

Kroll, Henning et al.

Research Report

Schlüsseltechnologien

Studien zum deutschen Innovationssystem, No. 7-2022

Provided in Cooperation with:

Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI)

Suggested Citation: Kroll, Henning et al. (2022) : Schlüsseltechnologien, Studien zum deutschen Innovationssystem, No. 7-2022, Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI), Berlin

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/251361>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

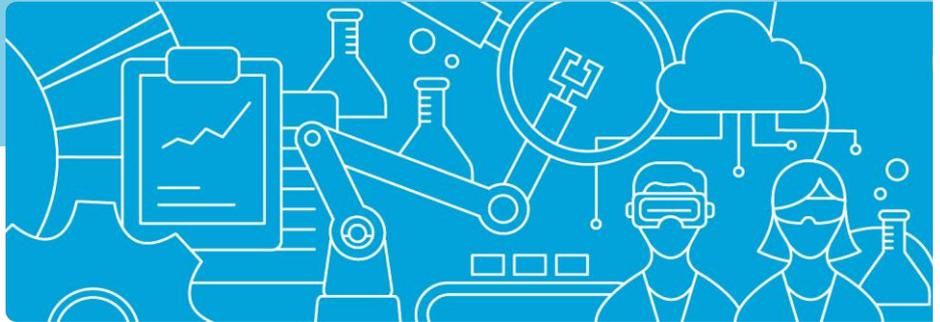
Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Studie zum deutschen Innovationssystem | Nr. 7-2022



Henning Kroll, Hendrik Berghäuser, Knut Blind, Peter Neuhäusler, Fabian Scheifele,
Axel Thielmann, Sven Wydra

Schlüsseltechnologien



Diese Studie wurde im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) erstellt. Die Ergebnisse und Interpretationen liegen in der alleinigen Verantwortung der durchführenden Institute. Die EFI hat auf die Abfassung des Berichts keinen Einfluss genommen.

Durchführendes Institut

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
www.isi.fraunhofer.de

Studien zum deutschen Innovationssystem

Nr. 7-2022
ISSN 1613-4338

Stand

Februar 2022

Herausgeberin

Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI)

Geschäftsstelle

Pariser Platz 6 | 10117 Berlin
www.e-fi.de

Alle Rechte vorbehalten, insbesondere das Recht auf Vervielfältigung und Verbreitung sowie die Übersetzung. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung der EFI oder der Institute reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Kontakt und weitere Informationen

Dr. Henning Kroll
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Competence Center Innovations- und Wissensökonomie
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
T + 49 (0) 721 6809 181
M henning.kroll@isi.fraunhofer.de

Inhalt

0	Summary	1
1	Konzeptionelle Identifizierung von Schlüsseltechnologien.....	11
2	Validierung des Schlüsseltechnologiecharakters ausgewählter Technologiebereiche	20
3	Bewertung der Position Deutschlands hinsichtlich Forschung und Entwicklung im Bereich ausgewählter Schlüsseltechnologien.....	34
4	Bewertung der Position Deutschlands in relevanten Feldern des Außenhandels	59
5	Bewertung der Position Deutschlands in der Standardisierung im Bereich ausgewählter Schlüsseltechnologien	62
6	Wissenschaftlich-technologische Kooperationen Deutschlands im Bereich ausgewählter Schlüsseltechnologien	68
7	Konzepte zur FuI politischen Begleitung und Entwicklung von Schlüsseltechnologien	75
7.1	Faktoren, die die Entwicklung und Adaption von Technologien behindern und so politische Interventionen begründen.....	75
7.2	Internationaler Vergleich von FuI-Politik, Industriepolitik und Protektionismus: Europäische Union / USA / China.....	83
8	Schlussfolgerungen	103
9	Empfehlungen	106
	Anhang I - Technologieabgrenzungen.....	110
	Anhang II - Methoden.....	111
	Anhang III - Detaillierte Ergebnisse, Publikations-, Patentanalysen	119
	Anhang IV - Detaillierte Ergebnisse, Handelsanalysen	155
	Anhang V - Detaillierte Ergebnisse, Standardisierung.....	168
	Literatur	183

Abbildungen

Abbildung 1:	Kriterien und ausgewählte Schlüsseltechnologien in konzeptionellen und politischen Ansätzen.....	18
Abbildung 2:	Ausgewählte Schlüsseltechnologien in bisherigen Monitorings sowie der vorliegenden Studie	19
Abbildung 3:	Spezifität und Branchenfokus der Technologiebereiche (2018)	23
Abbildung 4:	Gewicht und Wachstumsdynamik einzelner Felder (Publikationen)..	26
Abbildung 5:	Gewicht und Wachstumsdynamik einzelner Felder (Patente)	27
Abbildung 6:	Globales Exportwachstum in den 13 Einzeltechnologien.....	29
Abbildung 7:	Globale Exportentwicklung in den 13 Einzeltechnologien (2007 = 1)..	29
Abbildung 8:	Übersicht über verschiedene Typen von Schlüsseltechnologien und ihren politischen Begründungszusammenhang.....	33
Abbildung 9:	Anteile Deutschlands am Weltpublikationsaufkommen in den vier Schlüsseltechnologiebereichen in %	37
Abbildung 10:	Anteile Deutschlands am Weltpatentaufkommen in den vier Schlüsseltechnologiebereichen in %	37
Abbildung 11:	Anteile Deutschlands am globalen Export in den vier Schlüsseltechnologiebereichen in %	37
Abbildung 12:	Spezialisierung relevanter Länder 2010-2012	45
Abbildung 13:	Spezialisierung relevanter Länder 2016-2018	45
Abbildung 14:	Exportmarktanteile in den 4 Technologiebereichen	51
Abbildung 15:	Exporte im Bereich Mikro- und Nanoelektronik (in Mrd. USD).....	51
Abbildung 16:	Handelsüberschuss bzw.- Defizit in % nach Technologiebereichen ..	54
Abbildung 17:	Deutschlands Anteile am globalen Export	54
Abbildung 18:	Anteile der vier Technologiebereiche an Deutschlands Exporten	55
Abbildung 19:	Komparative Vorteile in den 13 Einzeltechnologien	56
Abbildung 20:	Ökonomischer Komplexitätsindex und KET Exportanteil	58
Abbildung 21:	Importkonzentration in den vier Schlüsseltechnologiebereichen	60
Abbildung 22:	Innovationshemmnisse in Unternationen, ZEW Befragung	80

Tabellen

Tabelle 1:	Wichtigste Herkunftsländer deutscher Importe im Bereich der Schlüsseltechnologien	61
Tabelle 2:	Kopublikationsanteile 2017-19 (mit Deutschland)	70
Tabelle 3:	Verhältnis Kopublikationsanteil mit Deutschland / Gesamtanteil an globalen Publikationen; nach Relevanz	71
Tabelle 4:	Kopatentanteile 2016-18 (mit Deutschland)	72
Tabelle 5:	Verhältnis Kopatentanteil 2016-18 mit Deutschland / Gesamtanteil an globalen Anmeldungen 2018; nach Relevanz.....	73

Abbildungen im Anhang

Abbildung A1:	Haupttrends Publikationen (2000=1,00)	119
Abbildung A2:	Haupttrends Publikationen relativ zum Welttrend	119
Abbildung A3:	Haupttrends Patentanmeldungen (2000 = 1,00)	120
Abbildung A4:	Haupttrends Patentanmeldungen relativ zum Welttrend	120
Abbildung A5:	Detailtrends Publikationen (2000 = 1,00)	121
Abbildung A6:	Detailtrends Patentanmeldungen (2000 = 1,00)	122
Abbildung A7:	Entwicklungen relativ zum Welttrend Digitalisierung (2000 = 1,00)	123
Abbildung A8:	Entwicklungen relativ zum Welttrend Produktionstechnologien (2000 = 1,00)	123
Abbildung A9:	Entwicklungen relativ zum Welttrend Materialwissenschaften (2000 = 1,00)	124
Abbildung A10:	Entwicklungen relativ zum Welttrend Bio- /Lebenswissenschaften (2000 = 1,00)	124
Abbildung A11:	Internationales Publikationsaufkommen Digitalisierungstechnologien	125
Abbildung A12:	Internationale Publikationstrends Digitalisierungstechnologien	125
Abbildung A13:	Internationales Publikationsaufkommen - Digitale Sicherheitstechnologien	126
Abbildung A14:	Internationales Publikationsaufkommen - Mikroelektronik	126
Abbildung A15:	Internationales Publikationsaufkommen - Big Data	127
Abbildung A16:	Internationales Publikationsaufkommen - Künstliche Intelligenz ...	127
Abbildung A17:	Internationales Publikationsaufkommen - Digitale Mobilitätstechnologien	128
Abbildung A18:	Internationales Publikationsaufkommen - Internet of Things	128
Abbildung A19:	Internationales Publikationsaufkommen - Materialtechnologien	129
Abbildung A20:	Internationale Publikationstrends - Materialtechnologien	129
Abbildung A21:	Internationales Publikationsaufkommen - Produktionstechnologien	130
Abbildung A22:	Internationale Publikationstrends - Produktionstechnologien	130
Abbildung A23:	Internationales Publikationsaufkommen - Advanced Manufacturing	131
Abbildung A24:	Internationales Publikationsaufkommen - Robotik	131
Abbildung A25:	Internationales Publikationsaufkommen - Photonik	132
Abbildung A26:	Internationales Publikationsaufkommen - Bio-/Lebenswissenschaften	132
Abbildung A27:	Internationale Publikationstrends - Bio-/Lebenswissenschaften	133
Abbildung A28:	Internationales Publikationsaufkommen - Biotechnologie	133
Abbildung A29:	Internationales Patentaufkommen - Digitalisierungstechnologien ..	134

Abbildung A30:	Internationale Trends bei Patentanmeldungen - Digitalisierungstechnologien.....	134
Abbildung A31:	Internationales Patentaufkommen - Mikroelektronik	135
Abbildung A32:	Internationales Patentaufkommen - Digitale Mobilitätstechnologien.....	135
Abbildung A33:	Internationales Patentaufkommen - Künstliche Intelligenz	136
Abbildung A34:	Internationales Patentaufkommen - Big Data	136
Abbildung A35:	Internationales Patentaufkommen - Digitale Sicherheitstechnologien	137
Abbildung A36:	Internationales Patentaufkommen - Internet of Things.....	137
Abbildung A37:	Internationales Patentaufkommen - Materialtechnologien.....	138
Abbildung A38:	Internationale Trends bei Patentanmeldungen - Materialtechnologien.....	138
Abbildung A39:	Internationales Patentaufkommen - Produktionstechnologien.....	139
Abbildung A40:	Internationale Trends bei Patentanmeldungen - Produktionstechnologien.....	139
Abbildung A41:	Internationales Patentaufkommen - Advanced Manufacturing.....	140
Abbildung A42:	Internationales Patentaufkommen - Photonik	140
Abbildung A43:	Internationales Patentaufkommen - Robotik.....	141
Abbildung A44:	Internationales Patentaufkommen - Bio-/Lebenswissenschaften.....	141
Abbildung A45:	Internationale Trends bei Patentanmeldungen - Bio-/Lebenswissenschaften.....	142
Abbildung A46:	Internationales Patentaufkommen - Biotechnologie	142
Abbildung A47:	Streuung über IPC-Klassen (4-Steller) - Herfindahl-Hirschman-Index	143
Abbildung A48:	Streuung über WZ-Klassen (4-Steller) - Herfindahl-Hirschman-Index	143
Abbildung A49:	Entwicklung des HHI Konzentrationsindex über Wirtschaftszweige (Trend: 2000 = 1)	144
Abbildung A50:	Entwicklung des HHI Konzentrationsindex über IPC-Klassen (Trend: 2000 = 1)	145
Abbildung A51:	Matrixdarstellung der Streuung von Schlüsseltechnologien.....	146
Abbildung A52:	Anteil der Technologiebereiche am Gesamtaufkommen; Publikationen 2010-12	147
Abbildung A53:	Anteil der Technologiebereiche am Gesamtaufkommen; Publikationen 2016-18	147

Abbildung A54:	Publikationen - RLA des jeweiligen Landes (Einzeltechnologien) .	148
Abbildung A55:	Publikationen - RLA des jeweiligen Landes (Einzeltechnologien) .	149
Abbildung A56:	Publikationen - RLA des jeweiligen Landes (Einzeltechnologien) .	150
Abbildung A57:	Patente - RPA des jeweiligen Landes (Einzeltechnologien)	151
Abbildung A58:	Patente - RPA des jeweiligen Landes (Einzeltechnologien)	152
Abbildung A59:	Patente - RPA des jeweiligen Landes (Einzeltechnologien)	153
Abbildung A62:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld künstliche Intelligenz relevanten Gütergruppen.	155
Abbildung A 63:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Big Data relevanten Gütergruppen.....	155
Abbildung A64:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Dig.Mobilitätstechn. relevanten Gütergruppen ..	156
Abbildung A65:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Dig. Sicherheitstechn. relevanten Gütergruppen	156
Abbildung A66:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Internet of Things relevanten Gütergruppen	157
Abbildung A67:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens in der Mikro- u. Nanoelektronik.....	157
Abbildung A68:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Adv. Manufacturing relevanten Gütergruppen ..	158
Abbildung A69:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Photonik relevanten Gütergruppen.....	158
Abbildung A70:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Robotik relevanten Gütergruppen	159
Abbildung A71:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Neue Materialien relevanten Gütergruppen	159
Abbildung A72:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Nanotechnologie relevanten Gütergruppen.....	160
Abbildung A73:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Feld Lebenswissenschaften	160
Abbildung A74:	Entwicklung des globalen Exportaufkommens hinsichtlich für den Bereich Bioökonomie relevanter Gütergruppen.....	161
Abbildung A75:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld künstliche Intelligenz relevanten Gütergruppen.	161
Abbildung A76:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Big Data relevanten Gütergruppen.....	162
Abbildung A77:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Dig. Mobilitätstechn. relevanten Gütergruppen.	162
Abbildung A78:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Dig. Sicherheitstechn. relevanten Gütergruppen	163

Abbildung A79:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Internet of Things relevanten Gütergruppen.....	163
Abbildung A80:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen in der Mikro- u. Nanoelektronik	164
Abbildung A81:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Adv. Manufacturing relevanten Gütergruppen ..	164
Abbildung A82:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Photonik relevanten Gütergruppen	165
Abbildung A83:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Robotik relevanten Gütergruppen.....	165
Abbildung A84:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Neue Materialien relevanten Gütergruppen.....	166
Abbildung A85:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Nanotechnologie relevanten Gütergruppen	166
Abbildung A86:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Feld Lebenswissenschaften	167
Abbildung A87:	Entwicklung der relativen Handelsbilanzen hinsichtlich für den Bereich Bioökonomie relevanter Gütergruppen	167
Abbildung A88:	Nationale Leitungspositionen in int. Standardisierungsorganisationen in den vier Schlüsseltechnologiebereichen	168
Abbildung A89:	Verteilung der standard-essentiellen Patente in den Advanced Manufacturing Technologies	169
Abbildung A90:	Verteilung der standard-essentiellen Patente in der Photonik.....	169
Abbildung A91:	Verteilung der standard-essentiellen Patente im Bereich Robotik....	170
Abbildung A92:	Verteilung der standard-essentiellen Patente im Bereich Künstliche Intelligenz	170
Abbildung A93:	Verteilung der standard-essentiellen Patente im Bereich Digitale Sicherheitstechnologien	171
Abbildung A94:	Verteilung der standard-essentiellen Patente im Bereich Big Data	171
Abbildung A95:	Verteilung der standard-essentiellen Patente im Bereich Internet of Things	172
Abbildung A96:	Verteilung der standard-essentiellen Patente im Bereich Digitale Mobilitätstechnologien.....	172
Abbildung A97:	Verteilung der standard-essentiellen Patente in der Mikroelektronik	173
Abbildung A98:	Verteilung standard-relevanter Publikationen in den Materialwissenschaften	173
Abbildung A99:	Verteilung standard-relevanter Publikationen in den Bio-/Lebenswissenschaften.....	174

Tabellen im Anhang

Tabelle A1:	Erläuterung zur Operationalisierung der Einzeltechnologien	110
Tabelle A2:	Top-25 Publizierende Institutionen im Bereich Digitalisierungstechnologien	175
Tabelle A3:	Top-25 Publizierende Institutionen im Bereich Produktionstechnologien	176
Tabelle A4:	Top-25 Publizierende Institutionen im Bereich Materialtechnologien	177
Tabelle A5:	Top-25 Publizierende Institutionen im Bereich Bio- und Lebenswissenschaften.....	178
Tabelle A6:	Top-25 Patentierende Institutionen (Anmelder transnationaler Patente) im Bereich Digitalisierungstechnologien	179
Tabelle A7:	Top-25 Patentierende Institutionen (Anmelder transnationaler Patente) Bereich Produktionstechnologien.....	180
Tabelle A8:	Top-25 Patentierende Institutionen (Anmelder transnationaler Patente) Bereich Materialtechnologien	181
Tabelle A9:	Top-25 Patentierende Institutionen (Anmelder transnationaler Patente) Bereich Bio- und Lebenswissenschaften.....	182

0 Summary

Dieser Bericht zur Rolle von Schlüsseltechnologien im deutschen Innovationssystem verfolgt drei zentrale Zielsetzungen, die in sieben aufeinander folgenden Kapiteln adressiert werden. Zunächst wird sowohl die akademisch-politische Entstehung des Konzepts "Schlüsseltechnologie" eingehend beleuchtet als auch empirisch geprüft, welche Technologien die auf diese Weise konzeptionell ableitbaren Kriterien aktuell in besonderer Weise erfüllen. Am Ende dieses ersten Abschnitts wird abschließend dargestellt, welche verschiedenen Rationalitäten sich für die politische Ausweisung spezifischer Technologien als "Schlüsseltechnologien" sachlogisch anbieten. In Folge wird in einem zweiten Teil die Position Deutschlands im Bereich der so ausgewählten Schlüsseltechnologiebereiche und Einzeltechnologien empirisch geprüft. Spezifische Kapitel prüfen hierbei die Positionierung Deutschlands im Hinblick auf Forschung und Entwicklung, Außenhandel, internationale Standardisierung sowie internationale Kooperation, all jener Aspekte also, die vorab als Kerndimensionen technologischer Souveränität abgeleitet wurden. Abschließend werden in einem letzten Kapitel noch einmal zentrale Hemmnisse für deutsche Innovatoren spezifisch herausgestellt sowie ausgeführt, welche politischen Maßnahmen in den global größten Wirtschaftsräumen (EU-27, USA, China) zur Förderung der Entwicklung zentraler Schlüsseltechnologien umgesetzt wurden und werden. Der Bericht endet mit einem übergreifenden Fazit und zusammenfassenden Empfehlungen.

Empirische und konzeptionelle Einordnung des Begriffs Schlüsseltechnologie

Diese Studie zu Schlüsseltechnologien zeigt zunächst, dass es sich bei dem Begriff Schlüsseltechnologie um ein variables Konzept handelt, das sich sowohl hinsichtlich der spezifischen Technologien, die es zu einem gegebenen Zeitpunkt erfasst, als auch im Hinblick auf die gesamtwirtschaftliche Rolle, die diesen Technologien zugemessen wird, in einem stetigen Wandel befindet. Gemein ist den als Schlüsseltechnologie bezeichneten Bereichen, dass ihnen eine überdurchschnittliche Breitenwirksamkeit (General Purpose Technologies) aber auch ein wichtiger Beitrag zu anhängigen Transformationen von Wirtschaft und Gesellschaft insgesamt beigemessen wird. Eine zentrale Charakteristik von Schlüsseltechnologien ist damit, dass sie in vielen Sektoren bzw. für zahlreiche Anwendungen und Produkte eine Rolle spielen (sei es für deren Herstellungsprozess, das Produkt oder die Anwendung selbst). Alternativ können sie von besonderer Bedeutung zur Adressierung globaler oder nationaler Herausforderungen sein, wie dies z.B. bei nachhaltigkeitsrelevanten Technologien im Bereich Bioökonomie der Fall ist sowie jenen, die eine qualitativ gute Gesundheitsversorgung gewährleisten.

In diesem Sinne können sie "der Schlüssel" zu unterschiedlichen Entwicklungen sein, teils da sie selbständig eine besondere Dynamik entfalten (zzt. v.a. Digitalisierung), teils aber auch gerade deswegen, da sie eine solche Dynamik zwar (noch) nicht selbsttätig entfalten, diese allerdings sowohl unter sozioökonomischen als auch unter ökologischen Gesichtspunkten dringend erforder-

lich wäre (z.B. Bio- und Lebenswissenschaften). Die letztgültige Bestimmung einzelner Technologien als Schlüsseltechnologie bleibt somit stets auch eine politische Festlegung und greift über eine rein empirische Identifikation besonderer, bereits bestehender Dynamiken hinaus.

Grundsätzlich können Kompetenzen in Schlüsseltechnologien für technologisch führende Länder und Staatengemeinschaften in vierfacher Hinsicht von Bedeutung sein:

- Um den Anschluss an die dynamische digitale Transformation von Wirtschaft- und Gesellschaft zu halten und an ihr aktiv partizipieren zu können;
- Um neue Entwicklungen im Bereich konvergierender Technologien in nationale bzw. europäische Alleinstellungsmerkmale umzusetzen;
- Um ausgewählte, grundlegende Fertigkeiten in jenen Bereichen zu schaffen bzw. zu erhalten, die das Fundament aller technologischen Entwicklungen bilden.
- Um die Grundlagen für eine sozioökologische und nachhaltige Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft zu legen bzw. diese zu beschleunigen.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurden als Schlüsseltechnologien gängiger Weise Technologien aus den Bereichen Digitalisierung, Produktion, Materialwissenschaften sowie Bio- und Lebenswissenschaften identifiziert, eine Struktur, die auch dieser Bericht zur Strukturierung der Analysen aufgreift.

Im Verlauf des letzten Jahrzehnts haben hierbei v.a. Digitalisierungstechnologien eine besondere Rolle eingenommen. Insbesondere softwaregetriebene Technologien aus den Bereichen Big Data, Künstliche Intelligenz sowie Digitale Sicherheit wirken zunehmend auch in fast alle anderen Technologiebereiche hinein. Ihnen gebührt somit v.a. deswegen besondere Aufmerksamkeit, da sie Entwicklungen in fast allen anderen Bereichen, inkl. der klassischen Hardwaretechnologie, optimieren und beschleunigen können.

