldungen zwischen den Betrachtungszeiträumen nicht verändert haben. \* werden verwendet, wenn der Veränderungsfaktor aufgrund eines geringfügigen Ausgangswerts extreme Werte annimmt.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Kroll et al. (2022).

© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2022.

**Abb. B 1-6 Relative Handelsbilanz Deutschlands in den Schlüsseltechnologiebereichen 2007–2019 in Prozent**



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Kroll et al. (2022).  
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2022.

### Relative Handelsbilanz: Deutschland bei Digitalen Technologien schwach

Die Handelsbilanz gibt Einblicke in die Exportstärke einer Volkswirtschaft. Eine positive Handelsbilanz entsteht, wenn die Exporte die Importe übersteigen. In Abbildung B 1-6 wird die relative Handelsbilanz<sup>158</sup> definiert als der prozentuale Überschuss der Exporte über die Importe, für Deutschland von 2007 bis 2019 in den vier Schlüsseltechnologiebereichen dargestellt.<sup>159</sup>

Dieser Indikator zeigt, dass Deutschland in den Schlüsseltechnologiebereichen der Produktionstechnologien und Materialtechnologien über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg eine relative Exportstärke aufweist, also ein Nettoexporteur ist. Diese relative Exportstärke ist bei Produktionstechnologien am stärksten ausgeprägt. Im Schlüsseltechnologiebereich der Bio- und Lebenswissenschaften liegt die relative Handelsbilanz im Beobachtungszeitraum zeitweise im negativen und zeitweise im positiven Bereich, ist aber seit 2017 klar positiv. Im Bereich der Digitalen Technologien hat Deutschland im gesamten Betrachtungszeit-

raum eine negative relative Handelsbilanz, ist also Nettoimporteur.

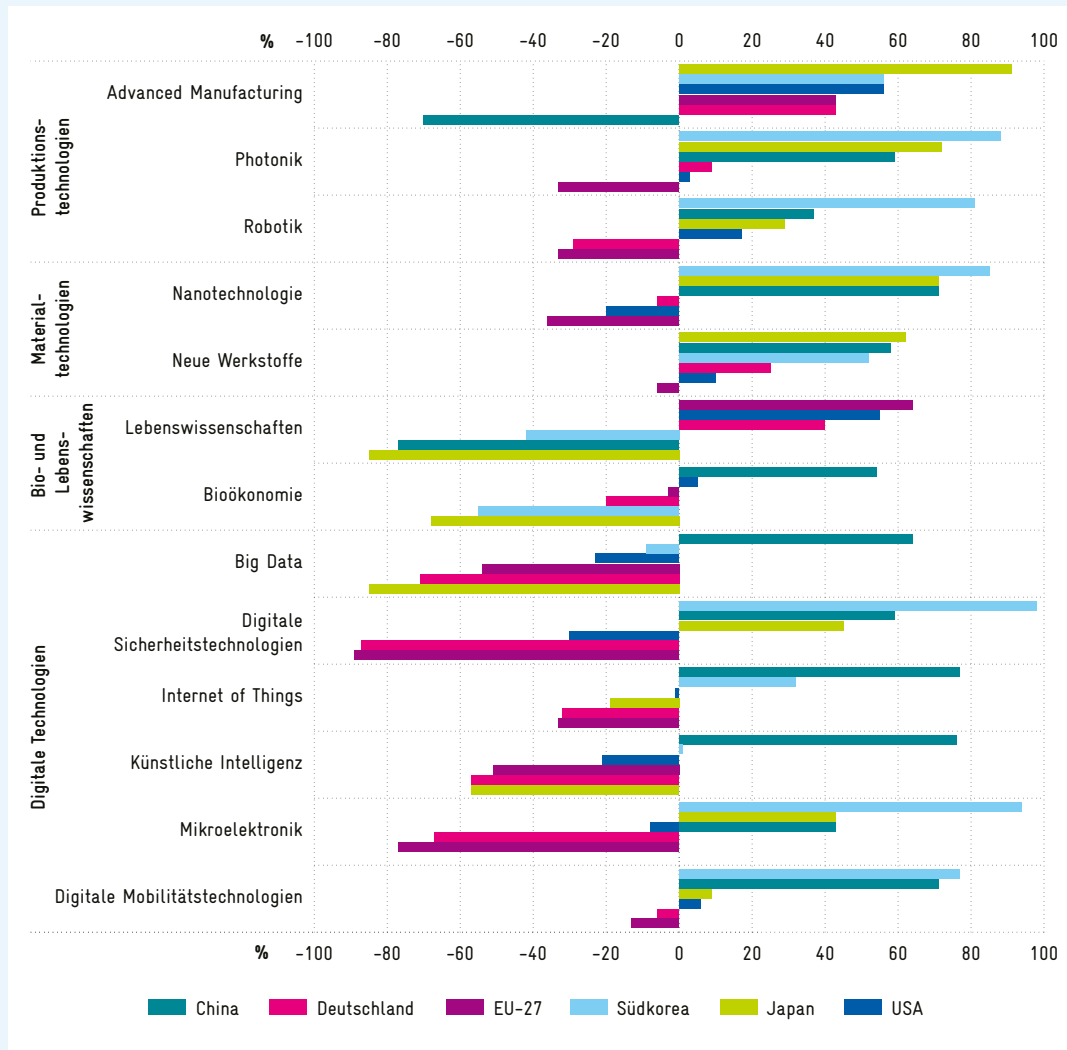
### Handelsspezialisierung: Deutschland und EU-27 mit Schwächen

Die Handelsspezialisierung einer Volkswirtschaft und ihre Position im internationalen Vergleich lassen sich anhand des offenbarten komparativen Vorteils (engl. Revealed Comparative Advantage, RCA) beschreiben. Hier beschreibt der RCA den Exportanteil einer Schlüsseltechnologie in einem Land im Verhältnis zum Anteil dieser Schlüsseltechnologie auf dem Weltmarkt.<sup>160</sup> Ist der RCA positiv, hat das Land einen komparativen Handelsvorteil in der jeweiligen Schlüsseltechnologie. Ist der RCA hingegen negativ, deutet dies auf einen komparativen Handelsnachteil hin.

In den Schlüsseltechnologiebereichen Produktionstechnologien, Materialtechnologien und den Technologien der Bio- und Lebenswissenschaften weist Deutschland sowohl komparative Handelsvorteile als auch -nachteile auf (vgl. Abbildung B 1-7). Deutschlands Handelsvorteile liegen in den Einzel-



**Abb. B 1-7 Mittelwert des offenbaren komparativen Vorteils in den Einzeltechnologien für ausgewählte Länder und Regionen 2016–2018 in Prozent**



Ein positiver Wert weist auf einen komparativen Vorteil, ein negativer Wert auf einen komparativen Nachteil hin.  
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Kroll et al. (2022).  
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2022.

technologien Photonik, Advanced Manufacturing, Neue Werkstoffe sowie in den Lebenswissenschaften. Handelsnachteile lassen sich für Deutschland in der Robotik, Bioökonomie und Nanotechnologie, vor allem aber im gesamten Bereich der Digitalen Technologien nachweisen. Besonders ausgeprägt sind die komparativen Nachteile in den Einzeltechnologien Digitale Sicherheit, Big Data, Mikroelektronik sowie künstliche Intelligenz.

Die EU-27 zeigt ähnliche komparative Vor- und Nachteile wie Deutschland. Dies gilt insbesondere für den Bereich der Digitalen Technologien, in dem die EU-27 durchweg komparative Nachteile auf-

weist. Demgegenüber verzeichnet China in allen Digitalen Technologien ausgeprägte komparative Handelsvorteile, die von Südkorea in der Mikroelektronik, Digitalen Sicherheit und Digitalen Mobilität sogar noch übertroffen werden.

#### Wichtigste Herkunftsländer deutscher Importe: China dominierend

Ein Indikator für die unmittelbare Abhängigkeit Deutschlands bei einer Schlüsseltechnologie von einem anderen Land ist der Importanteil. Dieser gibt an, wie viel Prozent der deutschen Importe einer Schlüsseltechnologie aus einem anderen Land

kommen. Ein hoher Wert deutet auf eine mögliche Abhängigkeit hin.<sup>161</sup>

Die Analyse der Importanteile für die Jahre 2015 bis 2019 zeigt, dass China in neun der 13 Einzeltechnologien die Rangliste der wichtigsten Herkunftsländer deutscher Importe anführt. Die hohe Bedeutung chinesischer Importe zeigt sich insbesondere im Bereich der Digitalen Technologien, da China in fünf von sechs Einzeltechnologien das wichtigste Herkunftsländ ist. Die europäischen Länder spielen als Herkunftsländer deutscher Importe im Vergleich zu China eine nachgeordnete Rolle – außer in der Einzeltechnologie Lebenswissenschaften.<sup>162</sup>

### Standardsetzung: Digitale Technologien in Deutschland vernachlässigt

Globale und europäische technologische Standards sind für die Entwicklung und die Verbreitung von Schlüsseltechnologien ein zentraler Faktor. In internationalen Standardisierungskomitees diskutieren und vereinbaren Vertreter aus Wissenschaft und Wirtschaft diese Standards.