Dessen ungeachtet behalten auch andere Technologien eine zentrale Rolle und verdienen im Hinblick auf politische Förderung besondere Aufmerksamkeit. Dies gilt insbesondere hinsichtlich bestimmter Felder bzw. Domänen der Technologieentwicklung an den Schnittstellen etablierter Felder, die bereits eine stärkere Ausrichtung auf konkrete Anwendungsbereiche aufweisen, als dies bei den eher generischen Digitalisierungstechnologien der Fall ist. Zu diesen zählen u.a. Digitale Mobilitätstechnologien, die Photonik, die Robotik, Technologien für das Internet of Things, aber auch die Bioökonomie.

Zusammenfassend lassen sich auf Grundlage von Literaturrecherchen sowie auch eigener empirischer Analysen drei zentrale Typen von Technologien identifizieren, die aufgrund unterschiedlicher Rationalitäten als Schlüsseltechnologien bezeichnet werden können:

1) Treiber der digitalen Transformation – softwaregetriebene Technologien

Diese Technologien treiben die aktuelle, fundamentale Transformation des Wirtschaftsgeschehens und zeichnen sich sowohl durch eine hohe Breitenwirksamkeit als auch durch eine starke Dynamik aus. Zu ihnen zählen v.a. Künstliche Intelligenz, Big Data, Digital Security. Zwar

sollten sie nicht im alleinigen Fokus der politischen Aufmerksamkeit stehen, andererseits zeichnet sich im digitalen Bereich eine technologische Revolution nicht nur ab, sondern hat sich seit ca. seit fünf bis zehn Jahren bereits voll entfaltet. Länder, die in diesem zentralen Bereich den Anschluss verlieren, verlieren mit großer Wahrscheinlichkeit mittelfristig allgemein die Befähigung, eigene Beiträge zur technologischen Entwicklung zu leisten, da softwaregetriebene Technologien zunehmend alle anderen Bereiche durchdringen.

2) Technologien an neu entstehenden Schnittstellendomänen

An den Schnittstellen bestehender, anwendungsbezogener Stärkenfelder und neuer "Enabling Technologies" entstehen Möglichkeiten, neue Lösungsansätze und spezifische Kompetenzen zu entwickeln. In diesen Bereich fallen u.a. Digitale Mobilitätstechnologien, Internet of Things, Robotik, Industrie 4.0, generative Fertigung sowie der Bereich Bioökonomie. Kompetenzen in diesen Technologien sind unverzichtbar, um mittels der Kombination spezifischer Stärken im technologischen Wettbewerb Alleinstellungsmerkmale zu entwickeln und Nachahmung zu vermeiden. Sie sind zwar ggf. nicht in gleichem Maße "General Purpose" Technologien wie o.g. Digitalisierungstechnologien, können aber vor dem Hintergrund der einleitenden Argumentation politisch als zentrale Schlüsseltechnologien betrachtet werden.

3) Komponenten eines zukunftsfähigen technologischen Fundaments

Zur Entwicklung hochentwickelter Schnittstellenkompetenzen bedarf es zudem zentraler Grundlagenfertigkeiten, die die Konzeption relevanter Anwendungen erst ermöglichen. In diesen Bereich fallen: Hardwaredesign (aktuell und zukünftig), fortgeschrittene Produktionstechnologien, neue Werkstoffe, Biotechnologie und Pharmazie. Ausreichende Fertigkeiten in zumindest einigen von ihnen zentral für den Aufbau zukünftiger Alleinstellungsmerkmale. Explizit zählen in diesen Bereich auch solche Technologien, deren Eigendynamik zwar u.U. nicht überdurchschnittlich ausgeprägt ist, die allerdings vor dem Hintergrund staatlich gesetzter Ziele im Bereich der Nachhaltigkeit als zentral angesehen werden müssen.

Rein begrifflich unterscheiden sich die zurzeit politisch als "Schlüsseltechnologien" bezeichneten Bereiche oft dahingehend, ob es sich um Einzeltechnologien oder ganze Felder handelt. Viele der gängigen Feldbezeichnungen wie "Advanced Manufacturing" oder "Advanced Materials" sind dabei vergleichsweise unkonkret, und lassen sich insgesamt nur wenig trennscharf abgrenzen. Eine solche Konkretisierung wäre allerdings wichtig, wie sich am Beispiel der Digitalisierungstechnologien verdeutlichen lässt. Hier bestehen wesentliche Unterschiede zwischen der Entwicklung relevanter Hardwarekomponenten und jenen revolutionären, softwarebasierten Technologien, die mit der seit ca. 2015 verstärkt einsetzenden digitalen Revolution in Verbindung stehen. Während letztere die Entwicklung anderer Schlüsseltechnologien in der Breite befördert (s.o.), handelt es sich bei ersteren um eine klar abgegrenzte Schlüsseltechnologie klassischer Prägung.

Im Zeitverlauf finden sich teils Anzeichen, dass im Bereich der Schlüsseltechnologien oftmals Muster des Typs Exploration-Exploitation festzustellen sind, bei dem sich eine Technologie im

Zeitverlauf einerseits technologisch fokussiert, während sie gleichzeitig in den Entwicklungstätigkeiten einer immer größeren Anzahl von Sektoren Berücksichtigung findet. Anschließend an eine initiale Suchphase (Exploration) kristallisiert sich der besondere Nutzen eines bestimmten Technologiebereichs mit der Zeit immer stärker heraus und die Technologie als solche ist klarer definiert. Parallel wird sie nach dem Erreichen eines gewissen Reifegrads von einer kontinuierlich wachsenden Zahl von Akteuren sektorübergreifend mit genutzt (Exploitation).

Darüber hinaus lässt sich in vielen Bereichen beobachten, wie wissenschaftliche Aktivitäten mit gewissem Zeitverzug auch technologische Entwicklungsaktivitäten nach sich ziehen. In jenen softwaregestützten Bereichen allerdings, die sich am aktuellen Rand sehr dynamisch – und potenziell auch v.a. wirtschaftsgetrieben – entwickeln (z.B. Künstliche Intelligenz), sind eher parallele Muster zu beobachten, d.h. eine gleichzeitig hohe wissenschaftliche und technologische Dynamik. Technologien wie beispielsweise Künstliche Intelligenz und Big Data sind bereits zu Beginn ihres Auftretens klar definiert. Zudem erreichen sie so schnell einen sehr hohen Reifegrad, dass sich aus den verfügbaren Daten kaum mehr klassische Produkt- bzw. Technologielebenszyklen ablesen lassen. Insbesondere mit Blick auf die zunehmende Rolle von softwaregeprägten Technologien ist ein grundsätzlicher Wandel bekannter Muster von Technologiegenese und -adaption nicht nur nicht auszuschließen, sondern vielmehr wahrscheinlich.

Internationaler Vergleich

Im Ländervergleich ist festzustellen, dass Deutschland mit Blick auf Patentanmeldungen in allen Bereichen eine international merklich bedeutendere Rolle einnimmt als im Bereich Wissenschaft (Publikationen) oder Außenhandel (Exporte). Auch in den beiden letzten Bereichen ist Deutschland allerdings gegenüber seinem globalen Wertschöpfungsanteil deutlich überdurchschnittlich positioniert. Schwerpunkte finden sich hierbei v.a. im Bereich der klassischen Produktionstechnologien, in denen Deutschland auch global absolut maßgeblich bleibt, auch wenn asiatische Länder aufholen. In den aktuell relevantesten Bereichen der Digitalisierungstechnologien (v.a. Künstliche Intelligenz, Big Data, Digitale Sicherheit; eingeschränkt auch Internet of Things) steht Deutschland dagegen absolut betrachtet im Schatten der USA und Chinas, was sich, wie oben dargestellt, mittelfristig auch auf die Entwicklungen in anderen Schlüsseltechnologien auszuwirken droht. Zwar werden auch in Deutschland globale Entwicklungen z.B. in den Bereichen Künstliche Intelligenz und/oder Big Data relativ betrachtet gut mitvollzogen, was aufgrund des in Deutschland noch immer niedrigen Basisniveaus allerdings nicht zu einem Aufholen in absoluter Hinsicht beiträgt. Mindestens unter den technologisch führenden Nationen ordnet sich Deutschland in vielen Bereichen zunehmend seiner Größe entsprechend ein und verliert damit seine vormals auch absolut maßgebliche Stellung im globalen Technologiewettbewerb. Auch insgesamt führt das Erstarren Chinas, Koreas sowie, wissenschaftlich, Indiens zu einem deutlichen Rückgang jenes Anteils, den die ehemaligen Triade-Länder (US, EU, JP) an der weltweiten Innovationstätigkeit halten.

Dessen ungeachtet verfügt Deutschland noch immer über ausreichende Kapazitäten und Kompetenzen, um in relevanten Bereichen Technologien selbst fortzuentwickeln und diese auf neue Anwendungszusammenhänge anzupassen. Durch die zunehmende Rolle von Digitalisierungstechnologien besteht allerdings zunehmend die Gefahr der "Aushöhlung" bestehender Kompetenzen in spezifischen Anwendungsfeldern, wie v.a. den Produktionstechnologien, die in immer stärkerem Maße von digitalen Technologien "durchdrungen" werden.

Darüber hinaus sind deutsche Unternehmen bzw. Institutionen im Bereich der Ausgestaltung zukünftiger Rahmenbedingungen – insbesondere in Bezug auf internationale Standards – bis auf wenige Ausnahmen in fast dramatischer Weise abwesend. Zurzeit scheint es Deutschland im Bereich der Standardisierung in der Informations- und Kommunikationstechnologie nicht mehr zu gelingen, sich in relevante Foren der Aushandlung zukünftiger Standards maßgeblich, oder auch nur erkennbar mit seinen eigenen Technologien einzubringen. Offenbar fehlt es deutschen Akteuren in dieser Hinsicht zzt. an der Fähigkeit oder am Willen, die Grundlage ihrer eigenen Zukunft eigenständig mitzugestalten. Sollte sich diese Haltung durchsetzen, droht mittelfristig bereits die Möglichkeit zur souveränen Mitgestaltung dieser Prozesse verloren zu gehen.

Zudem spiegeln die wissenschaftlich-technologischen Kooperationsmuster Deutschlands (gemessen in Ko-Publikations- und Ko-Patentierungsaktivitäten) weltweit noch immer die technoökonomischen Strukturen der 1980er und 1990er Jahre wider. Während sowohl wissenschaftlich als auch mit Blick auf Konzernstrukturen (gespiegelt in Ko-Patenten) eine enge Integration mit europäischen Partnerländern und Nordamerika besteht, konnten vergleichbare Verbindungen zu den mittlerweile führenden Nationen Asiens bislang nicht oder nur unzureichend aufgebaut werden. Positiv betrachtet unterstreichen diese Ergebnisse den fortgesetzten Erfolg und auch die Nachhaltigkeit der europäischen und transatlantischen Integration Deutschlands. Gleichzeitig zeigen sie jedoch auf, dass zu großen Teilen der zentralen Wissensquellen der Gegenwart noch kein hinreichender Kontakt aufgebaut werden konnte, wenngleich z.B. der Aufstieg Japans bereits über 20 und auch jener Koreas mittlerweile gut 15 Jahre zurückliegt. Darüber hinaus ist zurzeit, unter anderem aus geopolitischen Gründen, eine zunehmende Desintegration mit China zu beobachten, lediglich mit Indien zeichnet sich ein etwas anderes Bild ab.

Hinzu kommt die Tatsache, dass bereits seit Anfang der 1990er Jahre zentrale Teile der Produktion relevanter Technologiekomponenten ins, meist asiatische, Ausland verlagert wurden. Während Deutschland – und auch die Vereinigten Staaten – nach wie vor über zentrale Kompetenzen im Bereich der Entwicklung verfügen, sind sie in der Regel v.a. im digitalen Bereich nicht mehr in der Lage, zukünftige Produkte und Lösungen selbst zu fertigen oder auch nur vor Ort zu pilotieren. Grundsätzlich war diese internationale Aufgabenteilung viele Jahre lang sowohl erfolgreich als auch kommerziell opportun – und ist dies im Grundsatz bis heute. Gleichzeitig unterstützte sie, bereits in den 1990er aber v.a. den 2000er Jahren, Lerneffekte, Technologietransfers und Aufholbewegungen in anderen Ländern. Diese führten dazu, dass vormalige asiatische Produktionsbasen,

allen voran China, an der softwaregetriebenen digitalen Revolution der späten 2010er Jahre auf Augenhöhe teilnehmen und Europa in Teilen technologisch überholen konnten.

Die vormaligen europäischen Führungsnationen hingegen bleiben strukturell davon abhängig, dass sie von asiatischen Partnerstaaten zuverlässig mit Vor- und Endprodukten beliefert werden bzw., diese Staaten Güter gemäß europäischer Bedürfnisse zu vertretbaren Preisen fertigen. Ob diese hieran langfristig ein vergleichbares Interesse haben wie noch in den 2000er Jahren ist dabei zunehmend unklar. China z.B. hat im Verlauf der letzten fünf Jahre seine technologischen Handelsbilanzdefizite stark reduzieren können und ist u.a. in den Bereichen Hardware und Robotik nun viel weniger von ausländischer Technik und ausländischen Investitionen abhängig als in der Vergangenheit. Darüber hinaus verfügt es mittlerweile selbst über einen starken Binnenmarkt, so dass auch die ökonomische Abhängigkeit von umfangreichen Exporten in vielen Bereichen bereits weitgehend entfallen ist. Für den Moment ist allerdings anzumerken, dass technologisch komplexe Importe Deutschlands in sensiblen Kernbereichen in vielen Bereichen zzt. noch eher aus Japan oder Korea denn aus China stammen.

Zurzeit besteht, von spezifischen Gütergruppen abgesehen, in den meisten Technologiebereichen insgesamt keine einseitige Abhängigkeit Deutschlands von einzelnen asiatischen Lieferanten. Insgesamt ist Deutschland im Bereich technologischer Importe meist sogar weniger von einzelnen Ländern abhängig, als dies die allgemeine Konzentration der Weltexporte auf bestimmte Nationen nahelegen würde; deutlich weniger in jedem Fall als z.B. die Vereinigten Staaten. Dies liegt nicht zuletzt in einer gut etablierten innereuropäischen Arbeitsteilung begründet, im Rahmen derer sich auch in Zukunft relevante Optionen und Alternativen der Produktionsverlagerung ergeben werden.

Politische Förderung

Aus politischer Perspektive ist festzuhalten, dass Entwicklungen im Bereich der Schlüsseltechnologien sowohl in den Vereinigten Staaten als auch in China sehr bewusst langfristig und mit erheblichen Mitteln gefördert wurden und werden. Wenngleich hierbei vor dem Hintergrund gegensätzlicher politischer Systeme durchaus sehr unterschiedliche Ansätze zur Anwendung kommen, widmeten beide Länder dem Thema der technologischen Positionierung lange Zeit deutlich mehr konkrete Aufmerksamkeit als Deutschland und Europa. Sowohl in den Vereinigten Staaten als auch in China wurde das Potenzial der sich in den frühen 2010er Jahren anbahnenden digitalen Revolution früher als in Europa erkannt und politisch in einem Umfang gefördert, der in Europa – trotz jüngster Bemühungen – nach wie vor seinesgleichen sucht.

In den letzten Jahren sind sowohl die Europäische Union und auch Deutschland bemüht, diesen sowohl faktischen als auch förderpolitischen Rückstand wettzumachen. Allerdings bedarf der hierbei zugrunde gelegte Ansatz in vielen Bereichen sowohl politisch als auch grundsätzlich noch der

konzeptionellen Klärung, bevor sich ein schlüssiges Gesamtbild und daraus wirksame förderpolitische Maßnahmen ergeben können, die die autonome Gestaltungsfähigkeit deutscher Akteure, d.h. die technologische Souveränität Deutschlands insgesamt sichern helfen.

Voneinander zu trennen sind in diesem Zusammenhang vor allem drei Aspekte oder Elemente technologischer Souveränität, die trotz ihres engen Zusammenwirkens politisch ganz unterschiedliche Ansätze verlangen (vgl. Edler et al. 2021).

1. Die souveräne Befähigung eines Staates oder Staatenverbunds zum Aufbau eigener *wissenschaftlich-technologischer Fähigkeiten*, verbunden mit einer Bildungs-, Forschungs-, Innovations- aber auch Investitionspolitik, die den Erhalt dieser Befähigung ernst nimmt. Hierzu zählt neben der langfristigen Schaffung relevanter Grundlagen auch der Verzicht auf die Preisgabe erreichter Fertigkeiten aus kurzfristigen, kommerziellen Motiven.
2. Die Abwesenheit *einseitiger Abhängigkeiten im Bereich materieller Zulieferungen*, aus der sich im Bedarfsfall staatliche Maßnahmen zur Unterstützung von Unternehmen im Bereich der Importdiversifizierung sowie, im Extremfall, der Rückverlagerung von Produktionskapazitäten ableiten lassen.
3. Ein *strategischer Zugang zur wissenschaftlich-technologischen Kooperation* mit dem Ziel, sich in internationaler Kooperation an relevanten Neuentwicklungen zu beteiligen sowie, gleichermaßen, von an anderer Stelle erreichten Erkenntnissen zu profitieren und zu lernen. Auch vor dem Hintergrund geopolitisch zunehmend kompetitiver Verhältnisse stellt sich in diesem Zusammenhang noch immer selten die Frage, ob überhaupt kooperiert werden sollte, sondern eher wie, in welchen Bereichen und mit welchen Zielen dies politisch unterstützt werden sollte.

Hinsichtlich dieser drei Aspekte schneidet Deutschland zzt. recht unterschiedlich ab. Zwar verfügt es im Bereich eigener *wissenschaftlich-technologischer Fähigkeiten* nach wie vor über traditionelle Stärken, kann in den sich zurzeit dynamisch entwickelnden Feldern der Digitalisierung allerdings keine global vergleichbar maßgebliche Stellung mehr entwickeln. Darüber hinaus wurden erst seit kurzem erste Maßnahmen gegen die unvorteilhafte Veräußerung zentraler Kompetenzen an konkurrierende Nationen in Kraft gesetzt. *Abhängigkeiten im Bereich der Zulieferung* bestehen dagegen zwar in einzelnen Bereichen durchaus, insgesamt stellt sich Deutschlands Importabhängigkeit jedoch weniger ausgeprägt dar, als dies der aktuelle Diskurs vermuten ließe. Dies liegt nicht zuletzt an erprobten Modellen innereuropäischer Arbeitsteilung. Im Bereich der *internationalen wissenschaftlich-technologischen Zusammenarbeit* fokussiert Deutschland weiter stark auf innereuropäische und transatlantische Beziehungen, Kooperationen mit den technologisch aufstrebenden Ländern Asiens bleiben unterrepräsentiert. Dies, wie auch das mangelnde Engagement deutscher Akteure im Bereich der internationalen Standardisierung, ist der globalen Mitgestaltungsfähigkeit Deutschlands abträglich.

Schlussfolgerungen

Dieser Bericht zeigt somit zusammenfassend Folgendes auf:

Zurzeit sind alle führenden Industrienationen herausgefordert, mit der dynamischen Entwicklung im Bereich der softwaregetriebenen Digitalisierung Schritt zu halten und entsprechende, für die zukünftige Wertschöpfung und Wohlstand gesamtwirtschaftlich entscheidenden Fähigkeiten selbst zu entwickeln und vorzuhalten. Die Größenordnung dieser Herausforderung setzt sich von denen in anderen Technologiebereichen aktuell maßgeblich und noch einmal stärker ab, als sich dies beim Entwurf erster Kataloge von Schlüsseltechnologien in den 2010er Jahren abzeichnete. In diesem Sinne kommt dem Konzept Schlüsseltechnologie aktuell eine neue, verstärkte Relevanz zu.

Deutschland verfügt in diesen Technologien zwar über relevante Kompetenzen, die es auch durchaus dynamisch weiterentwickelt, allerdings kann es rein quantitativ das zukünftige, globale Marktumfeld schwerer mitbestimmen als in der Vergangenheit. Im Vergleich zu traditionelleren Technologiebereichen sind seine Optionen der souveränen Mitgestaltung in den nun relevanten Bereichen stärker limitiert. Umso schwerer wiegt, dass bestehende Optionen der Mitgestaltung zurzeit kaum genutzt werden. Insbesondere wenn auf ein aktives Mitwirken im Bereich der internationalen Standardisierung weiterhin verzichtet wird, droht Deutschland im Bereich der Anwendung zukunftsträchtiger, v.a. digitaler Technologien international weiter ins Hintertreffen zu geraten.

Im Bereich der softwaregetriebenen Digitalisierungstechnologie sind insbesondere die Schlüsselbereiche Künstliche Intelligenz und Big Data technologisch klar abgrenzbar (d.h. keine Dachbegriffe) und entfalten gleichzeitig verlässlich erhebliche Breitenwirkung. Generell lässt eine Fokussierung politischer Fördermittel auf diese beiden Bereiche eine hohe und auch unmittelbare Wirksamkeit erwarten. Hier sollten in der näheren Zukunft mit klar definierten, großvolumigen Investitionen klare Akzente gesetzt werden, um Deutschlands Anschlussfähigkeit in diesen zentralen Bereichen zu erhalten.

Gleichzeitig bedarf es eines Alleinstellungsmerkmals, mittels dessen sich Deutschland und Europa von den USA und China absetzen können. Angesichts der veränderten Kräfteverhältnisse im globalen Innovationswettbewerb kann es dabei nicht länger das Ziel sein, bestimmte Bereiche technologisch sowie exportseitig strukturell zu dominieren. Stattdessen gilt es, sie über eine gezielte Positionierung in bestimmten Bereichen strukturell arbeitsteilig mitzugestalten und Abhängigkeiten vorzubeugen.

Entsprechende Alleinstellungsmerkmale sind auf Basis unserer Analyse am ehesten in Schnittstellenbereichen jener Technologien zu entwickeln, die aktuell durch die softwaregetriebene Digitalisierung revolutioniert werden. Im besonderen Fokus stehen hierbei die Produktionstechnologien. Deutsche bzw. europäische Lösungen können in den Bereichen Künstliche Intelligenz, Big Data

und Internet of Things, die die Schnittstelle zwischen softwaregetriebenen digitalen und Produktionstechnologien bedienen, die strukturelle Resilienz des gesamten Innovationssystems stärken und dessen technologische Souveränität im internationalen Kontext erhöhen. Konkret ist daher die Förderung neuer Lösungen in den Bereichen Robotik und Industrie 4.0 zu empfehlen. Mit vergleichbaren Argumenten lassen sich darüber hinaus Investitionen in die Bereiche Photonik, generative Fertigung sowie Bioökonomie rechtfertigen.

Darüberhinausgehend ist die Frage zu stellen, welche weiteren Beiträge Deutschland und Europa zum Fundament zukünftiger technologischer Aktivitäten leisten wollen. Auch hier erscheint es zzt. nicht realistisch, in einem Gesamtfeld eine strukturell dominierende Rolle einzunehmen. Stattdessen erscheinen der gezielte Erhalt bestehender Kernkompetenzen (Hardwareentwicklung, Mechatronik, Biotechnologie, Pharmazie) sowie fokussierte Investition in die Fundamente der Zukunft (Quantencomputing, Nanomaterialien, Komposite, Bionik) von besonderer Bedeutung.

Durch die Abhängigkeit von materiellen Importen haben sich Deutschland und Europa in eine Situation gebracht, die einer technologischen Souveränität abträglich ist. Allerdings zeigen unsere Analysen, dass keinesfalls allgemein besorgniserregende Konzentrationstendenzen zu beobachten sind und sich mit der (Rück-)Verlagerung kostensensitiver Produktionsschritte an kostengünstige und effiziente Standorte in Europa durchaus noch relevante Optionen der Diversifizierung bieten, die nicht in gleichem Maße in einem geopolitischen Spannungsfeld stehen, wie Verlagerungen nach China.

Handelstheoretisch ist es für ein Land der Größe Deutschlands nicht realistisch, in allen Bereichen absolute oder auch nur komparative Vorteile zu realisieren. Zudem verfügt es nicht über die notwendigen Ressourcen alle theoretisch vorhandenen komparativen Vorteile auch tatsächlich zu realisieren. Eine Einbindung in die bestehende – und ggf. gezielt weiter zu entwickelnde – internationale Arbeitsteilung erscheint damit unverzichtbar. Gleichzeitig allerdings ist der Zugang zu Exportmärkten gerade für ein Land mittlerer Größe unverzichtbar, um das jetzige Niveau an technologischer Expertise zu halten, die nicht zuletzt auch im Anwendungskontext ausländischer Märkte weiterentwickelt wird. Zentraler ist es daher, nicht nur bestehende Exportstärken zu pflegen und zu erhalten, sondern auch beständig neue Alleinstellungsmerkmale zu herauszuarbeiten, auf Grundlage derer sich neue Exportstärken entwickeln lassen.

Ungeachtet der in Teilen begründeten Vorbehalte bezüglich materieller Abhängigkeiten sowie der Gefahr unbeabsichtigter bzw. teils erzwungener Technologietransfers ist die bestehende wissenschaftlich-technologische Zusammenarbeit v.a. mit Asien in vielen Bereichen als ausbaufähig anzusehen. Eine geopolitisch motivierte völlige Abwendung von China, aber auch die mangelnde Pflege bestehender Kooperationen mit Japan, Korea und Indien würde Deutschland und Europa perspektivisch noch stärker von relevanten Wissensquellen abschneiden, zu denen schon jetzt nur

unterdurchschnittlicher Zugang besteht. Gerade diese wird Deutschland aber in Zukunft benötigen, um gezielt und strategisch von anderen Ländern zu lernen und mit ihnen – wo möglich – von eigenen Interessen geleitet zu kooperieren.

Ungeachtet der geopolitischen Lage, die – nicht zuletzt in Asien – einen kritischen, wachsamen und strategischen Umgang fordert, ist festzustellen, dass sowohl Deutschland als auch Europa nicht mehr in allen Bereichen die Technologie- und Produktlebenszyklen initiieren und anführen. In den Bereichen allerdings, in denen Entwicklungen gleichauf mit anderen, oder aus einer aufholenden Position heraus erfolgen, erscheint eine aktive Auseinandersetzung mit eben jenen Akteuren, die die wissenschaftlich-technologische Entwicklung anführen, unverzichtbar. Neben dem bestmöglichen Erhalt deutsch-chinesischer Kooperationen impliziert dies die Notwendigkeit bestehender Kooperationen im transatlantischen und europäischen Rahmen sowie die Ausweitung jener zu Japan, Korea, Indien, Singapur und anderen Kompetenzträgern im asiatischen Raum.

1 Konzeptionelle Identifizierung von Schlüsseltechnologien

Theoretische und konzeptionelle Arbeiten

Schon seit vielen Jahrzehnten wird in den Wirtschaftswissenschaften die Bedeutung einiger besonders relevanter Technologien inkl. ihres zeitlichen Verlaufs und weitreichender Auswirkungen untersucht. Dazu gehören beispielsweise Forschungsarbeiten von Schumpeter zu langen Wellen, Kondratieff-Zyklen oder Konzepte zu technoökonomischen Paradigmen. Seit Mitte der 1990er Jahre gewann das Konzept der General Purpose Technologies (GPTs) an Bedeutung (Bresnahan und Trajtenberg 1995). Nach Helpman (1998) werden diese wie folgt definiert: "GPTs are enabling technologies for a pervasive use in many sectors to foster new products and processes". In Folge wurden verschiedene konzeptionelle und empirische Ansätze zu GPTs entwickelt (Bresnahan und Trajtenberg 1995; Helpman 1998; Helpman und Trajtenberg 1994; Howitt 1998; Jovanovic und Rousseau 2005; Lipsey et al. 2005), die sich v.a. bezüglich folgender Aspekte unterscheiden:

- zu Teilen in der Definition und Kriterien zur Identifikation der GPTs (siehe unten),
- Methoden wie GPTs identifiziert werden ("z.B. Patente, ökonomisch "ex-post"),
- theoretischer Fundierung ("neue Wachstumstheorie", "evolutionäre Ökonomik"),
- Fokus der Arbeiten (Technologiediffusion, makroökonomische Effekte, zeitliche Auftreten der GPTs).

Für die vorliegenden Fragestellungen sind v.a. die Kriterien und Methoden zur Identifikation von besonderem Interesse.

So definieren Lipsey et al. (2005) vier zentrale Kriterien, die eine Technologie erfüllen muss, um als "General Purpose Technology" zu gelten:

- Potenzial für Verbesserung und Leistungssteigerung (scope for improvement),
- große Anzahl verschiedener Anwendungsbereiche (range of use),
- große Vielfalt verschiedener Produkte und Prozesse (variety of use),
- starke Komplementaritäten zu anderen Technologien (complementarities).

Andere Charakterisierungen sind recht ähnlich (Jovanovic und Rousseau, 2005). Der wichtigste Unterschied zwischen verschiedenen Arbeiten liegt darin, inwieweit die Relevanz im Sinne gesamtwirtschaftlicher Bedeutung bereits ein entscheidendes Auswahlkriterium für GPTs ist (Helpman 1998) oder ob die wirtschaftlichen Effekte erst Teil der Analyse von GPTs sind – wie bspw. bei Lipsey et al. (2005) und diese zunächst stärker nach ihrem Querschnittscharakter ausgewählt werden.

Unterschiedliche Betrachtungszeiträume, Aggregationsebene bei Technologien, Bedeutungsbeimessung und Methoden zur Einschätzung der Relevanz der Technologien (Ökonometrie, Patent-

messung, qualitative Fallstudien) führen zu unterschiedlichen Einschätzungen, welche Technologien GPTs sind und wie viele es in der Vergangenheit gab. Andere Autoren konzentrieren sich in ihrer Analyse häufig auf eine GPT, bspw. der Elektrifizierung oder IKT (Hall und Trajtenberg 2004; Lipsey et al. 2005; Moser und Nicholas 2004; Petralia 2020; Ruttan 2008).

Analog stellt sich die Frage, welches die aktuell sich noch in der Entwicklung befindenden GPTs sind und mit welcher Methodik diese identifiziert werden können. So werden neben dem klassischen Fall einer "General Purpose Technology", IKT-Technologien, zunehmend ausgewählte digitale Technologien (z.B. AI, Big Data usw.) sowie Nanotechnologie und Biotechnologie in der Literatur diskutiert und analysiert (Aithal und Aithal 2018; Bekar et al. 2018; Graham und Iacopetta 2009; Kane 2017; Lipsey et al. 2005; Wydra 2010). Dabei kann vereinfachend zusammengefasst werden, dass diese Technologien meist als GPTs eingeschätzt werden, da eine Reichweite in verschiedene Wirtschaftssektoren, Potenziale zur Leistungssteigerung und Komplementaritäten mit Technologien durchaus zumindest qualitativ dargestellt werden können. Allerdings erfolgen auch Einschränkungen, v.a. im Vergleich von Nano- und Biotechnologie zu IKT, das wirtschaftliche Leistungspotenzial(~relevanz) und Spillover-Effekte zwischen Anwendersektoren betreffend. So werden die wirtschaftlichen Effekte von Bio- und Nanotechnologie als deutlich geringer eingeschätzt, und tendenziell sind dort Synergien zwischen einzelnen Anwendungen und Sektoren geringer (Aithal und Aithal 2018; Lipsey et al. 2005; Wydra 2010). Für den kommerziellen Einsatz von Anwendungen in zusätzlichen Sektoren sind häufig erheblich zusätzliche Forschungs- und Marktvorbereitungsmaßnahmen erforderlich und Spillover oder Skaleneffekte zwischen Sektoren eher gering. Dies sind aber Aspekte die nicht zwingend in allen Definitionen von entscheidender Relevanz sind.

Identifizierung von Schlüsseltechnologien in der Innovations-/Wirtschaftspolitik

Die Hervorhebung der Bedeutung und die besondere Förderung einzelner oder einiger ausgewählter Schlüsseltechnologien spielt in der nationalen und internationalen Innovationspolitik schon lange eine bedeutende Rolle. Dazu gehört insbesondere Förderung der Mikroelektronik – aber auch die Telekommunikation und die Biotechnologie – in den 1980er und 1990er Jahren (Gerybadze 2015). Dabei ergeben sich je her enge Verknüpfungen zur Industriepolitik, da die Förderungsmechanismen über reine (meist unumstrittene) Forschungsförderung hinausgehen.

Europäische Förderpolitik

In der europäischen Förderpolitik fand durch die Ende der 2000er Jahre erfolgte Einführung der sogenannten "Key Enabling Technologies" (KETs) als bedeutenden Schwerpunkt eine stärker gebündelte Betrachtung verschiedener Schlüsseltechnologien statt. Dieser Förderfokus wurde im Jahr 2009 in einer Mitteilung der EU-Kommission (Europäische Kommission 2009) bekanntgegeben und in den Folgejahren präzisiert (Europäische Kommission 2012). Schlüsseltechnologien sind danach gekennzeichnet als "wissensintensiv und durch hohe FuE-Intensität, schnelle Innova-

tionszyklen, hohen Kapitalaufwand sowie hochqualifizierte Arbeitskräfte ... Sie ermöglichen Innovationen bei Prozessen, Waren und Dienstleistungen und sind von systemischer Bedeutung für die gesamte Wirtschaft." (Europäische Kommission 2009). Damit wird besonders der Querschnitts- und "enabling" Charakter der Technologien herausgehoben, in dem Sinne, dass die Technologien neue Innovationen in einer Vielzahl von Anwendungen ermöglichen. Der volkswirtschaftliche Mehrwert soll jeweils weit über die Wertschöpfung des technologieproduzierenden Sektors hinausgehen und sich in zahlreichen Anwendersektoren zeigen. Insgesamt wurden sechs Schlüsseltechnologien identifiziert:

- Mikro-/Nanoelektronik,
- Nanotechnologie,
- Photonik,
- fortschrittliche Fertigungstechnologien,
- Materialwissenschaften,
- industrielle Biotechnologie.

Tendenziell zeigt sich eine hohe Bedeutung der Elektronik und auch einigen Überschneidungen zwischen den Technologien. Nicht selten werden auch mehrere diese Technologien in einem Innovationsprozess angewendet. Beispielsweise ist die Nanophotonik eine wichtige Disziplin in der Photonikforschung, die sich mithilfe der Nanotechnologie auf neue photonische Materialien konzentriert (Butter et al. 2014). Folglich spielen hier Photonik, Materialwissenschaften und Nanotechnologie zusammen. Gemeinsam haben die Technologien – wie in der Kriteriensetzung beabsichtigt – die hohe FuE-Intensität und einen hohen Kapitalaufwand, der zwar nicht in gleichem Maße auftritt – bei der Mikro-/Nanoelektronik liegen Neuinvestitionen bei Anlagen im deutlichen Milliardenbereich – aber auch bei den anderen Technologien oft eine entscheidende Hürde darstell(t)en (Wydra 2011).

Wie in Kapitel 6 genauer erläutert wird, erfolgte die Umsetzung insbesondere im Forschungsrahmenprogramm "Horizont 2020" und die Nennung der KETs als "Investment Priorities 2014-20" des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (ERDF).

Wenngleich diese Schlüsseltechnologien eine signifikante Bedeutung in der Förderpolitik und in Akteursgruppen bekamen, war die Auswahl dieser sechs Technologien nicht unumstritten. Beispielsweise wurde früh kritisiert, dass die Schlüsseltechnologien zu wenig die Digitalisierung, beispielsweise die Softwareindustrie berücksichtigen (Information Society Technologies Advisory Group (ISTAG) 2012). Berechnungen des Key Enabling Technologies Observatory zeigten zudem, dass die relative Bedeutung der Technologien recht unterschiedlich war, so konnten v.a. der Nanotechnologie und der industriellen Biotechnologie deutlich geringere Produktionsvolumina und Beschäftigung zugerechnet werden (van Velde et al. 2015). Diese genannten Hintergründe dürften auch wichtige Erklärungsgründe für die Vorschläge einer von der Generaldirektion DG Research eingesetzten Arbeitsgruppe "Independent High Level Group on industrial technologies"

sein (Europäische Kommission. 2018). Diese schlagen eine neue, umfassendere Definition von KETs vor, die auf den folgenden vier Kriterien basiert: Impact, Relevanz, Schlüsselkapazität und "Enabling Power". Diese sind ähnlich wie in der ursprünglichen Liste von 2009, betonen aber stärker die Höhe des Impacts und weniger Eigenschaften wie die Kapital- oder FuE-Intensität.

Dabei wurden

- mit künstlicher Intelligenz und "Security and Connectivity" zwei neue Technologiebereiche hinzugefügt,
- Material- und Nanotechnologie sowie Photonik und Mikroelektronik jeweils in eine größere, übergreifende Kategorie überführt,
- industrielle Biotechnologie von Lebenswissenschaften abgelöst und damit deutlich verbreitert (nun inkl. Biomedizin, Analytik, Agro-Biotechnologie).

Folglich wurden digitale Technologien stärker berücksichtigt. Es wurden keine Technologien gestrichen, dafür aber in einen größeren Kontext gestellt, damit eine ähnliche Bedeutung/Ebene zwischen diesen Technologien erreicht wird. Diese Liste der Schlüsseltechnologien scheint aber bislang einen weniger expliziten Stellenwert und eine geringere Verbreitung innerhalb der Europäischen Kommission insgesamt zu haben.

Zudem ist in der Programmstruktur von Horizon Europe nun keine explizite Säule mehr für Schlüsseltechnologien vorgesehen, sondern deren Förderung erfolgt innerhalb der Missionen und gesellschaftlichen Herausforderungen.

Nationale Aktivitäten in Schlüsseltechnologien

In Deutschland erfolgte wie in vielen anderen europäischen Ländern keine explizite Schlüsseltechnologien-Strategie oder ein expliziter Fokus auf die genannten Technologien. Vielmehr hat eine immer stärkere Missionsorientierung der Politik stattgefunden, bei der insbesondere mit der High-tech-Strategie v.a. Technologie-/themenübergreifenden Initiativen/Strategien gebündelt wurden (u.a. Industrie 4.0 im Kontext der Produktion). Darüber hinaus finden sich einige der genannten Themen in folgenden übergreifenden Strategiedokumenten der Bundesregierung:

- der Digitalisierungsstrategie (BMBF 2019),
- den Aktivitäten zu einer Materialdachstrategie,
- der Bioökonomiestrategie (Bundesregierung 2020).

Ein weiterer Begründungszusammenhang zur bevorzugten Förderung bestimmter Technologiefelder entsteht im Rahmen der Diskussion um technologische Souveränität. So hat das BMBF Anfang 2021 ein Impulspapier "Technologisch souverän die Zukunft gestalten" veröffentlicht (BMBF 2021). Darin werden eine Reihe von Leitinitiativen und Technologien aufgeführt, bei denen eine stärkere technologische Souveränität erreicht werden soll. Zur Einordnung bzgl. der obigen Ausführungen zu Schlüsseltechnologien ist anzumerken, dass die Themen z.T. auf etwas detaillierterer

Ebene als die obigen Betrachtungen benannt sind und der Querschnittscharakter ein wenig entscheidendes Kriterium ist. Stattdessen wird beispielsweise die Notwendigkeit der Abdeckung der gesamten Wertschöpfungskette hervorgehoben.

Daneben gibt es innerhalb oder auch zwischen Technologiebereichen stets nationale und internationale Diskussionen, wie bestimmte Technologien definiert und vorangetrieben werden. Beispielsweise gibt es eine Diskussion über die Konvergenz von Technologiebereichen. Der Begriff konvergierender Technologien wurde in der National Science Foundation (NSF, USA) bereits 2002 unter dem Aspekt der Verbesserung bzw. Optimierung der Leistungsfähigkeit des Menschen eingeführt und geprägt (mit Blick auf die Konvergenz zwischen Nano-, Info-, Kogno-, und Biotechnologien). Insbesondere wird aktuell die Konvergenz von Lebenswissenschaften, Produktionstechnik und Informationstechnik unter den Begriffen "Biologisierung, Biologische Transformation, BioIntelligenz" diskutiert, der Entwicklung von Produkten oder Problemlösungen mithilfe der Lebenswissenschaften unabhängig von deren Rohstoffbasis diskutiert. Allerdings handelt es sich bei diesen Gedanken zum Großteil noch um Erwartungen zukünftiger Entwicklung, für die sich aktuell nur bedingt empirische Belege identifizieren lassen (Wydra et al. 2021).

Kapitel 1 - Fazit für die vorliegende Studie

Insgesamt zeigt sich sowohl in der europäischen und nationalen Politik als auch in der wissenschaftlichen Literatur, dass in der politischen Förderung der explizite Fokus auf Schlüsseltechnologien als Selbstzweck allmählich durch das allgemeinere Paradigma der Missionsorientierung abgelöst wird. Dessen ungeachtet bleibt die Technologieförderung und der Fokus auf einige als besonders relevant erachteten Schlüsseltechnologien weiterhin von hoher innovations-/wirtschaftspolitischer Bedeutung.

Grundsätzlich besteht ein ähnliches Verständnis bei der wissenschaftlichen Literatur als auch in der Politik bzgl. Schlüsseltechnologien. Dies beinhaltet, dass eine Reihe von Technologien eine besondere Bedeutung für die Wirtschaft und gesellschaftliche, politische Herausforderungen besitzt sowie spezifische Rahmenbedingungen für die Entfaltung der Potenziale benötigt werden und daher im besonderen Fokus der Innovations- und Wirtschaftspolitik liegen. Unterschiedliche Ansichten liegen sowohl innerhalb der wissenschaftlichen Literatur als auch im Zeitverlauf der politischen Aktivitäten darin, wie bedeutend das Kriterium der potenziellen Relevanz angesehen wird (im Sinne zu erwartender Größeneffekte bzgl. Wirtschaft und Gesellschaft) und auf welcher Aggregationsebene (Digitalisierungstechnologien vs. KI, Big Data usw.) Schlüsseltechnologien definiert werden. In der wirtschaftspolitischen Debatte spielt teilweise zusätzlich die Frage eine Rolle, ob es sich zwingend um Querschnittstechnologien handeln soll. Dies wird in der wissenschaftlichen Literatur bejaht, die ausschließlich solche Technologien unter GPTs betrachtet. Daneben spielen politische Erwägungen und Interessen bei der Festlegung der Schlüsseltechnologien eine Rolle. Regelmäßig haben beispielsweise Expertengruppen aus Forschung und Industrie eine

teilweise bedeutende begleitende Rolle bei der Festlegung eingenommen. Eine vorlaufende, evidenzbasierte Bewertung und Einordnung, z.B. auf Grundlage eines auf quantitativen Indikatoren basierenden Vergleichs zwischen potenziellen Schlüsseltechnologien, wurde demgegenüber nach dem Kenntnisstand der Autoren dieses Berichts bislang nie durchgeführt.

Bei der Zuordnung von Technologien zeigt sich, dass nicht eine Technologie oder eine Technologiegruppe (z.B. IKT) den (Förder-)Diskurs beherrscht, sondern eine Reihe von verschiedenen Feldern im Vordergrund steht (Abbildung 1). Dabei unterscheiden sich die als "Schlüsseltechnologien" bezeichneten Bereiche auch dahingehend, ob es sich um Einzeltechnologien oder ganze Felder handelt. Viele der gängigen Feldbezeichnungen wie "Advanced Manufacturing" oder "Advanced Materials" sind dabei vergleichsweise unkonkret und lassen sich insgesamt nur begrenzt trennscharf abgrenzen. Folglich ist das Konzept der Schlüsseltechnologien variabel sowohl hinsichtlich der spezifischen Technologien, die es zu einem gegebenen Zeitpunkt erfasst, als auch im Hinblick auf die gesamtwirtschaftliche Rolle, die diesen Technologien zugemessen wird.