Anders als Deutschland und viele westliche Staaten belässt China die Setzung von Standards nicht in der Eigenverantwortung der betroffenen Unternehmen und Organisationen, sondern setzt auf ein zentralisiertes und kontrolliertes staatliches Vorgehen.<sup>163</sup> China hat in den vergangenen Jahren sein Engagement in den Standardisierungsorganisationen massiv ausgebaut. Hingegen scheint es deutschen Unternehmen und Organisationen nicht zu gelingen, sich maßgeblich in Foren für die Aushandlung zukünftiger Standards im besonders dynamischen Schlüsseltechnologiebereich der Digitalen Technologien einzubringen.<sup>164</sup>

### Kooperationen mit asiatischen Ländern unzureichend

Eine Analyse der wissenschaftlich-technologischen Kooperationsmuster Deutschlands mit anderen Ländern zeigt, dass diese noch immer die Strukturen der 1980er- und 1990er-Jahre widerspiegeln. Während bei deutschen Wissenschaftsorganisationen und Unternehmen enge Kooperationsstrukturen mit europäischen und nordamerikanischen Partnerländern bestehen, die sich in ausgeprägten Ko-Publikations- und Ko-Patentierungsaktivitäten niederschlagen, sind vergleichbare Verbindungen zu den technologisch führenden Unternehmen und

Organisationen in den asiatischen Ländern nicht aufgebaut worden.<sup>165</sup>

Dieses Manko könnte im Falle Japans und Südkoreas mit der traditionell geringen internationalen Kooperationsneigung der dortigen Unternehmenssektoren zusammenhängen.<sup>166</sup> Im Falle Chinas ist der Grund dafür außerdem in der zunehmenden staatlichen Steuerung und Kontrolle des Wissenschafts- und Wirtschaftssektors zu sehen sowie in den ungleichen Wettbewerbs- und Kooperationsbedingungen (Unlevel Playing Field) für deutsche und chinesische Akteure.<sup>167</sup> Zudem trägt das wachsende systemische Konkurrenzverhältnis zwischen der westlichen Welt und China dazu bei, dass deutsche Organisationen langfristig angelegte Kooperationen mit China als risikobehaftet wahrnehmen.<sup>168</sup> Es besteht die Gefahr, dass die Verfügbarkeit von Schlüsseltechnologien und damit verbundenem Wissen hierdurch zunehmend eingeschränkt wird.

## B 1-3 Förderung von Schlüsseltechnologien als politische Aufgabe

Die Gefahr, dass eine Volkswirtschaft im internationalen Wettbewerb bei Schlüsseltechnologien ins Hintertreffen gerät und damit Einbußen bei der Wohlstands- und Wohlfahrtsentwicklung sowie ihrer Eigenständigkeit hinnehmen muss, führt dazu, dass die Themen Schlüsseltechnologien und technologische Souveränität in vielen Ländern weit oben auf die politische Agenda gesetzt werden.

### Maßnahmen zur Sicherung technologischer Souveränität

Aus den konzeptionellen Überlegungen in Abschnitt B 1-1 lassen sich politische Ansätze ableiten, die prinzipiell mit den folgenden vorgestellten F&I-politischen Maßnahmen adressiert werden können. Diese Maßnahmen werden in unterschiedlicher Kombination und Intensität in der politischen Praxis eingesetzt.

Mit Blick auf die Beherrschung von Schlüsseltechnologien helfen mittel- und langfristig Maßnahmen zum Aufbau von Wissen und Fähigkeiten im Bereich der Schlüsseltechnologien. Hier ist an die Förderung von Wissenschaft und Forschung, Aus- und Weiterbildung sowie akademische Bildung zu denken. Darüber hinaus sollten der Wissens- und Technologietransfer in die Wirtschaft und Gesell-

schaft sowie schlüsseltechnologiespezifische Innovationsaktivitäten gefördert werden.

Industrie- und außenhandelspolitische Maßnahmen können darüber hinaus kurzfristig dafür sorgen, dass die Generierung, die Weiterentwicklung und vor allem die Produktion von Schlüsseltechnologien in einer Volkswirtschaft verbleiben. Subventionen für ausgewählte Schlüsseltechnologien, protektionistische Maßnahmen beim Import von Schlüsseltechnologien oder Maßnahmen zur Exportförderung können dazu beitragen, das Problem der mangelnden Verfügbarkeit und der unzureichenden Beherrschung einer Schlüsseltechnologie zu reduzieren. Maßnahmen dieser Art können bewirken, dass Schlüsseltechnologien im Inland produziert und weiterentwickelt werden (Verfügbarkeit erhöhen) und dass dabei Lerneffekte generiert und genutzt werden können (Beherrschung verbessern).

Der Einsatz industriepolitischer Maßnahmen sollte zeitlich beschränkt sein und frühzeitig erfolgen, wenn eine Schlüsseltechnologie noch jung ist und die Ausschöpfung ihrer technologischen und ökonomischen Potenziale noch am Anfang steht. Gerade in der Frühphase einer neuen Schlüsseltechnologie ist die Gefahr, den Anschluss an die internationale Entwicklung zu verlieren, besonders groß. Hier greift das Argument der Infant Industry Protection oder der Infant Technology Protection. Es besagt, dass neue Industrien oder Technologien so lange vor dem internationalen Wettbewerb zu schützen sind, bis sie reif und stark genug sind, sich diesem Wettbewerb zu stellen.

Die industriepolitische Förderung kann auch so gestaltet werden, dass F&I-Aktivitäten nicht in der gesamten Breite einer Schlüsseltechnologie unterstützt werden, sondern nur in ausgewählten Teilbereichen der Technologie. Dies würde auf eine Struktur intratechnologischer Spezialisierung hinauslaufen, in der mehrere Volkswirtschaften in einer bestimmten Schlüsseltechnologie führend sind, aber jeweils in verschiedenen Teilbereichen oder Nischen. Durch internationalen Handel würden sich die Volkswirtschaften gegenseitig ergänzen.

Auf diese Weise könnten ungleiche Kräfteverhältnisse in Konfliktsituationen ausgeglichen werden. Sollte ein Handelspartner versuchen, seine Position der Stärke in einer Weise zu nutzen, die die technologische Souveränität anderer Volkswirtschaften einschränkt, könnten diese ihrerseits vorhandene

Stärken in (komplementären) technologischen Teilbereichen als Gegendruckmittel einsetzen.

### Deutschland: Technologische Souveränität durch eigene Kompetenzen

In Deutschland ist die Debatte um die Beherrschung und Verfügbarkeit von Schlüsseltechnologien zur Absicherung technologischer Souveränität vergleichsweise jung. Die Coronapandemie und die von ihr verursachte Unterbrechung von Wertschöpfungsketten hat den Blick verstärkt auf die eingeschränkte Verfügbarkeit technologischer Komponenten gelenkt. Vor diesem Hintergrund wird nun auch hierzulande verstärkt diskutiert, wie unabhängig Deutschland und die EU in Bezug auf bestimmte Technologien sein müssen.<sup>169</sup> Die Einsetzung eines Rates für technologische Souveränität im September 2021 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) illustriert die gestiegene Bedeutung des Themas innerhalb der Politik.<sup>170</sup>

Nach den Vorstellungen des BMBF soll die Sicherung technologischer Souveränität primär mittels des Aufbaus und der Stärkung eigener wissenschaftlich-technologischer Kompetenzen geschehen.<sup>171</sup> Durch die Stärkung des deutschen F&I-Systems im Verbund mit den europäischen Partnern soll sichergestellt werden, dass Wissenschaft und Wirtschaft in der Lage sind, „die Entwicklung und Anwendung von Schlüsseltechnologien international auf Augenhöhe und im Sinne unserer Werte mitzugestalten“.<sup>172</sup>

Erst seit Kurzem werden auch industriepolitische Eingriffe in den Marktmechanismus in die Diskussion gebracht. So formuliert das BMBF in seinem Impulspapier zur technologischen Souveränität, dass es erforderlich sein kann, „Schlüsseltechnologien und 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“.<sup>173</sup> Das BMBF bewegt sich dabei in die Richtung, die das damalige Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) bereits zuvor mit seiner Industriestrategie 2030 sowie der Verschärfung der Investitionskontrolle<sup>174</sup> eingeschlagen hat.<sup>175</sup>