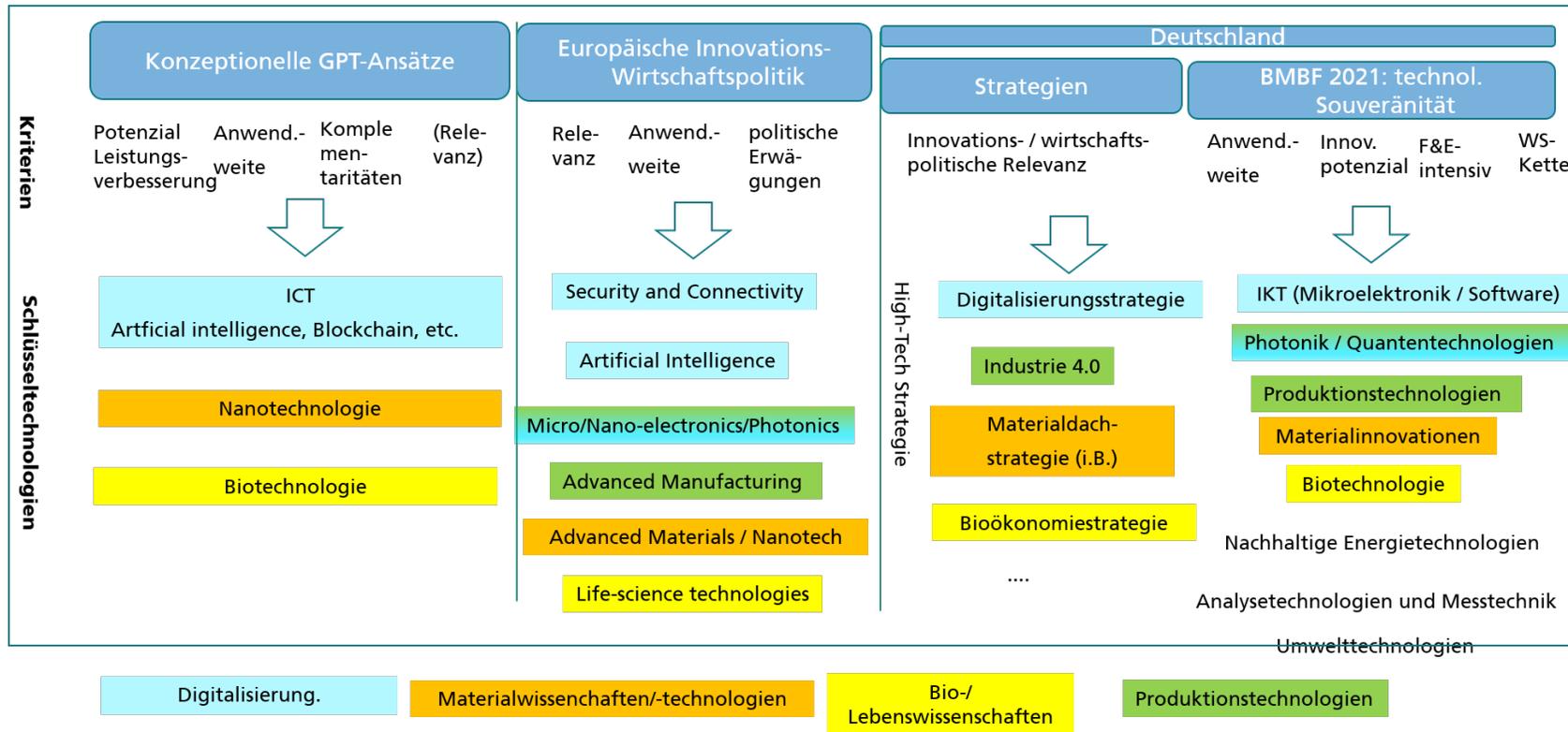
Im Rahmen dieser Studie werden die verschiedenen Arten der Technologien und unterschiedlich tangierten Wirtschaftssektoren/-aktivitäten aufgegriffen. Dabei erfolgt ein Fokus v.a. auf Querschnittstechnologien mit einer hohen Anwendungsvielfalt, daher werden Energietechnologien nicht näher betrachtet. Ebenso wird der national durchaus häufig hervorgehobene Bereich der Nachhaltigkeitsinnovationen nicht explizit vertieft, da diese sich aus verschiedenen Technologiearten (IKT, Material-Produktionsinnovationen, Innovationen in der Biologie) vereinen; stattdessen werden sie hier explizit als Teil dieser inbegriffen. Um gleichzeitig das Kriterium der Relevanz in die Auswahl tendenziell mit einfließen zu lassen, werden Gruppen von Schlüsseltechnologien betrachtet, um auf eine ungefähr ähnliche Betrachtungsebene zu gelangen. Konkret ergibt sich die Einteilung in folgende Gruppen (siehe Abbildung 2):

- Technologien für die Digitalisierung, mit ihren Unterbereichen
 - Mikroelektronik,
 - Künstliche Intelligenz,
 - Internet of Things,
 - Sicherheit und Konnektivität,
 - Big Data,
 - Digitale Mobilitätstechnologien.
- Materialwissenschaften/-technologien, mit ihren Unterbereichen
 - Neue Werkstoffe,
 - Nanotechnologie.
- Technologien für Bio-/Lebenswissenschaften, mit ihren Unterbereichen
 - Biotechnologie,
 - Technologien für die Bioökonomie.

- Neuartige Produktionstechnologien, mit ihren Unterbereichen
 - fortschrittliche Produktionstechnologien.
 - Robotik,
 - Photonik.

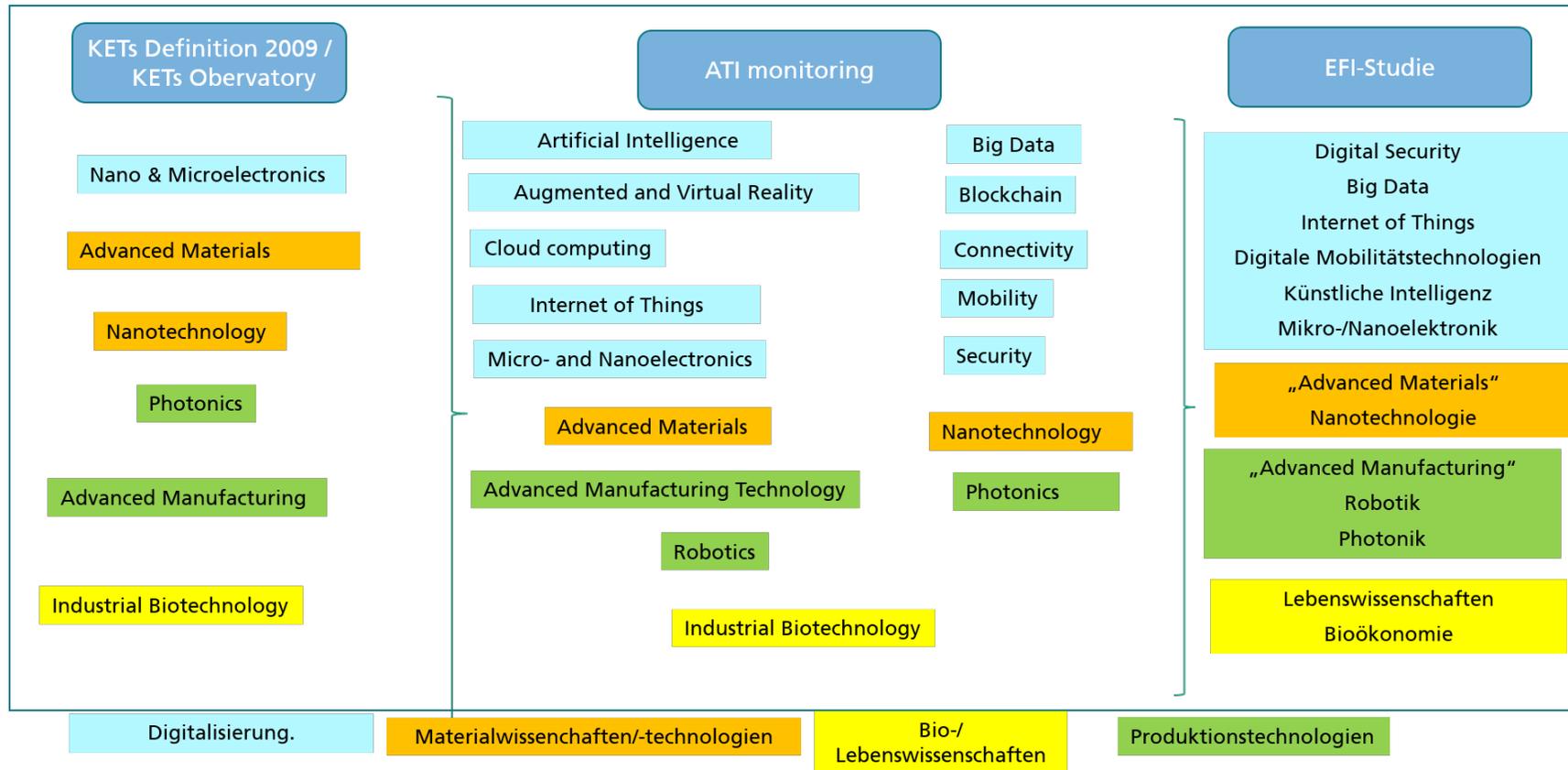
Eine konkrete Beschreibung, welche Entwicklungen innerhalb dieser einzelnen Schlüsseltechnologien empirisch gefasst werden, befindet sich im Anhang.

Abbildung 1: Kriterien und ausgewählte Schlüsseltechnologien in konzeptionellen und politischen Ansätzen



Quelle: Fraunhofer ISI auf Basis der im Text zitierten Literatur

Abbildung 2: Ausgewählte Schlüsseltechnologien in bisherigen Monitorings sowie der vorliegenden Studie



Quelle: Fraunhofer ISI auf Basis von Europäische Kommission, 2009 und <https://ati.ec.europa.eu/>

2 Validierung des Schlüsseltechnologiecharakters ausgewählter Technologiebereiche

Wie im vorherigen Kapitel dargestellt, werden als "Schlüsseltechnologien" konzeptionell tendenziell jene Technologien bezeichnet, auf die folgende Eigenschaften zutreffen:

Potenzielle Nutzbarkeit in einer Vielzahl von Branchen

Diese Eigenschaft ist schon begrifflich zentral für die Bezeichnung einer Technologie als "General Purpose Technology", sie ist v.a. relevant, weil erst eine solche Breitenwirkung rechtfertigt, einer Technologie besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Um den konkreten "Schlüssel"-Charakter einer Technologie einordnen zu können, ist es darüber hinaus wichtig zu verstehen, ob es sich bei der genannten "Technologie" um ein technologisch eher breites Feld handelt, aus dem sich in natürlicher Weise unterschiedliche Anwendungen ergeben, oder tatsächlich um eine konkrete, spezifische Technologie, die sich rasant verbreitet.

Überdurchschnittliche Wachstumsdynamik

Diese Eigenschaft wird zwar in der Literatur oft nicht explizit thematisiert, jedoch in fast allen Diskussionen implizit vorausgesetzt. Insbesondere aus innovationspolitischer Sicht zielt die Ausweisung von Schlüsseltechnologien naturgemäß nicht auf die Identifizierung jener Technologien, die bereits seit Jahrzehnten breite Anwendung finden, sondern auf jene, die sich zurzeit dynamisch verbreiten bzw. bei denen eine solche Verbreitung vermutlich bevorsteht. Gesucht wird nach neuen Technologien, die für aktuelle Transformationen in Wirtschaft und Gesellschaft von entscheidender Bedeutung sind.

Wie einleitend dargestellt, handelt es sich allerdings bereits beim grundlegenden Ansatz der "Schlüsseltechnologie" und mehr noch bei den aus ihm abgeleiteten Katalogen konkreter Technologiefelder stets auch um politisch getriebene Konzepte. Zudem unterschieden sich technologische Domänen und Anwendungsfelder oft auch faktisch erheblich.

Aus beidem ergibt sich, dass eine Identifizierung als "Schlüsseltechnologie" meist auf Basis einer Kombination unterschiedlicher Argumente und darüber hinaus oft auch begrifflich nicht vollständig trennscharf erfolgt. Im Ergebnis weisen die verschiedenen Technologien eine sehr unterschiedliche Breite auf und konkrete "Schwellenwerte" für eine Bezeichnung als Schlüsseltechnologie sind kaum sinnvoll festzulegen. In der Praxis ist der Begriff der "Schlüsseltechnologie" somit ein inhomogen definiertes Konzept, das sowohl sehr konkrete, spezifische Technologien (Künstliche Intelligenz) als auch eher breite Technologiebereiche (fortschrittliche Produktionstechnologien) bezeichnen kann.

Um die folgenden Analysen dieses Berichts einordnen und qualifiziert Schlussfolgerungen ziehen zu können, ist es daher zunächst entscheidend, zu bestimmen, in welchem Umfang konzeptionell zugewiesene Eigenschaften auf die üblicherweise als Schlüsseltechnologien bekannten Felder tatsächlich zutreffen.

Technologische Breite und Breite des Ursprungs aus verschiedenen Sektoren

Wie oben dargestellt ist es zunächst erforderlich, zu klären, inwieweit sich der Einsatz der als Schlüsseltechnologien bekannten Felder über Branchen hinweg verteilt sind und als wie technologisch spezifisch sich die einzelnen Felder darstellen.

Methodisch ist es dabei zzt. nicht möglich, den konkreten Einsatz einzelner Technologien im Unternehmenssektor abzubilden, dies könnte nur auf Basis breit angelegter Befragungen geschehen. Stattdessen kann allerdings nachvollzogen werden, aus welchen Branchen sich Unternehmen an der Entwicklung entsprechender Technologien beteiligen.

Dies ist dabei auch konzeptionell die u.U. relevantere Perspektive, da sie deutlich macht, inwiefern eine neue Technologie dabei ist, in unterschiedlichen Sektoren zum Kernelement der Produkt- und Prozessentwicklung zu werden. Postuliert werden kann, dass v.a. Technologien, die in dieser Weise tief in verschiedene Innovationsprozesse eingebettet und integriert werden, das Potenzial haben, einen nachhaltigen, transformativen Effekt auf das gesamte Innovationssystem zu entwickeln.

Darüber hinaus lässt sich – über gemeinsame Patentklassifizierungen – zeigen, in welcher Weise Technologien eines Schlüsseltechnologie-Bereichs schon in ihrer Genese unterschiedlichen, technologischen Domänen zugeordnet werden, und damit auch potenziell Teil unterschiedlicher, sich überschneidender Entwicklungsdynamiken sind. So lässt sich zeigen, ob die Bezeichnung eines Schlüsseltechnologie-Bereichs trennscharf auf eine Technologie verweist, oder verschiedene Entwicklungsstränge subsumiert.

Ziel der folgenden Analyse ist es, die für diesen Bericht ausgewählten Technologiefelder entsprechend dieser beiden Breitendimensionen einzuordnen und zu gruppieren.

Technologiegruppen

Insgesamt lassen sich auf Grundlage der obenstehenden Analysen folgende Gruppen von Schlüsseltechnologien unterscheiden:

Technologisch unspezifische, in diversen Branchen entwickelte Technologien

Zu diesen Technologien zählen v.a. fortschrittliche industrielle Technologien wie Robotik, Photonik, Advanced Manufacturing, Internet of Things sowie die Materialtechnologien. Sie sind technologisch komplex bzw. bilden generische Oberbegriffe für eine Reihe spezifischer Einzeltechnologien. Ihre Entwicklung wird in verschiedenen Branchen vorangetrieben. Auch die technologisch etwas spezifischer gefassten Bereiche Bioökonomie und Digitale Mobilitätstechnologien gehen von einer überdurchschnittlichen Anzahl von Branchen aus.

Im Zeitverlauf zeigt sich bei Advanced Manufacturing Technologien und Robotik ab Ende der 2000er Jahre eine gewisse Verbreitung des sektoralen Ursprungs, bei Robotik zusätzlich noch einmal am aktuellen Rand. In den Bereichen Internet of Things bzw. Photonik wurde der jeweilige

sektorale Ursprung dagegen im Zeitverlauf merklich spezifischer. Im Feld Advanced Materials wurden dagegen ab Mitte der 2000er Jahre leichte Verbreitungstendenzen erkennbar.

Technologisch spezifische, in diversen Branchen entwickelte Technologien

Zu diesen Technologien zählen v.a. neue digitale Technologien, wie Big Data, Künstliche Intelligenz und digitale Sicherheitstechnologien. Sie sind technologisch sehr spezifisch, auch ihre Entwicklung wird allerdings mittlerweile in verschiedenen Branchen vorangetrieben, d.h. lässt sich nicht einem Wirtschaftszweig allein zuordnen.

Im Bereich Künstlicher Intelligenz setzte eine Verbreiterung des sektoralen Ursprungs bereits ab Mitte der 2000er Jahre ein, während dies im Bereich der Digitalen Sicherheitstechnologien erst ab Mitte der 2010er Jahre der Fall war. Die Anzahl Branchen, in denen Neuerungen im Bereich Big Data entwickelt werden, hat sich dagegen im Zeitverlauf nicht nachhaltig verändert.

Technologisch spezifische Technologien mit ausgeprägtem Branchenfokus

Bei diesen Technologien handelt es sich um technologisch vergleichsweise eng umrissene Felder wie die Biotechnologie und die Lebenswissenschaften, aber auch die klassische Mikroelektronik. Neben ihrem klaren technologischen Fokus findet zumindest ihre Entwicklung in aller Regel nur in ausgewählten Sektoren statt.

Zwar hat sich die sektorale Spezifität von Biotechnologie und Lebenswissenschaften ab Mitte der 2000er Jahre etwas verringert, sie bleibt aber dennoch ausgeprägter als in anderen Technologiebereichen. Im Bereich Mikroelektronik deutete sich zwischen Mitte der 2000er und Mitte der 2010er Jahre eine Verbreiterung an, die sich in Folge aber wieder umkehrte, und auf die Kernbranche fokussierte.

Technologisch unspezifische Technologien mit ausgeprägtem Branchenfokus

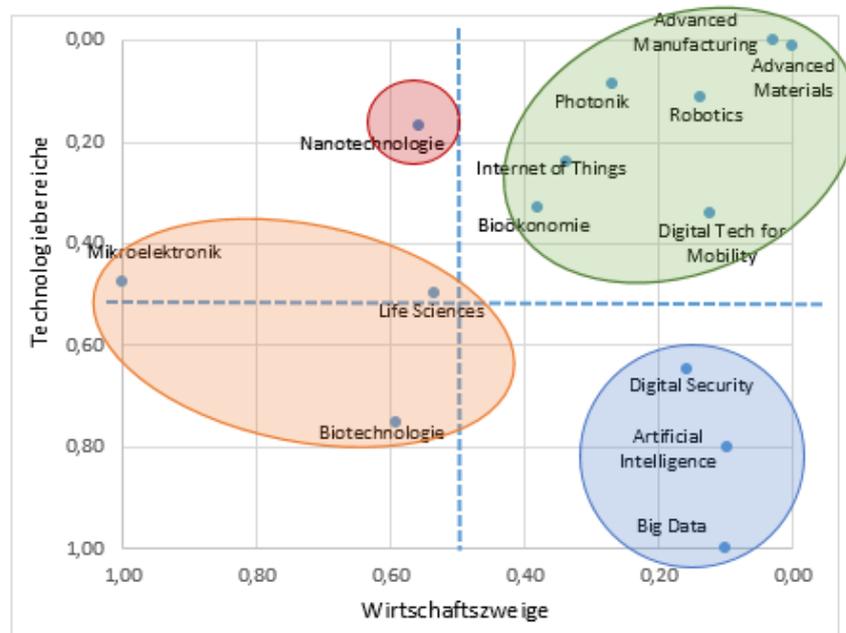
Einen Sonderfall stellt die Nanotechnologie dar. Sie erstreckt sich zwar technologisch über unterschiedlichste (Anwendungs-)Bereiche, entsprechende Entwicklungen, die spezialisierte Kompetenzen erfordern, gehen aber ebenso wie bei den letztgenannten Technologien ganz überwiegend von wenigen, ausgewählten Sektoren aus, was sich auch im Verlauf der letzten 20 Jahre nicht wesentlich verändert hat.

Grundsätzlich sind hinsichtlich der Verteilung der untersuchten Schlüsseltechnologien über Technologiefelder und Branchen folgende zentrale Punkte festzustellen

Die technologische Spezifität der Technologien übersteigt in den meisten Fällen ihre Spezifität hinsichtlich ihrer Ursprungsbranchen, insgesamt sind im Zeitverlauf deutlich weniger Dynamiken zu beobachten, als sich dies mit Blick auf ihre dynamische Entwicklung grundsätzlich hätte vermuten lassen, dies gilt insbesondere für neue, digitale Technologien.

Die technologische Spezifität der untersuchten Technologiebereiche nimmt im Zeitverlauf eher zu (Ausnahme: Photonik), während ihre Spezifität hinsichtlich ihrer Ursprungsbranchen im Zeitverlauf eher abnimmt (Ausnahme: Technologien vormals sehr engen Ursprungs sowie einige Digitaltechnologien).

Abbildung 3: Spezifität und Branchenfokus der Technologiebereiche (2018)



Anmerkung: Indexierte Werte, genormter HHI, höchster Wert=1, niedrigster Wert=1

Quelle: Eigene Analyse auf Basis von EPO PATSTAT und BvD ORBIS

Inhaltlich erscheinen diese Ergebnisse als passfähig mit der in der Literatur entwickelten "Ambidexterity"-Hypothese, die auf die Arbeiten von Tushman und O'Reilly (1986) zurückgeht und besagt, dass in Unternehmen explorative als auch exploitative Prozesse von Bedeutung sind und einen Trade-off zwischen explorativer und exploitativer FuE angestrebt werden sollte (Tushman und O'Reilly 1986, Benner und Tushman 2002; 2003). Exploration bezeichnet dabei die Schaffung neuer Möglichkeiten durch die Entwicklung bislang unbekanntes Wissens, während Exploitation auf die Nutzung bestehenden Wissens verweist (Vogel 2011). Unternehmen sollten, laut gängiger Meinung, sowohl über explorative als auch über exploitative Fähigkeiten verfügen. Auf Basis dieser These lassen sich Ableitungen zu den in Abbildung 3 dargestellten zeitlichen Trends bei der Entwicklung der Streuung der Patente über Wirtschaftszweige und Technologiebereiche treffen. Dabei deutet die zunehmende Streuung der Patente über die Wirtschaftszweige, die empirisch für fast alle Schlüsseltechnologien belegt werden kann, auf exploitative Prozesse hin, d.h. dass gewonnene Erkenntnisse aus bestimmten Technologien über verschiedene Wirtschaftszweige hinweg diffundieren. Umgekehrt kann die zunehmende Streuung der Patente über die Technologiebereiche (bzw. konkreter IPC-Klassen) als explorativen Prozess gedeutet werden, im Sinne einer

Suche nach neuen Erkenntnissen auf Basis einer (Re-)Kombination von Wissen aus unterschiedlichen Technologien.

Trends und Dynamiken

Entsprechend der vorlaufenden Erläuterungen sollten als relevante Schlüsseltechnologien v.a. solche in die Betrachtung einbezogen werden, für die sich dynamische Entwicklungen identifizieren lassen. Kaum als Schlüsseltechnologie betrachtet werden demgegenüber jene Technologien, die schon seit längerem weit verbreitet sind. Dessen ungeachtet lassen sich durchaus unterschiedliche Dynamiken identifizieren, die besondere politische Aufmerksamkeit für einen spezifischen Technologiebereich rechtfertigen können.

- In einigen Technologiebereichen besteht bereits seit einiger Zeit eine technologische Wachstumsdynamik oberhalb des globalen, themenübergreifenden Mittelwerts,
- In einigen Technologiebereichen folgt auf einen ersten Wachstumsimpuls eine Phase wenig dynamischer Entwicklung, bevor erneut Wachstum einsetzt (Double-Boom¹),
- In noch emergenten Technologiebereichen zeigt sich eine Dynamik oft zunächst im wissenschaftlichen und erst nachfolgend im technologischen Bereich,
- Bei genuin disruptiven, wirtschaftsgetriebenen Technologien gehen aktuell starke, fast exponentielle Dynamiken in Wissenschaft und Technologie Hand in Hand.

Wie bereits hinsichtlich des Streuungsgrads gilt, dass sich auch mit Blick auf die Dynamik der beobachteten Entwicklungen keine klaren Schwellenwerte dafür festlegen lassen, ob sich ein bestimmter Bereich als Schlüsseltechnologie bezeichnen lässt oder nicht. Stattdessen ist es von zentraler Bedeutung, sich die diesbezüglich zwischen den Technologiebereichen bestehenden Unterschiede zu vergegenwärtigen und bei der Interpretation folgender Analysen zu berücksichtigen.

Einordnung und Bewertung der Technologiebereiche im Hinblick auf typische Charakteristika von Schlüsseltechnologien

Zur Analyse relevanter Entwicklungen mit Blick auf die Technologien insgesamt werden verschiedene Betrachtungsperspektiven eingenommen.

Erstens wird eine Analyse der Entwicklung des akademischen Publikationsaufkommens in allen in Rede stehenden Technologiebereichen durchgeführt. Betrachtet werden zu diesem Zweck ausschließlich Publikationen, die in der Datenbank *Elsevier SCOPUS* gelistet sind, also ausschließlich akademische Literatur i.e.S., die zudem durch die Prüfung von Journals vor ihrer Listung einer zumindest basalen Qualitätskontrolle unterliegt. Abgebildet werden damit im Rahmen wissenschaftlicher Forschung erarbeitete Erkenntnisse.

¹ Schmoch, U. (2007), Double-Boom Cycles and the Comeback of Science-Push and Market-Pull, *Research Policy* 36(7), 1000–1015.

Zweitens wird eine Analyse des Aufkommens an Patentanmeldungen durchgeführt. Da die Anmeldung geistiger Eigentumsrechte stets markbezogen erfolgt, gibt es für Patente, anders als bei wissenschaftlichen Publikationen, keine eindeutige Referenzbasis. Über die Jahre hat sich allerdings, auch mit dem Ziel der Qualitätssicherung, ein Vorgehen durchgesetzt, dass nur jene Patente erfasst, die entweder über den PCT Prozess der WIPO auf globaler Ebene oder doch mindestens am EPO angemeldet wurden. Dieses als Analyse "transnationaler Patente"² bekannte Verfahren hat sich dabei auch aus technischen Gründen gegenüber dem vorherigen Ansatz der "Triadepatente" durchgesetzt.

Im Hinblick auf die erste Perspektive, die **wissenschaftliche Aktivitäten** ins Zentrum stellt, zeigt sich, dass der Trend in allen vier Bereichen stark ansteigt, ganz so, wie dies für Schlüsseltechnologien zu erwarten wäre. Dennoch bestehen starke Unterschiede zwischen den verschiedenen Bereichen. Im Bereich Digitalisierungs- und Produktionstechnologien, zeigen sich sehr dynamische Verläufe, hier sind die Publikationszahlen in den letzten beiden Jahrzehnten um ca. Faktor sechs angestiegen und liegen damit ca. um Faktor 2,5 über dem globalen Mittelwert. In den Bereichen Materialtechnologien bzw. Bio- und Lebenswissenschaften hat sich die Zahl der Veröffentlichungen dagegen zwar ebenfalls mehr als verdoppelt, die Publikationsdynamik liegt dabei allerdings nicht oberhalb des globalen Trends.

Eine Ausnahmestellung unter den Teilbereichen nimmt seit Anfang der 2000er Jahre der Bereich Internet of Things ein. Viele der Begrifflichkeiten, mit denen entsprechende Publikationen heute identifiziert würden, waren Anfang der 2000er Jahre noch nicht oder kaum in Gebrauch. Die extremen Wachstumsraten erklären sich hier also v.a. aus einer zunächst sehr niedrigen Basis.

Stetig gewachsen sind demgegenüber seit Anfang der 2000er Jahre die Publikationsaktivitäten in den Bereichen Nanotechnologie, Photonik sowie eingeschränkt Mikro- und Nanoelektronik. Ab ca. 2015 entwickelten sich dann neue, relativ deutlich stärkere Dynamiken v.a. in verschiedenen Bereichen der Digitalisierungstechnologien. Im Bereich digitaler Mobilitätstechnologien zeigt sich eine nochmalige Beschleunigung der Dynamik dabei bereits seit ca. 2012/2013, im Bereich Big Data v.a. seit 2017/2018. Beide erzielen innerhalb weniger als fünf Jahren denselben relativen Wachstumsfortschritt, wie jene im Bereich Nanotechnologie und Photonik im Verlauf der letzten beiden Jahrzehnte.

Im Hinblick auf die erste Perspektive, die **technologische Aktivitäten** ins Zentrum stellt, unterscheiden sich die zu identifizierenden Trends etwas weniger eindeutig voneinander, ihre Rangordnung ist allerdings vergleichbar. Eine Ausnahme bildet auch hier der Bereich Bioökonomie und Lebenswissenschaften, in dem nach zunächst sogar absolut rückläufiger Entwicklung erst aktuell

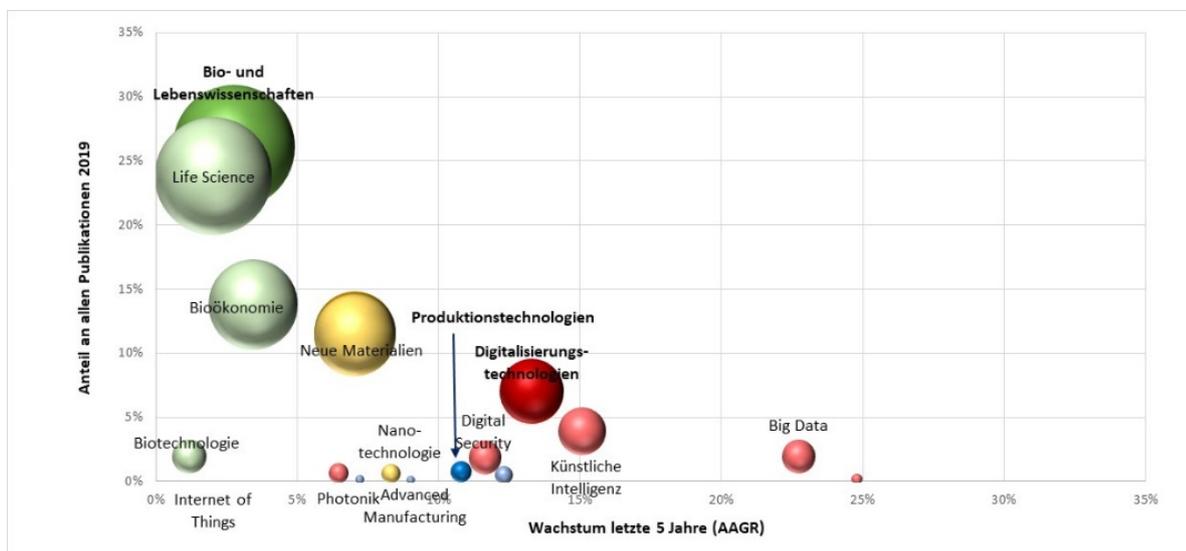
² Frietsch, R., Schmoch, U. (2010): Transnational patents and international markets. *Scientometrics*, 82, 185–200. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0082-2>

wieder das Niveau des Jahres 2000 erreicht wurde. In den drei anderen Bereichen setzt, nach relativer Stagnation im Verlauf der 2000er Jahre, seit ca. 2008/2009 eine dynamische Entwicklung ein, die im Bereich Digitalisierungstechnologien am stärksten ausgeprägt ist, gefolgt von den Produktionstechnologien sowie, mit einigem Abstand, den Materialwissenschaften.

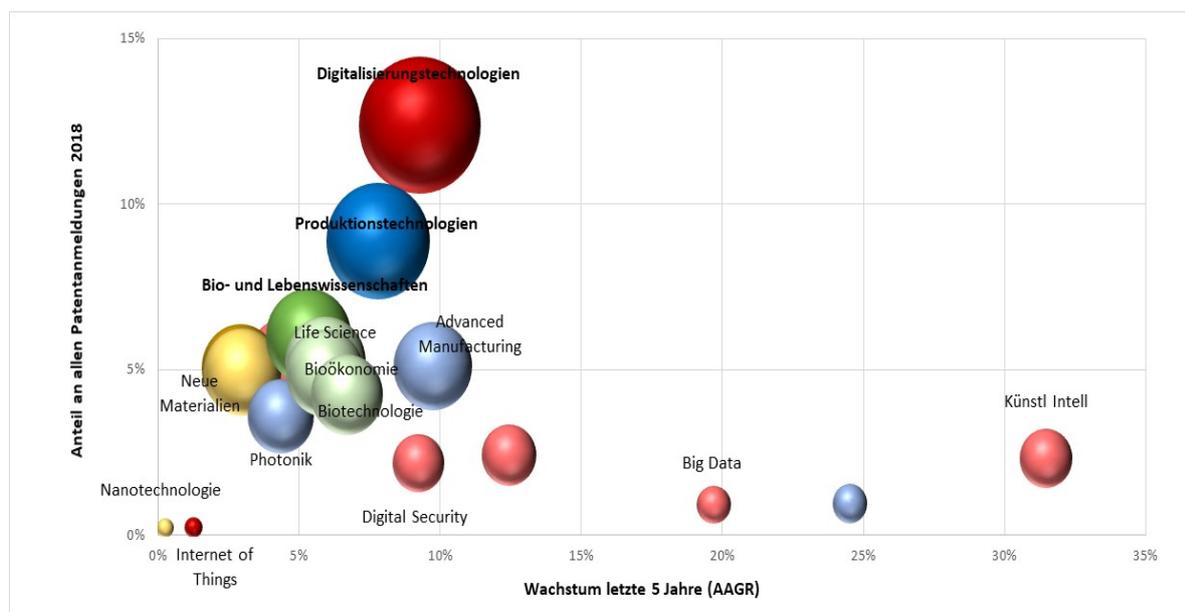
Im Hinblick auf charakteristische Einzelentwicklungen mit Double Boom-Charakter sticht insbesondere der Bereich Nanotechnologie hervor, in dem die Patentanmeldungen bis 2010 dynamisch anstiegen, sich infolge aber nunmehr unterdurchschnittlich entwickeln. Auch die Zahl der im Bereich Internet of Things angemeldeten Patente stieg Mitte der 2000er Jahre zunächst dynamisch an, um dann wieder zurückzugehen und sich bis heute kaum über das Niveau von 2005 hinaus zu erholen. In geringem Maße lassen sich im Bereich der Robotik und digitale Mobilitätstechnologien entsprechende Entwicklungen identifizieren, die durch ihre Zentrierung um das Jahr 2008 allerdings eher kriseninduziert erscheinen.

Mit Blick auf ihre besondere Dynamik v.a. nach 2014/2015 lassen sich vor allen die Bereiche Künstliche Intelligenz und Robotik hervorheben, in denen das Patentaufkommen in kurzer Frist auf das über Sechsfache aufwuchs. Auch die Bereiche Big Data sowie digitale Mobilitätstechnologien zeigen seit Mitte der 2010er Jahre deutlich überdurchschnittliche Entwicklungen und erreichten 2018 das 2,5 bis Dreifache ihres Ausgangswerts aus dem Jahr 2000.

Abbildung 4: Gewicht und Wachstumsdynamik einzelner Felder (Publikationen)



Quelle: Eigene Analyse auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung 5: Gewicht und Wachstumsdynamik einzelner Felder (Patente)

Quelle: Eigene Analyse auf Basis von EPO PATSTAT

Mit Blick auf das Verhältnis von Publikations- und Patentierungsdynamiken zeigt sich im Bereich **Digitalisierungstechnologien** eine aufeinanderfolgende Entwicklung. Während die Publikationsaktivitäten bereits seit 2000 überdurchschnittlich anstiegen, entfaltet sich eine entsprechende Dynamik im Patentbereich erst seit ca. 2014, nachdem sie in der zweiten Hälfte der 2000er Jahre eher im globalen, themenübergreifenden Trend gelegen hatte. Im Bereich **Produktionstechnologien** entwickelten sich die Patentaktivitäten, parallel zu einem überdurchschnittlichen Anstieg der Publikationsaktivitäten, Anfang der 2000er Jahre sogar zunächst weniger dynamisch als im globalen Mittel, was sich allerdings bereits infolge der Wirtschafts- und Finanzkrise 2008 wieder änderte. Im Bereich **Materialwissenschaften** lag das Wachstum in beiden Bereichen selten oberhalb des globalen Durchschnitts, auch das leicht überdurchschnittlich wachsende Publikationsaufkommen zog im Bereich Patentierung bislang noch keine weitere Dynamisierung nach sich. Im Bereich **Bioökonomie und Lebenswissenschaften** schließlich, in dem auch die Entwicklung des Publikationsaufkommens nicht über den globalen Trend hinausgeht, entwickelt sich das Patentaufkommen seit Anfang der 2000er Jahre immer deutlicher unterhalb des globalen Trends. Erst seit etwa Mitte der 2010er Jahre konnte es sich auf einem konstanten, nach wie vor unterdurchschnittlichen Niveau stabilisieren.

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass vor allem die Bereiche Digitalisierungstechnologien und Produktionstechnologien klassische Merkmale sich dynamisch entwickelnder Schlüsseltechnologien aufweisen. Der Bereich Materialwissenschaften entwickelt sich dagegen zzt. eher durchschnittlich, wenngleich es einige Anzeichen dafür gibt, dass sich im Feld der Nanotechnologie eine neue Dynamik abzeichnen könnte. Der Bereich Bio- und Lebenswissenschaften hingegen entwickelt sich, trotz absolut hohem Aktivitätsaufkommen, zzt. eher unterdurchschnittlich. Allerdings wurde der im technologischen Bereich zwischenzeitlich auch absolut negative Trend seit

Mitte der 2010er Jahre mindestens in den USA gebrochen und auch die Patentanmeldungen steigen wieder leicht an. Möglicherweise zeigen sich hier, insbesondere mit Blick auf die Bioökonomie, erste Zeichen einer nachhaltigen Trendwende.

Sinnvoll erscheint darüber hinaus eine Unterscheidung zwischen etablierten Schlüsseltechnologien, in denen sich v.a. in einzelnen Ländern überdurchschnittliche Dynamiken verzeichnen lassen (Materialwissenschaften: Japan, Bio- und Lebenswissenschaften: USA; Produktionstechnologien: Europa), und emergenten Schlüsseltechnologien, die v.a. im digitalen Bereich in fast allen Ländern merkliche Impulse setzen. Letztere wiederum zeigen sich dabei oft am deutlichsten in jungen, aufstrebenden Nationen wie China oder Korea, die etablierten Industriestandorten den Rang ablaufen wollen.

Handelsdaten

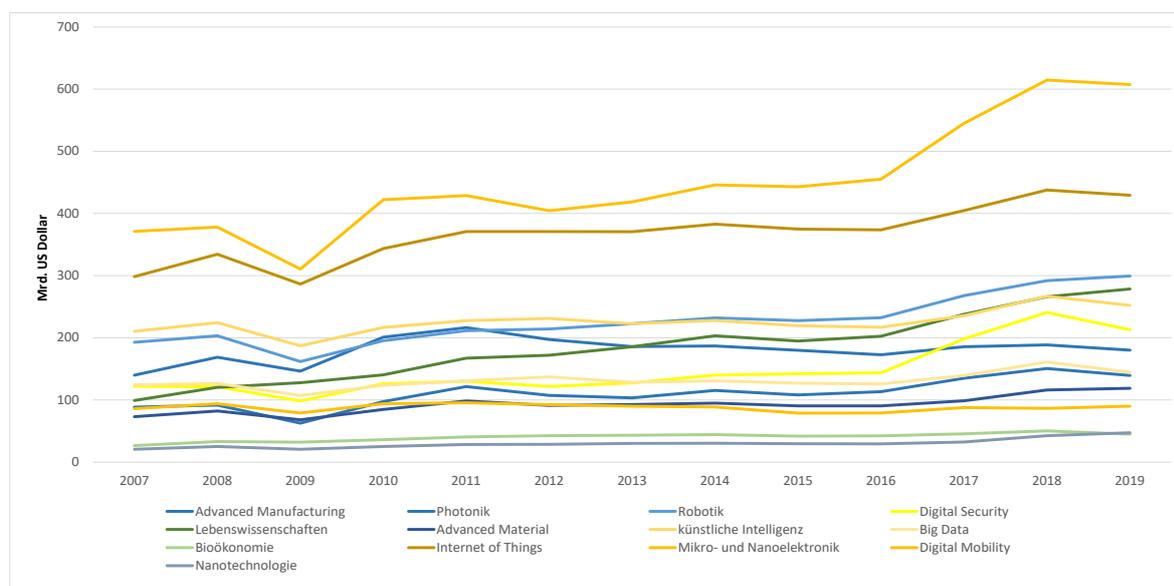
Absolut betrachtet bilden auch mit Blick auf Handelsdaten die digitalen Technologien mit Abstand den größten der vier Technologiebereiche. Der größte Umfang wird hierbei nach wie vor im Bereich allgemeiner Hardwarekomponenten erzielt, d.h. im Feld Mikro- und Nanoelektronik (\$700 Mrd.). Auch im Bereich "Internet of Things" wird allerdings mittlerweile ein erhebliches Handelsvolumen von über \$400 Mrd. erzielt. Im Bereich Produktionstechnologien sind die Handelsvolumina in den letzten Jahren absolut v.a. in den Bereichen Robotik merklich angestiegen, während sie sich in den Bereichen Photonik und Advanced Manufacturing eher stabilisiert haben. Im Bereich Bio- und Lebenswissenschaften konzentriert sich das Wachstum auf den Bereich Bioökonomie, in den traditionellen Lebenswissenschaften bleibt das Exportvolumen eher stabil, wenngleich auf deutlich höherem Niveau. Auch in den Materialwissenschaften blieb das Handelsvolumen in den vergangenen Jahren vergleichsweise gering.

Übergreifend ist festzuhalten, dass das Exportvolumen zwischen 2007 und 2019 in zehn der dreizehn hier betrachteten Einzeltechnologien im Vergleich zum Gesamtexportvolumen überdurchschnittlich gewachsen ist. Insbesondere in den letzten fünf Jahren hat dieses Wachstum stark zugenommen: Während im Jahr 2013 nur drei Technologien ein überdurchschnittliches Wachstumsniveau erzielten, ist dies seit 2014 in der Mehrzahl der Schlüsseltechnologien der Fall. Insbesondere in den Lebenswissenschaften und im Bereich Nanotechnologie haben sich die Güterexporte seit 2007 mehr als verdoppelt. Hierbei ist der Technologiebereich Bio- und Lebenswissenschaften der, relativ betrachtet, am stärksten wachsende der vier Bereiche, der mit einem Exportvolumen von unter \$350 Mrd. im Jahr allerdings absolut nur auf Rang drei liegt. Es folgt der in absoluter Hinsicht wesentlich maßgeblichere Bereich Mikro- und Nanoelektronik.

Im Grundsatz unterstützen somit auch die Handelsdaten das allgemeine Bild dynamischer Entwicklungen in den Bereichen Digitalisierungs- und Produktionstechnologien gegenüber einer geringeren bzw. insgesamt weniger maßgeblichen Dynamik in den Bereichen Bio- und Lebenswissenschaften bzw. Materialwissenschaften.