Zur Stärkung der wissenschaftlich-technologischen Kompetenzen hat die Bundesregierung in den letzten Jahren verschiedene Strategien zur Förderung von Technologien, darunter auch Schlüsseltechno-

logien, formuliert und verfolgt.<sup>176</sup> Auch in der High-tech-Strategie 2025 wird die Förderung insbesondere von Schlüsseltechnologien durch den Aufbau von wissenschaftlich-technologischen Fähigkeiten in den Blick genommen.<sup>177</sup> Über die eigenen nationalen Initiativen hinaus ist die Bundesregierung auch auf Ebene der EU aktiv, um ausgewählte Schlüsseltechnologien zu fördern und um damit die technologische Souveränität Deutschlands und Europas im Sinne eines Kompetenzerhalts zu sichern.<sup>178</sup>

### Europäische Union: Technologische Souveränität durch Förderung

Die industriepolitische Förderung von Schlüsseltechnologien, bzw. Key Enabling Technologies (KETs), wurde von der EU bereits 2009 in den Blick genommen.<sup>179</sup> Dabei stand zunächst die Stärkung der industriellen Fertigung im Fokus, erst danach kam die Zieldimension der Technologiesouveränität hinzu.<sup>180</sup> Prominente Beispiele für die Förderung von Schlüsseltechnologien und die wachsende Bedeutung technologischer Souveränität innerhalb des europäischen Förderportfolios sind die Europäischen Partnerschaftsinitiativen<sup>181</sup> sowie die Important Projects of Common European Interest (IPCEI).<sup>182</sup> Bisher wurden drei IPCEI-Initiativen, zur Förderung der Mikroelektronik, zur Entwicklung und Produktion von Batteriezellen sowie zur Produktion von Wasserstoff, gestartet.<sup>183</sup> Weitere Projekte sind geplant.

Die 2020 vorgestellte und bereits ein Jahr später erneuerte Europäische Industriestrategie zielt u. a. auf eine „Stärkung der offenen strategischen Autonomie Europas“<sup>184</sup> ab und soll die Voraussetzung für Investitionen in Schlüsseltechnologien schaffen.<sup>185</sup> Im Rahmen dieser Aktualisierung präsentierte die EU-Kommission auch ein Instrument zur Überwachung strategischer Abhängigkeit der EU von außereuropäischen Produkten und Technologien<sup>186</sup> sowie eine Überarbeitung ihres Wettbewerbsrechts, mit der die wettbewerbsverzerrenden Effekte von ausländischen Subventionen auf den europäischen Binnenmarkt bekämpft werden sollen.<sup>187</sup> Darüber hinaus kündigte die Kommission eine europäische Standardisierungsstrategie an, um europäische Interessen bei der Standardisierung innerhalb und außerhalb der EU zu wahren.<sup>188</sup> Die Maßnahmen machen deutlich, dass sowohl die Frage der Beherrschung als auch die Frage nach der Verfügbarkeit von Schlüsseltechnologien für die EU von zunehmender Bedeutung sind.

### China: Technologische Souveränität durch offene Industriepolitik

Das chinesische Verständnis von technologischer Souveränität ist stark durch das Ziel der Beherrschung und Verfügbarkeit geprägt. China möchte mit seiner Industriepolitik nicht nur weltweit führend in einer großen Anzahl von Technologien sein, darunter auch Schlüsseltechnologien, sondern ganze Wertschöpfungsketten dominieren und ausländische Technologieanbieter sukzessive durch inländische ersetzen.<sup>189</sup>

Der chinesische Staat fördert langfristig die Entwicklung zahlreicher Schlüsseltechnologien mit massiven Investitionen<sup>190</sup> und forciert das Engagement chinesischer Organisationen in den internationalen Standardisierungsgremien.<sup>191</sup> Der Staat nimmt zudem nicht nur eine zentrale lenkende, rahmensetzende und unterstützende Funktion ein. Als Quasiunternehmer und Kapitalgeber ist er selbst maßgeblich an der Umsetzung der eigenen technisch-ökonomischen Vorgaben beteiligt.<sup>192</sup>

Darüber hinaus forciert der Staat den industriellen Kapazitäts- und Kompetenzaufbau im Inland und beschränkt den Zugang zu heimischen Märkten für ausländische Wettbewerber. Ein Beispiel ist das Cybersicherheitsgesetz von 2017 oder das Exportkontrollgesetz von 2020.<sup>193</sup>

### USA: Technologische Souveränität durch verdeckte Industriepolitik

Für die USA ist ihr globaler politischer Führungsanspruch eng mit einem technologischen Führungsanspruch verbunden. Um eine Führungsposition in möglichst vielen Schlüsseltechnologien durchzusetzen, betreiben die USA – im Unterschied zu China – eine eher verdeckte Industriepolitik.<sup>194</sup> Dazu wird die Entwicklung und Anwendung ausgewählter Schlüsseltechnologien langfristig durch Formulierung günstiger Rahmenbedingungen sowie gezielte Förderprogramme unterstützt. Beispiele für diese Förderprogramme sind die nationalen Initiativen zu KI, Nanotechnologie und Robotik sowie zu Advanced Manufacturing.<sup>195</sup>

Darüber hinaus sind insbesondere seit der globalen Finanz- und Wirtschaftskrise 2008/09 in der US-amerikanischen Industriepolitik staatliche Interventionen und Ansätze expliziter Industriepolitik zunehmend populär geworden.<sup>196</sup> Auch unter der

Biden-Regierung ist eine Industrie- und Handelspolitik zu beobachten, die den Zugang Chinas zum US-Markt reguliert sowie den Export und internationalen Technologietransfer beschränkt.<sup>197</sup> Die USA verfolgen somit den Ansatz, nicht nur die Beherrschung von Schlüsseltechnologien zu fördern, sondern ihre dominierende Stellung in einzelnen Technologien auch durch eine Beschränkung der Verfügbarkeit von Schlüsseltechnologien für konkurrierende Staaten zu sichern.

## B 1-4 Handlungsempfehlungen

Bei Publikationen, Patenten und im Außenhandel zeigt Deutschland im internationalen Vergleich Stärken in den Schlüsseltechnologiebereichen der Produktionstechnologien sowie der Bio- und Lebenswissenschaften. Im Bereich der Digitalen Technologien hingegen weist Deutschland, wie auch die EU-27, deutliche Schwächen auf. Damit verlieren sie nicht nur den Anschluss in einem ökonomisch immer bedeutsamer werdenden Technologiebereich, sondern gefährden auch ihre bestehenden Stärken in anderen Schlüsseltechnologiebereichen wie beispielsweise den Produktionstechnologien sowie den Bio- und Lebenswissenschaften, die zunehmend von Digitalen Technologien durchdrungen werden. Dieses Problem wird dadurch verschärft, dass Deutschland insbesondere in den Digitalen Technologien von Importen aus China abhängig ist.

### Monitoring und Beratungsgremium für Schlüsseltechnologien etablieren

Anders als in China und in den USA steht die strategische Förderung von Schlüsseltechnologien in Deutschland erst am Anfang. Der Fokus der deutschen Förderbemühungen ist dabei auf den Aufbau von Wissen gerichtet. Ein strategisches Monitoring von Schlüsseltechnologien sowie ein konzertierter Aufbau von Kapazitäten für die Entwicklung und Nutzung von Schlüsseltechnologien im vormarktlischen und marktlichen Bereich finden bislang kaum statt. Daher empfiehlt die Expertenkommission die folgenden Maßnahmen:

- Schlüsseltechnologien und darauf aufbauende Schlüsseltechnologieportfolios müssen anhand klarer und operationalisierbarer Kriterien definiert werden, um sicherzustellen, dass ihre Auswahl nicht von durchsetzungsstarken Einzelinteressen bestimmt wird.

- Schlüsseltechnologien sollten durch kontinuierliche Foresight-Analysen und Monitoring-Prozesse systematisch beobachtet werden. Hierzu sollte die Bundesregierung eine möglichst europäisch besetzte Beobachtungseinheit einrichten, die sich aus mehreren unabhängigen Forschungseinrichtungen zusammensetzt. Ziel dieser Monitoring-Prozesse muss es sein, aktuelle, neu aufkommende und potenzielle Schlüsseltechnologien zu erfassen und hinsichtlich ihrer technologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Potenziale zu bewerten.

- Zusätzlich sollte die Bundesregierung ein unabhängiges strategisches Beratungsgremium für Schlüsseltechnologien einrichten. Dieses Gremium hat die Aufgabe, die Informationen der europäisch besetzten Beobachtungseinheit auszuwerten und zu einem kontinuierlich aktualisierten Schlüsseltechnologieportfolio zusammenzustellen. Darüber hinaus sollte das Gremium in regelmäßigen Abständen Handlungsempfehlungen zum Umgang mit ausgewählten Schlüsseltechnologien für die Bundesregierung formulieren.