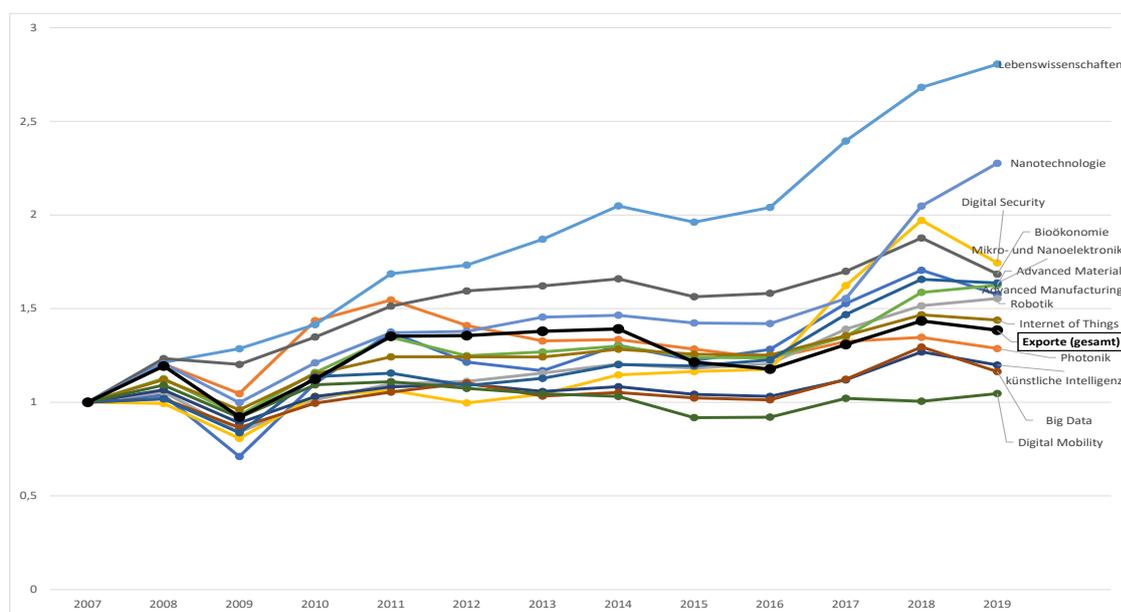
Hinzuzufügen ist allerdings, dass sich der Handel mit schlüsseltechnologierelevanten Gütern im Vergleich zu den wissenschaftlich-technologischen Aktivitäten in diesem Bereich grundsätzlich eher moderat entwickelt hat. Dies ergibt sich methodisch v.a. daraus, dass die hier zugrundegelegten Güterklassen nicht trennscharf "alte" von "neuen" Gütern unterscheiden können ("Mikrochips") womit einer spezifischen Zuordnung damit Grenzen gesetzt sind, andererseits wohl aber auch tatsächlich aus der Tatsache, dass die hier diskutierten neuen Technologien auch grundsätzlich eher Eingang in bestehende Produktionsketten finden, als solche gänzlich neu zu begründen – wie es zur dynamischen Veränderung ganzer Exportsegmente wohl erforderlich wäre.

Abbildung 6: Globales Exportwachstum in den 13 Einzeltechnologien



Quelle: Eigene Analyse auf Basis von UN COMTRADE

Abbildung 7: Globale Exportentwicklung in den 13 Einzeltechnologien (2007=1)



Quelle: Eigene Analyse auf Basis von UN COMTRADE

Kapitel 2 - Fazit für die vorliegende Studie

Der Begriff der Schlüsseltechnologie ist ein variables Konzept, das von einzelnen sehr spezifischen Technologien bis hin zu relevanten Technologiebereichen unterschiedliche Aspekte bezeichnen kann. Die meisten gängigen Kataloge von Schlüsseltechnologien erfassen einzelne Bereiche dabei in unterschiedlichem Zuschnitt, was in Teilen sachlogisch geboten ist, sich aber auch aus politischen Aushandlungsprozessen ergibt. Verschiedene Schlüsseltechnologien sind daher selten strukturell homogen (z.B. "gleich breit") definiert, sodass der ihnen zugeordnete Umfang der Aktivitäten sich in seinem absoluten Umfang notwendigerweise unterscheidet. Grundsätzlich unterscheiden sich die Profile der in dieser Studie analysierten Technologien bzw. Technologiebereiche sowohl hinsichtlich der Streuung der ihnen zugeordneten Patentanmeldungen über verschiedene Klassen als auch hinsichtlich ihres Ursprungs in verschiedenen Klassen teils erheblich.

Allgemein festzuhalten ist allerdings, dass die Mehrzahl der Schlüsseltechnologien nicht in wenigen Branchen allein entwickelt wird, andererseits kann auch von einer industrieweiten Befassung mit relevanten technologischen Entwicklungen keine Rede sein. Über die Zeit ist bei einigen Technologien eine Verbreiterung des sektoralen Ursprungs zu erkennen, die nicht selten mit einer Schärfung des Technologieprofils selbst einhergeht.

Anders als in vorhergehenden Studien findet sich in den Analysen keine harte Evidenz für sog. Double Boom-Zyklen, in denen eine Technologie erst grundlegend entwickelt und dann in einem zweiten Entwicklungsschub auf spezifische Anwendungszusammenhänge angepasst wird. Vielmehr sind es, unter den hier analysierten, vor allem spezifische, neue Technologien, die diese Entwicklung treiben, darunter vor allem Künstliche Intelligenz/Big Data im IKT Bereich und Robotik im Bereich der Produktionstechnologien.

Klassifikation von Technologien nach Dynamik

Grundsätzlich lassen sich die in dieser Studie analysierten Technologien bzw. Technologiebereiche mit Blick auf ihre wissenschaftlich-technologische Entwicklungsdynamiken in drei unterschiedliche Typen differenzieren: Bereits stabil etablierte; langfristig, kontinuierlich wachsende sowie emergent-dynamische.

1) Etablierte Schlüsseltechnologien mit geringer Dynamik

Zu diesen Technologien ohne herausragendes Wachstum zählen vor allem der Bereich der Bio- und Lebenswissenschaften sowie die Materialtechnologien. Im Bereich Bio- und Lebenswissenschaften war seit 2000 eine insgesamt eher geringe Dynamik zu verzeichnen, insbesondere im technologischen Bereich. Seit ca. fünf Jahren ist allerdings wieder eine gewisse Dynamisierung festzustellen, sodass das ursprüngliche Niveau von 2000 mittlerweile wieder überschritten wurde und die mittlere Wachstumsrate der letzten fünf Jahre wieder über der des Bereichs Materialtechnologien liegt. Im Hinblick auf das Wachstum akademischer Publikationen verhält es sich umgekehrt. Trotz ihrer geringeren Dynamik finden sich in beiden Bereichen wissenschaftlich-technologische Aktivitäten von erheblichem Umfang, die einen kontinuierlichen und stabilen Beitrag zur wirtschaftlichen Entwicklung leisten. Auch für die klassische Mikroelektronik zeigt sich in vielen Ländern außer Japan, Korea und China eine vergleichbare technologische Dynamik.

2) Schlüsseltechnologien mit bereits langfristiger, kontinuierlicher Dynamik

Zu diesen zählen v.a. Technologien wie z.B. die Nanotechnologie, die Photonik, die klassische Mikroelektronik sowie der Bereich Advanced Manufacturing, in denen das Aktivitätsniveau seit Anfang der 2000er Jahre stetig anwächst. Auch die Bereiche Digitalisierungs- und Produktionstechnologien lassen sich in ihrer Gesamtheit in dieses Feld einordnen. Während die Bereiche Digitale Sicherheitstechnologien und Künstliche Intelligenz grundsätzlich in die folgende Gruppe fallen, weisen sie im akademischen Bereich bereits seit längerem stabil wachsende Dynamiken auf, die sich aktuell lediglich beschleunigen. Andersherum finden sich in den Bereichen Internet of Things sowie Digitale Sicherheit v.a. im technologischen Bereich schon länger anhaltende Trends.

3) Emergente Schlüsseltechnologien mit fast exponentieller Dynamik

Zu diesen zählen v.a. die aktuellen Digitalisierungstechnologien Künstliche Intelligenz, Big Data sowie in geringerem Ausmaß Digitale Sicherheitstechnologien, Digitale Mobilitätstechnologien und Lösungen aus dem Bereich Internet of Things. Hinzu kommt aus dem Bereich Produktionstechnologien die Robotik. Innerhalb der Gruppe ist zu unterscheiden zwischen den o.g. Technologien, die trotz jüngster Dynamisierung bereits einen gewissen akademischen Vorlauf aufweisen, wie Digitale Sicherheitstechnologien, Künstliche Intelligenz, Robotik und solchen, bei denen dies weniger der Fall ist, sodass eine dynamische Entwicklung auch bzw. gerade akademisch erst seit Mitte der 2010er Jahre einsetzt (Big Data, Internet of Things, Digitale Mobilitätstechnologien).

Synopse Kapitel 1 & 2

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse von Kapitel 1 ist festzuhalten, dass Kompetenzen in Schlüsseltechnologien für technologisch führende Länder und Staatengemeinschaften in dreifacher Hinsicht von Bedeutung sein können:

- Um den Anschluss an die dynamische digitale Transformation von Wirtschaft- und Gesellschaft zu halten und an ihr aktiv partizipieren zu können,
- Um neue Entwicklungen im Bereich konvergierender Technologien in nationale bzw. europäische Alleinstellungsmerkmale umzusetzen,
- Um ausgewählte, grundlegende Fertigkeiten in jenen Bereichen zu schaffen bzw. erhalten, die das Fundament aller technologischen Entwicklungen bilden,
- Um die Grundlagen für eine sozioökologische bzw. nachhaltigkeitsorientierte Transformation der Wirtschaft zu legen und diese zu beschleunigen.

Unter ergänzender Berücksichtigung der empirischen Erkenntnisse aus Kapitel 2 bezüglich Breitenwirksamkeit und Dynamik lassen sich damit übergreifend drei Typen von Technologien identifizieren, die als "Schlüsseltechnologien" besondere Aufmerksamkeit verdienen:

1. Treiber der digitalen Transformation – softwaregetriebene Technologien

Diese Technologien treiben die aktuelle, fundamentale Transformation des Wirtschaftsgeschehens und zeichnen sich sowohl durch eine hohe Breitenwirksamkeit als auch durch eine starke Dynamik aus. Zu ihnen zählen v.a. Künstliche Intelligenz, Big Data, und Digitale Sicherheitstechnologien. Länder, die in diesem Bereich den Anschluss verlieren, verlieren mit großer Wahrscheinlichkeit mittelfristig die Befähigung eigene Beiträge zur technologischen Entwicklung zu leisten.

2. Technologien an neu entstehenden Schnittstellendomänen

An den Schnittstellen bestehender, anwendungsbezogener Stärkenfelder und neuer "Enabling Technologies" entstehen Möglichkeiten, neue Lösungsansätze und spezifische Kompetenzen zu entwickeln. In diesen Bereich fallen u.a. Digitale Mobilitätstechnologien, Internet of Things, Robotik, Industrie 4.0., Generative Fertigung sowie der Bereich Bioökonomie. Kompetenzen in diesen Technologien sind unverzichtbar, um mittels der Kombination spezifischer Stärken im technologischen Wettbewerb Alleinstellungsmerkmale zu entwickeln und Nachahmung zu vermeiden.

3. Komponenten eines zukunftsfähigen technologischen Fundaments

Für eine Reihe unterschiedlicher Technologiebereiche bedarf es zentraler Grundlagenfertigkeiten, um hochentwickelte technologische Anwendungen entwickeln zu können. In diesen Bereich fallen Hardwaredesign, fortgeschrittene Produktionstechnologien, neue Werkstoffe, Biotechnologie und Pharmazeutik. Fertigkeiten in zumindest einigen von ihnen sind zentral als Grundlage des Aufbaus zukünftiger Alleinstellungsmerkmale im internationalen Wettbewerb notwendig. Zudem zählen zu diesem Bereich explizit auch solche Technologien, deren Eigendynamik zwar noch nicht überdurchschnittlich ausgeprägt ist, die allerdings vor dem Hintergrund staatlich gesetzter Ziele im Bereich der Nachhaltigkeit bzw. anderer staatliche definierter 'Missionen' als zentral angesehen werden müssen.

Abbildung 8: Übersicht über verschiedene Typen von Schlüsseltechnologien und ihren politischen Begründungszusammenhang



Quelle: Eigene konzeptionelle Darstellung

3 Bewertung der Position Deutschlands hinsichtlich Forschung und Entwicklung im Bereich ausgewählter Schlüsseltechnologien

Operationalisierung und Betrachtungsdimensionen

Wie im Bereich der allgemeinen Betrachtungen zu den Schlüsseltechnologien werden auch zur Bewertung der internationalen Position Deutschlands in ausgewählten technologischen Bereichen bibliometrische Analysen sowie Analysen des Patentaufkommens durchgeführt.

Erstere basieren auf der Grundlage der Datenbank Elsevier SCOPUS, letztere auf Daten des Europäischen Patentamts (EPO PATSTAT). Patentanmeldungen werden nur dann in die Betrachtung mit einbezogen, wenn sie entweder über den PCT Prozess der WIPO oder direkt am Europäischen Patentamt angemeldet wurden ("transnationale Patente").

Konzeptionell leitend für die Berücksichtigung dieser Perspektiven ist die Erkenntnis, dass wissenschaftlich-technologische Kompetenzen das zentrale Fundament jedes langfristigen und nachhaltigen Wachstums von Volkswirtschaften bilden. Länder und Integrationsräume mit einer soliden bzw. dynamisch wachsenden Grundlage an Kompetenzen können somit als in stärkerem Maße als technologisch souverän erachtet werden, als wenn sie nicht über eine solche Grundlage verfügen. Darüber hinaus können Parallelitäten in der wissenschaftlich-technologischen Einwicklung bzw. klare Übergänge von wissenschaftlichen zu technologischen Dynamiken als Belege effektiver Kooperation zwischen Wissenschaft und Wirtschaft bzw. des erfolgreichen Transfers technologischen Wissens dienen.

Ergänzend werden Aktivitäten im Bereich der Standardisierung sowie, gesondert, solche Publikationen und Patente betrachtet, die in Standards direkt zitiert werden. Diese Analysen basieren auf Informationen der Internationalen Organisation für Normung (ISO) sowie des Europäischen Komitees für Normung (CEN) – sowie ergänzend Patent- und Publikationsdaten aus den oben bereits genannten Quellen.

Konzeptionell leitend für die Berücksichtigung dieser Perspektive war die Tatsache, dass globale und europäische Standards ein zentrales Element eines internationalen Prozesses der Regelsetzung sind, mittels dessen sich Unternehmen und, mittelbar, Regierungen auch über den Geltungsbereich nationaler Regulierung hinausgehend an der Gestaltung jener globalen Rahmenbedingungen beteiligen können, die darüber entscheiden, ob sich die Produkte und Lösungen eben dieser Unternehmen erfolgreich vermarkten lassen.

Abschließend werden, basierend auf Analysen der UN COMTRADE-Datenbank, Ergebnisse zu den Exporten bzw. den Handelsbilanzen einzelner Länder bzw. der Europäischen Union präsentiert. Der Definition technologischer Kategorien wird in diesem Zusammenhang ein sogenannter "Embeddedness"-Ansatz zugrunde gelegt, im Rahmen dessen in Abstimmung mit Fachexperten

für jeden Bereich jene Güterklassen ausgewählt wurden, die zur Realisierung entsprechender Lösungen von besonderer Bedeutung sind. Während dies z.B. im Bereich Big Data oder Künstliche Intelligenz die einzig mögliche Herangehensweise darstellt, erzeugt sie dennoch eine gewisse Diffusität im Ergebnis, die zu berücksichtigen ist.

Konzeptionell leitend für die Berücksichtigung dieser Perspektive war erstens die bekannte Grundannahme, dass – allgemein gesprochen – Exporte als Evidenz nationaler Wettbewerbsfähigkeit interpretiert werden können. Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, dass Handelsdaten nur Produktionsstandorte abbilden, an denen nicht notwendigerweise auch relevante Entwicklungsaktivitäten stattfinden. Stattdessen reflektieren sie oftmals ebenso Produktionsverlagerungen aufgrund von Steuer- oder Lohnkostenvorteilen. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass Handelsdaten v.a. die globale Arbeitsteilung im Bereich der Produktion, nicht aber jene im Bereich der Technologieentwicklung abbilden. Hinzu kommen Artefakte durch große Umschlaghäfen wie z.B. Singapur oder Amsterdam oder durch die Endmontage importierter Teile für den Re-Export. Inhaltlich ist somit also die direkte Interpretation von Handelsdaten als Indikator für Wettbewerbsfähigkeit durchaus infrage zu stellen. Generell muss daher neben dem absoluten Exportvolumen stets auch die Handelsbilanz analysiert werden, bevor, auch nur im Fertigungsbereich, auf eine maßgebliche Souveränität im Sinne eigenständiger Wettbewerbsfähigkeit geschlossen werden kann.

Gerade aufgrund ihres in dieser Weise abweichenden Fokus kommt Handelsdaten allerdings im Rahmen dieser Studie eine besondere Bedeutung zu. Im Rahmen der im Laufe der 1990er bis frühen 2010er Jahre stetig zunehmenden weltwirtschaftlichen Integration hat – zumindest temporär – eine teils substanzielle Trennung von wissenschaftlich-technologischen Kompetenzen und realen Produktionsvorgängen eingesetzt (Designed in California, Made in China). Handelsdaten ermöglichen es, die Konsequenzen dieser Entwicklungen differenziert nachzuzeichnen und dabei deutlich zu machen, wie sich wissenschaftlich-technologisch gut positionierte Länder in teils erhebliche Abhängigkeiten begeben haben, die ihre technologische Souveränität im Sinne der gesicherten Verfügbarkeit relevanter Produkte zu beeinträchtigen drohen. Gleichzeitig besteht, u.a. in Asien, ein bekannter Zusammenhang zwischen einer Erstbefassung mit Technologien im Rahmen der Endfertigung und einem sich daraus ergebenden nachgelagerten Erwerb entsprechender Entwicklungskompetenzen. Nicht zuletzt setzen spezifische Produktionskompetenzen vormalige Lohnfertiger in eine herausragende Ausgangsposition bei der Entwicklung emergenter Schlüsseltechnologien im Digitalbereich sowie die Entwicklung eigener Kompetenzen z.B. im Bereich Robotik.

Insgesamt folgt unsere empirische Betrachtung damit einem Multi-Perspektiven-Ansatz, der unter dem Rahmen technologischer Souveränität drei zentrale Elemente miteinander vereint:

- die Fähigkeit eines Landes oder Integrationsraums seine aktuellen wissenschaftlich-technologischen Kompetenzen auf Grundlage eigener Kompetenzen selbständig weiter auszubauen und zu entwickeln,

- die Fähigkeit eines Landes oder Integrationsraums, den institutionellen Rahmen in dem "seine" technologischen Lösungen zur Anwendung kommen müssten bzw. werden im eigenen Interesse selbst mit zu gestalten,
- die (einseitige) Abhängigkeit eines Landes oder Integrationsraums von Importen bzw. seine Fähigkeit, über eigene Exportaktivitäten den Weltmarkt in bestimmten Bereichen aktiv selbst mitzugestalten.

Weltanteile Deutschlands

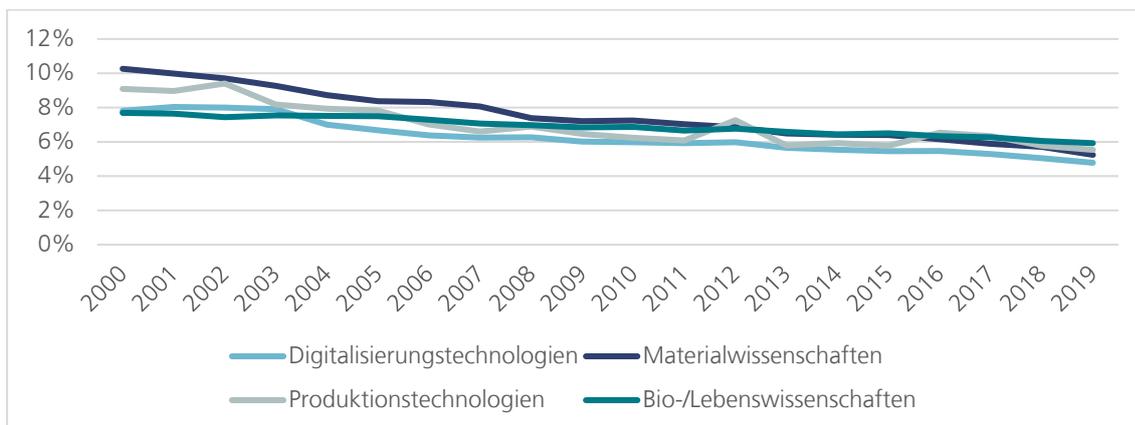
Wie **Abbildung 9** zeigt, erreicht Deutschland zurzeit in allen Technologiebereichen hinsichtlich des Publikationsaufkommens einen Anteil von etwa 6%, was seinem fächerübergreifenden Gesamtanteil an allen Publikation entspricht (2018: 6%). **Abbildung 10** dokumentiert demgegenüber für das Patentaufkommen einen etwas höheren Anteil von generell 6,5%-8,5% sowie im Bereich der Produktionstechnologien sogar über 13%. Dies liegt im ersten Fall knapp über und im zweiten Fall knapp unter dem Gesamtmittel (2018: 10,3%).

Insgesamt sind beide Anteile aufgrund des absolut stark steigenden Aufkommens in China – sowie im Bereich der Publikationen auch Indiens – seit 20 Jahren kontinuierlich rückläufig, und infolgedessen systematisch um zwischen 25% und 50% zurückgegangen. Im Rahmen der Weltwirtschaftskrise 2008/2009 wurde dieser Trend aufgrund von parallelen Einbrüchen in den USA mit Blick auf die Patentanmeldungen kurzfristig gestoppt, setzte sich dann aber mit dem Wiedererstarken der amerikanischen Wirtschaft fort.

Deutschlands relative Exportanteile sind demgegenüber vergleichsweise stabil, mit Rückgängen kaum über 20%. Im Bereich der Bio- und Lebenswissenschaften steigen Deutschlands relative Anteile seit ca. 2010 sogar wieder graduell an. Am höchsten ist der Anteil in den Bereichen Bio- und Lebenswissenschaften (13%) und Materialtechnologien (10%), in den Produktionstechnologien beläuft er sich auf ca. 7,5%, am niedrigsten ist er im Bereich Digitalisierungstechnologien (4,5%).