### Förderung europäisch denken und Markteingriffe katalytisch gestalten

Die EU-27 und Deutschland drohen perspektivisch die Fähigkeiten zur Beherrschung wichtiger digitaler Schlüsseltechnologien zu verlieren. Ebenso bestehen Risiken hinsichtlich der Verfügbarkeit dieser Technologien auf internationalen Märkten. Dies kann zu massiven Einschränkungen der technologischen Souveränität nicht nur im Bereich der Digitalen Technologien führen, sondern auch in den anderen Schlüsseltechnologiebereichen, deren Entwicklung zunehmend von Digitalen Technologien abhängt und von diesen angetrieben wird.

- In Schlüsseltechnologiebereichen, in denen sich Technologiesprünge abzeichnen, sollten nicht nur Beiträge zur Grundlagenforschung, sondern auch zu anwendungsorientierten Pilotprojekten gefördert werden. Es gilt, den begleitenden Aufbau entsprechender Kompetenzen in der akademischen Bildung sowie in der Aus- und Weiterbildung frühzeitig einzuleiten.
- Als Reaktion auf Veränderungen im Welt-handelssystem und das zunehmend unter



Druck geratene Ideal gleicher Wettbewerbsbedingungen (Level Playing Field) sollte die Bundesregierung ihre Förderung im Bereich der Schlüsseltechnologien nicht nur auf den vormarktlchen Bereich ausrichten. Zur Förderung potenzieller Schlüsseltechnologien (Infant Technologies) können auch im marktlichen Bereich subventionierende Eingriffe vorgenommen werden, sofern diese einen katalytischen Charakter haben, d.h. eine Anstoßwirkung entfalten und dann wieder zurückgenommen werden.

- Zur Stärkung von Schlüsseltechnologien und der eigenen technologischen Souveränität müssen Deutschland und die EU stärker gemeinsam vorgehen, um eine kritische Masse an Kapazitäten und Aktivitäten zu erreichen.
- Deutschland sollte sich in bestehende europäische Programme wie z. B. die IPCEI-Initiativen verstärkt einbringen und durch Ko-Finanzierung und inhaltliche Beiträge Akzente setzen.
- In Anbetracht der hohen Bedeutung der Digitalen Technologien – insbesondere auch für die Entwicklung anderer Schlüsseltechnologien – sollten gezielt Lösungen für neue Anwendungszusammenhänge an der Schnittfläche von digitalen und anderen Schlüsseltechnologien gefördert werden.

#### Engagement in Standardisierungskomitees erhöhen

Das deutsche Engagement in den Standardisierungskomitees – insbesondere für Digitale Technologien – ist gering.

- Entsprechende Anreize, in den internationalen Standardisierungskomitees mitzuwirken, sollten gesetzt werden. Die entstehenden Kosten, die Unternehmen im Zusammenhang mit Standardisierungsvorhaben entstehen, könnten über die Forschungszulage bezuschusst werden.
- Unternehmen und Wissenschaftseinrichtungen sollten verstärkt für das Thema Standardisierung sensibilisiert werden.

#### Rahmenbedingungen für Kooperationen mit asiatischen Partnern verbessern

Die wissenschaftlich-technischen Kooperationen deutscher Organisationen konzentrieren sich bislang überwiegend auf europäische und US-amerikanische Partner; geeignete Rahmenbedingungen können die Möglichkeiten der Zusammenarbeit mit ost- und südostasiatischen Ländern unterstützen, die insbesondere in Digitalen Technologien stark sind.

- Die Bundesregierung sollte die Rahmenbedingungen für Kooperationen mit asiatischen Partnern, vor allem in den Digitalen Technologien, verbessern. Dafür sollte eine Kompetenzstelle, wie sie von der Expertenkommission bereits 2020 vorgeschlagen wurde, Informationen über Erfahrungen und Probleme bei Kooperationsprojekten systematisch sammeln, auswerten und Forschungseinrichtungen sowie Unternehmen zur Verfügung stellen. Darüber hinaus muss ein Level Playing Field mit gleichen Wettbewerbsbedingungen und Handlungsvoraussetzungen für alle beteiligten Akteure hergestellt werden.