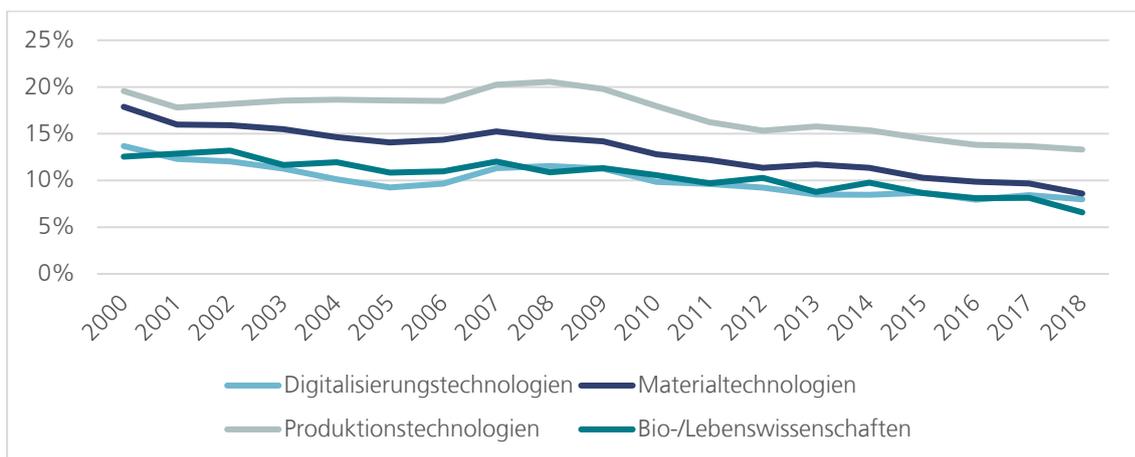
Deutschland weist damit weiterhin in allen Betrachtungsdimensionen Anteile auf, die nicht nur erheblich über seinen Anteil an der Weltbevölkerung (1,0-1,1%) sondern oft auch merklich über seinen Anteil am Weltsozialprodukt (4,4-4,6%) hinausgehen.

Abbildung 9: Anteile Deutschlands am Weltpublikationsaufkommen in den vier Schlüsseltechnologiebereichen in %



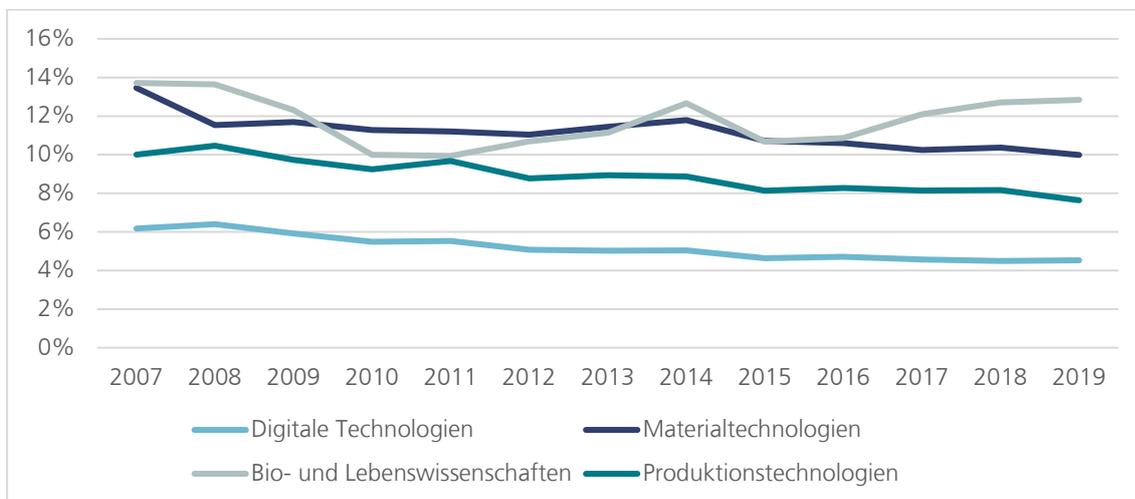
Quelle: Eigene Analyse auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung 10: Anteile Deutschlands am Weltpatentaufkommen in den vier Schlüsseltechnologiebereichen in %



Quelle: Eigene Analyse auf Basis von EPA PATSTAT

Abbildung 11: Anteile Deutschlands am globalen Export in den vier Schlüsseltechnologiebereichen in %



Quelle: Eigene Analyse auf Basis von UN COMTRADE

Internationaler Vergleich - Publikationen

Anteile der Bereiche am Gesamtaufkommen³

Wie einleitend dargestellt sind die Anteile der einzelnen Bereiche am Gesamtaufkommen in hohem Maße von vorlaufenden Definitionen abhängig und erlauben keine direkte Aussage über die sozioökonomische Relevanz einzelner Technologiefelder. Im Folgenden werden sie dennoch informationshalber in grundsätzlichen Zügen dargestellt.

Absolut machen die Bio- und Lebenswissenschaften über alle Länder und beide Zeiträume hinweg mit knapp 30% den größten Anteil an den Publikationen der jeweiligen Länder aus, was überwiegend auf den strukturell hohen Anteil der Medizinwissenschaften am gesamten Publikationsaufkommen zurückzuführen ist. Insgesamt geht ihr Anteil allerdings leicht zurück. Das bedeutet, dass andere Felder einen leichten Zuwachs bei den Publikationsanteilen erfahren haben. Dies gilt allen voran für die Digitalisierung. Weltweit steigt deren Anteil zwischen 2010-2012 und 2017-2019 um mehr als die Hälfte auf 6%. Bei den Materialtechnologien, die in dieser Betrachtung das zweitgrößte Feld darstellen, zeigt sich über die Jahre hinweg ein ähnlicher, wenn auch nicht ganz so stark ausgeprägter Effekt. In einigen Ländern zeigt sich ein leichtes Wachstum, in anderen stagnieren die Anteile. Die Produktionstechnologien halten mit Werten zwischen 0,5% und 1% den deutlich kleinsten Anteil am jeweiligen nationalen Publikationsaufkommen.

Bezüglich der Entwicklungen in den jeweiligen Teilbereichen ist allgemein festzuhalten, dass die Lebenswissenschaften innerhalb der Bio- und Lebenswissenschaften einen größeren Teil als die Bioökonomie einnehmen. Innerhalb des Felds der Produktionstechnologien werden im Bereich der Robotik die höchsten Anteile erreicht. Ein deutliches Bild zeigt sich auch bei den Materialtechnologien. Hier dominiert klar der Bereich der Advanced Materials, während die Nanotechnologie i.e.S. vergleichsweise kleine, wenn auch wachsende Anteile vorweist. Bei der Digitalisierung hat der Bereich Künstliche Intelligenz den größten und am stärksten wachsenden Anteil, gefolgt von Digitalen Sicherheitstechnologien und Big Data. Für Deutschland (und auch die anderen betrachteten Länder) zeigen sich sehr ähnliche Trends. Die weltweiten Anteile setzen sich also nicht aus unterschiedlichen Entwicklungen zusammen. Eher führen vergleichbare nationale Trends zu einem einheitlichen Bild.

Spezialisierungen (Revealed Literature Advantage)

Zur eingehenderen Analyse der Publikationsspezialisierungen der jeweiligen Länder in den Schlüsseltechnologien wurde der Revealed Literature Advantage (RLA) berechnet. Er gibt an, in welchen Bereichen ein Land im Vergleich zu den weltweiten Publikationen stark oder schwach vertreten ist. Der RLA berechnet sich wie folgt:

$$RLA_{kj} = 100 * \tanh \ln (Pub_{kj}/j Pub_{kj}) / (k Pub_{kj}/kj Pub_{kj})$$

wobei "Pub_{kj}" für die Anzahl der Publikationen in Land k im Feld j steht.

³ Detaillierte Darstellungen hierzu finden sich im Anhang dieses Berichts.

Positive Vorzeichen bedeuten, dass ein Feld innerhalb des Landes ein höheres Gewicht hat als in der Welt. Ein negatives Vorzeichen steht entsprechend für eine unterdurchschnittliche Spezialisierung. Deutschland weist diesbezüglich über alle Schlüsseltechnologien hinweg ein insgesamt sehr ausgeglichenes Profil auf.

Im Bereich Bio- und Lebenswissenschaften zeigt sich auch ein international eher ausgeglichenes Bild, kein Land weist eine besonders ausgeprägte Spezialisierung auf. Anders ist dies im Bereich Materialtechnologien. Hier zeigen sich v.a. China und Japan deutlich positiv spezialisiert, auch wenn die Spezialisierungen in beiden Fällen im Verlauf der letzten Jahre leicht rückläufig sind. Großbritannien, Korea und die USA hingegen weisen stark unterdurchschnittliche Spezialisierungen auf. Bei den Produktionstechnologien zeigen v.a. China und Japan positive Spezialisierungswerte, Ähnliches gilt für die Digitalisierung.

Aktuelle Dynamik und Position Deutschlands⁴

Ein zentraler Träger v.a. der jüngeren Wachstumsdynamiken ist im Bereich Digitalisierungstechnologien ist China. Bis Anfang der 2000er Jahre kaum in Erscheinung getreten, erreichte es bereits Mitte der 2000er das Niveau der USA bzw. der EU-27 und setzte sich ab 2016 deutlich von beiden ab. Relativ betrachtet hat sich die Zahl der relevanten Publikationen aus China seit 2000 nahezu verdreifacht. Deutschland liegt absolut merklich hinter Großbritannien zurück, allerdings vor dem sich ebenfalls sehr dynamisch entwickelnden Korea. Zudem gelingt es, auf absolut deutlich geringerem Niveau, den relativen Wachstumstrend der USA nachzuvollziehen. Dieser liegt allerdings nicht nur, wegen der Dynamik Chinas, unterhalb des Welttrends, sondern auch, wegen der Dynamik Großbritanniens, unterhalb des europäischen Trends.

Insgesamt zeigen sich in den verschiedenen Einzelthemen im Bereich Digitalisierung durchaus unterschiedliche Entwicklungen. In den meisten Bereichen ist China bereits seit einigen Jahren der publikationsstärkste Akteur. Im Bereich Mikroelektronik, in dem sich die Publikationen bereits früher dynamisch entwickelten, ist dies etwa bereits seit Mitte der 2000er Jahre der Fall. Aktuell publiziert China hier mehr als doppelt so viel wie die EU-27 und mehr als dreimal so viel wie die USA. In vielen anderen Bereichen wie Big Data, Künstliche Intelligenz sowie digitaler Mobilitätstechnologien fand diese Absetzbewegung vor allem in den letzten Jahren, in etwa seit 2016/2017, statt. Lediglich im Bereich Digital Security z.B. publizieren Wissenschaftler:innen aus den USA sowie der EU-27 aktuell nach wie vor mehr als jene aus China, wenngleich die dortige dynamische Entwicklung nahelegt, dass China ihnen die führenden Ränge bereits 2020/2021 ablaufen könnte. Auch im absolut deutlich kleineren Feld Internet of Things kann die EU-27 in ihrer Gesamtheit zurzeit fast noch mit China mithalten und hat sich, wie auch schon im Bereich Mikroelektronik, durchaus merklich von den USA abgesetzt.

⁴ Detaillierte Darstellung hierzu finden sich im Anhang dieses Berichts.

Im Bereich Mikroelektronik zeigt Deutschland ein kontinuierliches Wachstum und liegt damit – wenn auch nicht weit – vor Japan, Korea, Großbritannien und Frankreich. Im Bereich Digital Security wird, merklich nach Großbritannien, eine Position klar vor Frankreich, Korea und Japan erreicht. Auch im Bereich Big Data ist ein relativ betrachtet dynamischer Zuwachs erkennbar und Deutschland liegt zwar hinter Großbritannien und nur gleichauf mit Korea, allerdings merklich vor Japan und Frankreich. Im Bereich digitaler Mobilitätstechnologien liegt Deutschland hinter Korea und Großbritannien, allerdings vor Japan und Frankreich. Im Bereich Internet of Things ist diese Positionierung noch schlechter, Deutschland hat hier an der aktuellen Dynamik nur bedingt teil und liegt – deutlich hinter Großbritannien und Korea – nur gleichauf mit Japan und Frankreich.

Auch im Bereich Materialtechnologien hat sich China seit Mitte der 2000er Jahre von den USA und seit Ende der 2000er Jahre auch von der EU-27 abgesetzt. Einzig China und Korea zeigten hier in den letzten beiden Jahrzehnten überdurchschnittliche Entwicklungen. Deutschland liegt vor Korea, Großbritannien und Frankreich sowie, seit Anfang/Mitte der 2010er Jahre, auch stabil vor Japan. Die Entwicklung der letzten Jahre deutet allerdings darauf hin, dass Korea in naher Zukunft zu Deutschland aufschließen bzw. den ersten Rang übernehmen könnte. Zudem ist das Publikationsaufkommen deutscher Wissenschaftler:innen dabei zurzeit nicht einmal halb so hoch wie das amerikanische und erreicht kaum mehr als 12% des chinesischen. Auch im Bereich Materialtechnologien ist festzuhalten, dass China und Korea den Welttrend bestimmen, während Deutschland sich – anders als im Bereich Digitalisierung – weniger dynamisch entwickelt als Amerika oder Europa insgesamt.

Im Bereich Produktionstechnologien stellt sich die Situation demgegenüber etwas anders dar. Zwar erzielen auch hier – mit Blick auf den Trend – vor allem China und Korea überdurchschnittliche Werte, China konnte sich allerdings absolut erst seit ca. 2015 merklich von den USA und erst seit ca. 2017 merklich von der EU-27 absetzen. Auch aktuell bleibt der absolute Vorsprung moderat. Unter den kleineren Ländern liegt Großbritannien an erster Stelle knapp vor Deutschland, es folgen Japan, Korea und Frankreich. Alle dieser Länder zeigen positive Entwicklungen, von denen sich lediglich Großbritannien merklich positiv absetzt. Dennoch fällt Deutschland mit Blick auf die relative Entwicklung hinter die Vergleichsländer zurück. Der Trend in Deutschland entspricht in etwa dem in den USA, Großbritannien und Korea haben sich im gleichen Zeitraum fast doppelt so dynamisch entwickelt.

Im Bereich Bioökonomie und Lebenswissenschaften führten die USA und die EU-27 lange unbestritten und konnten ihr jeweiliges Publikationsaufkommen seit Anfang der 2000er Jahre nahezu verdoppeln. Seit China Mitte der 2000er Jahre alle kleineren Länder überrundete, befand es sich allerdings in einem kontinuierlichen Aufholprozess und konnte 2018 auch den USA den Rang ablaufen, wenngleich dort klassischerweise nahezu viermal so viel publiziert wird wie im nächstfolgenden Land. Unter den kleineren Ländern liegt Deutschland nur knapp hinter Großbritannien

an zweiter Stelle vor Japan, Frankreich und Korea, nachdem beide – in einer fast parallelen Entwicklung – Ende der 2000er Jahre Japan den Rang abgelaufen hatten. Korea hat zwar in den letzten zwanzig Jahren merklich Kompetenzen aufgebaut, konnte aber noch nicht einmal mit Frankreich aufschließen. Mit Blick auf die relative Entwicklung liegt Deutschland somit zwar unterhalb des weltweiten Trends, aber fast exakt im europäischen Mittel sowie merklich vor Frankreich und Großbritannien.

Auch im Bereich Biotechnologie waren die USA sowie die Europäische Union als Ganzes lange dominierend und realisierten bis Ende der 2000er Jahre auch ein erhebliches Wachstum – das infolge der Wirtschaftskrise allerdings abflachte, sodass China ihnen bereits Mitte der 2010er Jahre den Rang ablaufen konnte. Unter den kleineren Ländern liegt Deutschland an erster Stelle vor Korea, Großbritannien, Japan und Frankreich. Korea hatte Deutschland zwischen 2012 und 2018 merklich den Rang abgelaufen, ist nun aber wieder knapp unter das deutsche Niveau zurückgefallen. Auch relativ betrachtet, zeigt sich in Deutschland ein dynamisches Wachstum nur knapp unterhalb des Welttrends, der, wie überall, von China bestimmt wird. Dieses liegt dabei deutlich über dem US-amerikanischen und dem gesamteuropäischen Trend und noch einmal deutlicher vor jenen in Großbritannien und Frankreich. Allerdings hat sich die Entwicklung in nahezu allen Ländern, mit Ausnahme Chinas, seit Anfang der 2010er Jahre stark abgeflacht und, z.B. in den USA, teils sogar zu stagnieren begonnen.

Zentrale publizierende Akteure

Die in Tabelle 1 dargestellte Verteilung zentraler publizierender Akteure in den verschiedenen Schlüsseltechnologien macht deutlich, wie sehr das globale akademische System mittlerweile von Institutionen aus den USA einerseits und China andererseits dominiert wird. Dies ist, wie die detaillierten Aufstellungen im Anhang verdeutlichen, insbesondere deswegen von Bedeutung, da sowohl in den USA als auch in China, ein wesentlicher Anteil auf wenige führende Dachorganisationen wie z.B. die CAS in China oder das UC-System in den USA entfällt. Dass über die Hälfte aller Top-100 Institutionen aus den USA und China stammen, verweist also nicht etwa auf eine Kleinteiligkeit der entsprechenden Systeme. Stattdessen würde die Dominanz beider Akteure in absoluten Zahlen noch deutlicher ausfallen. Im Bereich Digitalisierung vereinen beide sogar mehr als zwei Drittel aller Top-100 Institutionen auf sich.

Demgegenüber kann sich im Regelfall bestenfalls noch eine akademische Institution aus Deutschland unter die weltweiten Top-100 positionieren. Im Bereich Digitalisierungs- und Produktionstechnologien ist dies systematisch die TU München, im Bereich Materialwissenschaften entweder die TU Dresden oder die RWTH Aachen und im Bereich Bio- und Lebenswissenschaften systematisch die LMU München. Deutschland liegt damit in etwa gleichauf mit Frankreich und der Schweiz, aber deutlich hinter Großbritannien, Indien sowie, im Mittel, auch Japan und Korea zurück. Anders als es sich im Folgenden im Bereich der Patentanmeldungen darstellen wird, nehmen akademische Institutionen aus Deutschland damit weltweit zzt. keine maßgebliche Rolle mehr ein.

Demgegenüber finden sich im wissenschaftlichen Bereich zahlreiche, relevante Institutionen außerhalb der klassischen Triade (im Mittel ca. ein Fünftel aller Top-100 Institutionen, im Bereich Bioökonomie sogar mehr als ein Viertel). Zu diesen zählen neben indischen Institutionen auch solche aus Iran, Singapur, Brasilien, Hong Kong, Russland, Saudi-Arabien und Malaysia.

Zudem sind auch in Europa relevante wissenschaftliche Kompetenzen deutlich breiter über die Mitgliedsstaaten verteilt als im technologischen Bereich. Neben französischen und deutschen, fallen regelmäßig auch Institutionen aus Italien, Belgien, den Niederlanden, Dänemark, Spanien, Schweden, Finnland und Polen unter die Top-100 weltweit.

Tabelle 1: Nationale Verteilung der Top-100 publizierenden Institutionen in den vier Schlüsseltechnologiebereichen

	DE	US	JP	KR	IN	CN	FR	GB	CH	Rest-EU	andere
Digitalisierung	1	24	1	1	3	41	1	5	1	3	19
Künstliche Intelligenz	1	18	1	2	4	48	1	5	1	1	18
Big Data	1	17	1	1	5	49	0	5	1	0	20
Dig. Sicherheitstechnologien	1	34	0	0	3	18	1	11	1	14	17
Dig. Mobilitätstechnologien	3	15	1	4	3	47	0	3	1	9	14
Internet of Things	0	8	0	13	7	39	1	2	1	9	20
Mikroelektronik	0	6	6	7	5	52	2	3	2	4	13
Produktionstechnologien	1	22	3	4	2	36	1	4	2	11	14
Advanced Manufacturing	5	11	1	2	2	43	0	4	0	10	22
Photonik	2	15	3	0	2	37	4	5	2	10	20
Robotik	2	26	6	5	2	27	3	3	2	12	12
Materialtechnologien	1	11	7	7	2	50	2	3	2	3	12
Neue Materialien	1	11	7	7	2	50	2	3	2	3	12
Nanotechnologie	0	5	5	6	4	51	1	1	0	3	24
Bio- und Lebenswissenschaften	1	27	2	1	1	22	2	6	1	17	20
Lebenswissenschaften	2	27	2	1	0	21	2	6	1	18	20
Bioökonomie	1	25	3	1	1	24	1	4	1	11	28
Biotechnologie	1	23	4	9	1	34	1	4	2	6	15

Quelle: Analysen des Fraunhofer ISI auf Basis von Elsevier SCOPUS

Internationaler Vergleich - Patente

Anteile der Bereiche am Gesamtaufkommen

Wie einleitend dargestellt sind die Anteile der einzelnen Bereiche am Gesamtaufkommen in hohem Maße von vorlaufenden Definitionen abhängig und erlauben keine direkte Aussage über die sozio-ökonomische Relevanz einzelner Technologiefelder.⁵ Im Folgenden werden sie dennoch informationshalber in grundsätzlichen Zügen dargestellt.

Insgesamt machen die Materialtechnologien mit der Ausnahme von Japan und Korea über alle Länder hinweg den kleinsten Anteil aller Patentanmeldungen im Land aus. Digitalisierungstechnologien, auf der anderen Seite, haben in fast allen Ländern den größten Anteil am Technologieportfolio. Nur in Deutschland und in der EU-27 nehmen die Produktionstechnologien noch einen leicht höheren Anteil ein. Die Bio- und Lebenswissenschaften sowie die Produktionstechnologien sind in den meisten beobachteten Ländern im Mittelfeld mit 3% bis 10% bzw. 7% bis 11% verortet.⁶

Im Vergleich der beiden Zeiträume entwickelt sich insbesondere der Anteil der Digitalisierungstechnologien am Gesamtaufkommen dynamisch. Hier sind die Anteile weltweit um zwei Prozentpunkte gestiegen, wobei in manchen Ländern wie Großbritannien auch Zuwächse von vier Prozentpunkten erzielt wurden. In den anderen Feldern zeigen sich ebenfalls Zuwächse, allerdings sind diese weniger stark ausgeprägt. Die geringsten Veränderungen der Anteile über die Zeit sind in den Materialtechnologien zu finden. Hier stagnierte der Anteil in den meisten Ländern im Vergleich der beiden Zeiträume.

Mit Blick auf die technologischen Teilbereiche finden sich Anteile im Bereich Bio- und Lebenswissenschaften sowohl in der Bioökonomie sowie in den Lebenswissenschaften von je knapp 5% an den Gesamtanmeldungen, wobei es zwischen beiden Zeiträumen nur zu leichten Veränderungen kommt. Bei den Produktionstechnologien hat sich besonders der Bereich Advanced Manufacturing dynamisch entwickelt. Hier sind die Patentanteile über die Zeit kontinuierlich angestiegen. Auf den Bereich Robotik hingegen entfallen weltweit bislang nur sehr geringe Patentanteile. Bei den Materialtechnologien ist Advanced Materials das bei weitem größte Feld. Auf die Nanotechnologie entfallen nur sehr kleine Anteile, die über beide Zeiträume auch leicht rückläufig sind. Die Digitalisierung ist anteilig das größte Feld. Hier sind die höchsten Anteile in der Mikroelektronik

⁵ Wie bei den Publikationen ergeben sich auch in diesem Fall die relativen Anteile bzw. absoluten Zahlen aus den angewendeten Definitionen, die teils auch in anderer Weise vorgenommen werden könnten. Die hier genannten, exakten Zahlen sollten vor dem Hintergrund dieser Tatsache eingeordnet werden. Dessen ungeachtet wird, da die Definitionen streng inhaltsbezogen und auf Grundlage von Fachexpertise vorgenommen wurden, aus den Ergebnissen eine Gewichtung der Technologiebereiche deutlich, die in der Substanz als valide zu betrachten ist.

⁶ Hierbei ist zu beachten, dass die Sub-Technologien nicht überschneidungsfrei sind und ein Patent mehreren Sub-Technologien zugeordnet werden kann. Daher entspricht die Addition der Anteile nicht den Gesamtanteilen.

zu verzeichnen, wobei sich auch hier über die Jahre hinweg ein leichter Rückgang einstellt. Anteilig kleinere Felder wie Künstliche Intelligenz, Big Data, Digitale Mobilitätstechnologien und Digitale Sicherheitstechnologien hingegen zeigen ein starkes Wachstum in den Patentanteilen.

In Deutschland wird im Vergleich zum weltweiten Durchschnitt ein deutlicher Fokus auf Produktionstechnologien sichtbar. Besonders bei den Advanced Manufacturing Technologies liegt der Anteil mit knapp 8% deutlich über den weltweiten Anteilen von ca. 5%. Zudem sind die Anteile in den letzten Jahren stark gewachsen, was sich im Vergleich über die beiden Zeiträume zeigt. Auch in der Robotik sind die Anteile in den letzten Jahren gestiegen, während in der Photonik leichte Rückgänge zu verzeichnen sind. In den Bio- und Lebenswissenschaften zeigt sich ein ähnlicher Trend wie im weltweiten Durchschnitt, jedoch sind die Patentanteile in Deutschland insgesamt etwas geringer. Ähnliches gilt für die Materialtechnologien. Advanced Materials nehmen mit Patentanteilen von etwas über 4% noch signifikante Werte an, während die Nanotechnologie als eher kleines Feld angesehen werden kann. Im Bereich der Digitalisierung zeigen sich relativ betrachtet ähnliche Wachstumstrends wie im weltweiten Durchschnitt – jedoch auf niedrigerem Niveau. Einzig der Bereich Mobility sticht hier hervor. Hier werden ähnliche Patentanteile wie im weltweiten Vergleich erzielt.

Spezialisierungen (Revealed Patent Advantage)

Zur eingehenderen Analyse der Patentspezialisierungen der jeweiligen Länder in den Schlüsseltechnologien wurde der relative Patentanteil (RPA) berechnet. Er gibt an, in welchen Bereichen ein Land im Vergleich zu den gesamten, weltweiten Patentanmeldungen stark oder schwach vertreten ist. Der RPA berechnet sich wie folgt:

$$RPA_{kj} = 100 * \tanh \ln (P_{kj}/j P_k) / (k P_{kj}/k_j P_k)$$

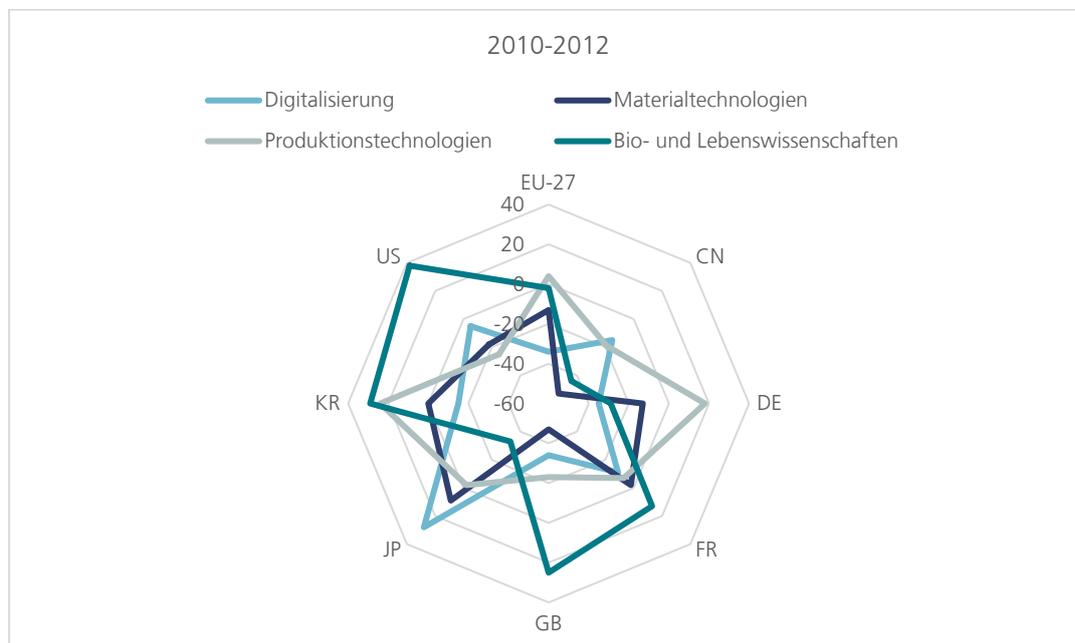
wobei P_{kj} für die Anzahl der Patentanmeldungen in Land k im Technologiefeld j steht.

Positive Vorzeichen bedeuten, dass ein Technologiefeld innerhalb des Landes ein höheres Gewicht hat als in der Welt. Ein negatives Vorzeichen steht entsprechend für eine unterdurchschnittliche Spezialisierung. Hierdurch ist es möglich, die relative Position von Technologien innerhalb eines Technologieportfolios eines Landes und zusätzlich seine internationale Position zu vergleichen, unabhängig von Größenunterschieden.

Im Bereich Bio- und Lebenswissenschaften zeigten sich noch Anfang der 2010er Jahre die USA, Großbritannien, Korea und Frankreich stark spezialisiert, mittlerweile ist eine entsprechende Spezialisierung nur noch in den beiden erstgenannten Ländern zu finden. Im Bereich Digitalisierung finden sich unverändert ausgeprägte Spezialisierungen in den USA, China und auch Japan. Auf den Bereich Materialtechnologien zeigen sich v.a. Japan und Frankreich spezialisiert, sich vormals ebenfalls andeutende Spezialisierungen Koreas und Deutschlands haben sich abgeschwächt. Im Bereich Produktionstechnologien ist hingegen vor allem Deutschland spezialisiert, gefolgt von

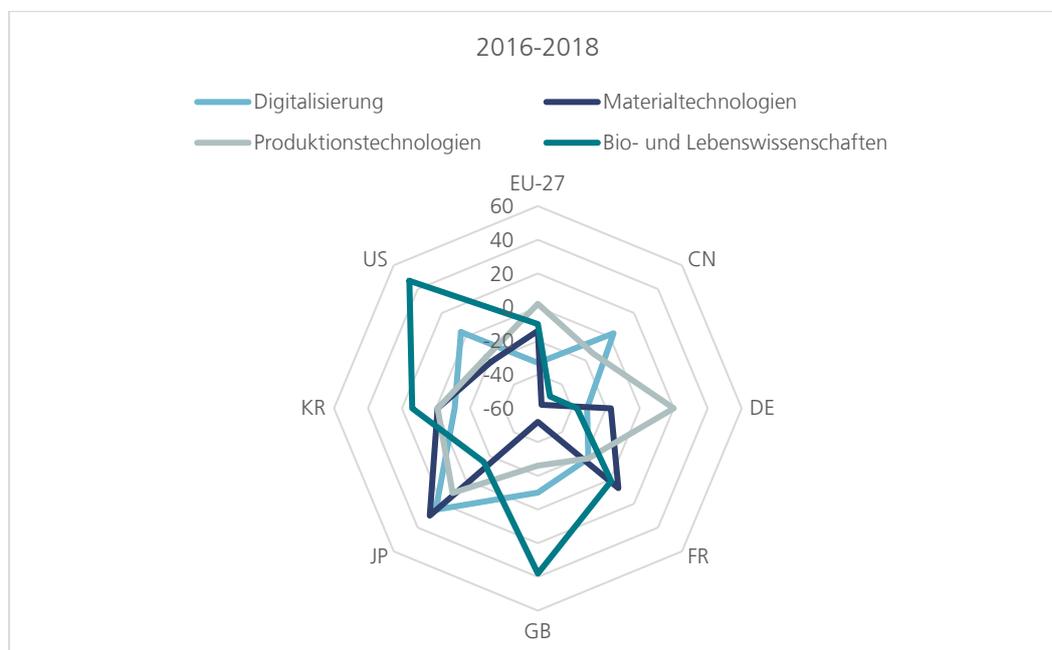
Japan. Vormalig gegebene Spezialisierungen in Korea sind im Verlauf der letzten Jahre dagegen eher rückläufig (Abbildung 12 und Abbildung 13).

Abbildung 12: Spezialisierung relevanter Länder 2010-2012



Quelle: Eigene Analyse auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung 13: Spezialisierung relevanter Länder 2016-2018



Quelle: Eigene Analyse auf Basis von Elsevier SCOPUS

Aktuelle Dynamik und Position Deutschlands⁷

Im Bereich Digitalisierungstechnologien, der technologisch traditionell von Japan und den USA dominiert wird, ist in den letzten Jahren, auch absolut, ein rasantes Aufholen Chinas zu beobachten. Durch eine Vervielfachung seiner Patentaktivitäten v.a. seit Beginn der 2010er Jahre hat China die EU-27 bereits 2016 vom dritten Rang verdrängt und ist in den noch nicht beobachtbaren Jahren 2019 und 2020 vermutlich nicht mehr weit davon entfernt, mit den USA bzw. Japan gleich zu ziehen. Deutschland lag 2018 auf dem weltweit vierten Rang, nur sehr knapp hinter Korea auf Rang drei, das insbesondere seit 2008/2009 ein erhebliches Wachstum realisiert hatte (Faktor zehn seit 2000). In allen anderen Ländern entwickelte sich die Patentierungsneigung eher schleppend, im weltweiten Mittelwert nur um ca. Faktor 2,5 seit dem Bezugsjahr 2000.

Interessant bei der Betrachtung der verschiedenen Einzelfelder im Bereich Digitalisierungstechnologien ist v.a., dass sich eine recht eindeutige Unterscheidung zwischen etablierten und neuen Feldern identifizieren lässt.

Im Bereich Mikro- und Nanoelektronik etwa ist das jährliche Patentaufkommen in der Mehrzahl der betrachteten Länder schon seit dem Jahr 2000 weitestgehend stabil, einzig China realisiert seine übliche Aufholbewegung und Japan setzt sich bereits seit Beginn der 2000er Jahre – und unbeschadet eines Einbruchs Mitte der 2010er Jahre – immer weiter von allen anderen, etablierten Akteuren ab. Auch im Bereich digitale Mobilitätstechnologien zeigt sich zwar seit Mitte der 2010er Jahre eine insgesamt stärkere Dynamik, diese wird von allen etablierten Nationen allerdings recht ähnlich nachvollzogen. Selbst China scheint sich für den Moment in den allgemeinen Wachstumstrend einzuordnen, nachdem es binnen lediglich drei Jahren vom Niveau Frankreichs auf das Niveau Deutschlands aufgeschlossen – d.h. seinen Patentoutput um Faktor vier gesteigert hatte. Aktuell liegt Deutschland im nationalen Ranking noch immer auf Platz drei, hinter Japan und den USA.

In den ebenfalls nicht von extremem Wandel gekennzeichneten Bereichen Digital Security und Internet of Things liegen die USA und die EU-27 im internationalen Ranking nach wie vor deutlich vorn, China konnte zwar zunächst deutlich aufschließen, hat seine Anstrengungen allerdings nach 2015 nicht mehr merklich vertieft. Dennoch liegt die Zahl chinesischer Patentanmeldungen im Bereich Digital Security mittlerweile um fast das Doppelte über der Japans bzw. Deutschlands, im Bereich Internet of Things liegen alle drei Länder nahezu gleichauf. Deutschland liegt damit in beiden Bereichen auf Rang vier, jeweils knapp hinter Japan. Generell ist in beiden Bereichen eine tendenziell eher stagnierende Entwicklung der Patentanmeldungen zu verzeichnen. In den USA zeigen sich, wie schon im Bereich digitale Mobilitätstechnologien, starke Auswirkungen der Wirtschaftskrise 2008/2009, die in der EU-27 sehr viel weniger erkennbar sind.

⁷ Detaillierte Darstellung hierzu finden sich im Anhang dieses Berichts.

Gänzlich andere Muster zeigen sich hingegen in den Bereichen Künstliche Intelligenz und Big Data, in denen eine wirklich ausgeprägte Dynamik erst seit Mitte der 2010er Jahre zu beobachten ist. In beiden Fällen liefern sich vor allem die USA und China einen Wettbewerb um die globale Führungsposition, der im Bereich Künstliche Intelligenz offen erscheint, während im Bereich Big Data für den Moment noch deutlich die USA zu dominieren scheinen. Interessanterweise zeichnet sich im letztgenannten Bereich ein landesspezifischer Double Boom dahingehend ab, dass die USA hier bereits Anfang der 2000er Jahre ein erhebliches Volumen thematisch verwandter Patentanmeldungen vorweisen konnten. Nahe liegt, dass es sich dabei noch nicht um Big Data Technologien i.e.S. gehandelt haben kann. Allerdings liefert die Auswertung ein starkes Indiz für die Relevanz vorbereitender Aktivitäten. Deutschland liegt in den beiden Bereichen Künstliche Intelligenz und im Bereich Big Data auf Rang fünf, jeweils deutlich hinter Korea, aber knapp vor Großbritannien.

Auch im Bereich Materialtechnologien finden sich überwiegend stagnierende Zahlen. Zwar konnte sich Japan seit Ende der 2000er Jahre noch einmal deutlich von allen anderen Nationen absetzen, darüberhinausgehend veränderte sich das globale Gefüge allerdings nur bedingt. China und Korea konnten von eingangs sehr niedrigem Niveau gegen 2016 zu Deutschland aufschließen, sodass Deutschland, wenngleich sehr knapp, vom weltweit dritten auf den fünften Platz zurückgefallen ist. Damit liegt es allerdings immer noch maßgeblich vor europäischen Partnerländern wie Frankreich oder Großbritannien.

Im Bereich Produktionstechnologien zeigt sich insbesondere in der EU-27 und Japan im Verlauf der 2010er Jahre eine graduell ansteigende Entwicklung. Die USA haben auch hier im Rahmen der Wirtschaftskrise 2008/2009 ihren Vorsprung vor Japan eingebüßt und seitdem nicht wieder zu ihren asiatischen bzw. europäischen Wettbewerbern aufschließen können. Deutschlands Patentaufkommen entwickelte sich nur in geringem Maße, lag aber stets um ca. Faktor 4 über dem großer europäischer Partnerländer wie Frankreich oder Großbritannien. Dessen ungeachtet musste 2016 der weltweit dritte Rang an China abgetreten werden, wo sich das entsprechende Patentaufkommen nach 2013/2014 binnen drei Jahren verdreifacht hatte. Maßgeblich hierfür ist nicht zuletzt der dort rasante Aufwuchs im Bereich Robotik, im Rahmen dessen sich das Patentaufkommen binnen drei Jahren versiebenfachte. Im Bereich Photonik hingegen waren seit Anfang der 2000er Jahre eher kontinuierliche Anstiege zu verzeichnen.

Im Bereich Bioökonomie und Lebenswissenschaften sind die USA trotz eines erheblichen, mittlerweile durch neue Entwicklungsdynamiken teilweise kompensierten, Rückgangs im Verlauf der 2000er Jahre der technologisch bei weitem bedeutendste Akteur. Auf Rang zwei folgt die EU-27, in der das Patentaufkommen allerdings leicht rückläufig ist. Auf dem zweiten Rang unter den Einzelnationen hält sich Japan, wobei China bereits merklich aufgeschlossen und in den noch nicht beobachtbaren Jahren 2019 bzw. 2020 möglicherweise gleichgezogen hat. Deutschland folgt auf

Rang vier vor Korea, allerdings mit leicht negativem Trend, während jener in Korea deutlich positiv ausfällt. In näherer Zukunft dürfte Deutschland damit auch hier auf den fünften Rang zurückfallen. Zudem hat sich seine vormals deutlich führende Position gegenüber europäischen Partnerländern merklich verschlechtert. 2018 lag es nurmehr recht knapp vor Großbritannien bzw. Frankreich.

Im Bereich Biotechnologie bestimmen vor allem die USA das Bild, gefolgt von der EU-27. Das Patentaufkommen in der EU-27 ist dabei seit 2000 stetig, aber insgesamt nur leicht zurückgegangen. Jenes in den USA hingegen ging im Verlauf der 2000er Jahre deutlich auf nahezu die Hälfte zurück und stieg erst seit ca. 2013 wieder merklich an. Die USA erreichen damit nun wieder ca. das doppelte Niveau der EU-27 und diese das eineinhalbfache Niveau von Japan bzw. China. China zeigt auch in diesem Bereich seit ca. 2014 eine starke Dynamik und dürfte aktuell dabei sein, zur EU-27 aufzuschließen. Deutschland folgt auf Rang fünf, minimal hinter Korea.

Zentrale Patentanmelder

Eine Analyse der Top-100 zentralen Patentanmelder (Tabelle 2) zeigt, dass der weltweite Technologiemarkt im Bereich der Schlüsseltechnologien, anders als die Domäne der Wissenschaft, zurzeit überwiegend von Japan und den USA dominiert wird.

China hat auch hier aufgeholt und vor allem im Bereich der Digitalisierungstechnologien sowie der Robotik Deutschland klar überrundet, nimmt aber noch keine so prägende Rolle ein wie im wissenschaftlichen Bereich. Eine weitere maßgebliche Rolle kommt Korea zu, wo sich die eher niedrige Anzahl der Akteure v.a. aus einer hohen Markkonzentration ergibt. Des Weiteren finden sich die Rollen Frankreichs und Großbritannien dahingehend vertauscht, dass französische Organisationen im technologischen Bereich deutlich präsenter sind als britische, während im akademischen Bereich das Gegenteil der Fall war. Anders als im Bereich der Wissenschaft finden sich nach wie vor nur eine vergleichsweise geringe Anzahl von Akteuren außerhalb der klassischen Triade, und dies v.a. im Bereich Nanotechnologie, wo v.a. Singapur eine besondere Rolle zukommt. Auch in der EU findet sich eine weniger breite Verteilung relevanter Treiber der technologischen Entwicklung als dies im akademischen Bereich der Fall ist. Neben französischen und deutschen Firmen spielen hierbei v.a. solche aus den Niederlanden, den nordischen Ländern sowie Italien und Spanien eine Rolle.

Insgesamt ist die Zahl deutscher Institutionen unter den globalen Top-100 Patentanmeldern zwar in allen Bereichen geringer als jene Japans oder der USA, im Feld der Produktionstechnologien sowie den Bereichen Digitale Mobilitätstechnologien und Neue Materialien jedoch teilweise nicht besonders maßgeblich. Nur im Bereich Digitalisierungstechnologien ist die Differenz – außerhalb des Mobilitätsbereichs – sehr deutlich greifbar, mit einer im Vergleich zu den USA und China um Faktor 5-6 geringeren Anzahl.

Deutschland ist mit Blick auf seine ökonomische Größe somit grundsätzlich noch immer deutlich überdurchschnittlich repräsentiert, allerdings in den zzt. besonders dynamischen und breitenwirksamen Bereichen teils weniger deutlich. Auch werden die Aktivitäten deutscher Akteure, zumindest außerhalb des Bereichs Produktionstechnologien, oft nur von wenigen zentralen Akteuren getragen (Siemens, Bosch, Osram, BASF, Henkel, ...). Diese Strukturen sind aus den detaillierten Aufstellungen im Anhang noch einmal deutlich zu entnehmen. Grundsätzlich verweisen sie eine gewisse systemische Vulnerabilität auf, die sich u.a. am Beispiel von Infineon verdeutlichen lässt, das noch im Zeitraum von 2000-2004 zu den führenden Top-25 Anmeldern zählte. Darüber hinaus zeigen sie, z.B. im Bereich Robotik, dass die Übergabe der Steuerungsverantwortung an überwiegend ausländische Investitionen dazu führen kann, dass zumindest unter den globalen Top-25 nun kein im engeren Sinne deutsches Unternehmen mehr vertreten ist.

Tabelle 2: Nationale Verteilung der Top-100 Patentanmelder (transnational) in den vier Schlüsseltechnologiebereichen

	DE	US	JP	KR	CN	FR	GB	CH	Rest-EU	andere
Digitalisierung	10	20	34	6	17	5	1	1	6	0
Künstliche Intelligenz	5	28	24	4	28	1	3	2	3	2
Big Data	5	33	14	6	24	5	4	0	5	4
Dig. Sicherheitstechnologien	7	31	13	2	18	12	3	1	7	6
Dig. Mobilitätstechnologien	14	23	35	2	8	4	1	1	10	2
Internet of Things	7	29	21	6	9	6	1	2	13	6
Mikroelektronik	8	12	47	9	16	2	1	1	3	1
Produktionstechnologien	14	17	42	7	8	4	1	1	4	2
Advanced Manufacturing	18	21	39	2	6	4	2	2	4	2
Photonik	10	15	43	11	9	3	0	0	9	0
Robotik	11	25	22	3	21	2	4	2	4	6
Materialtechnologien	10	13	55	4	4	7	0	2	5	0
Neue Materialien	10	12	56	4	4	7	0	2	5	0
Nanotechnologie	4	37	22	5	5	5	2	1	7	12
Bio- und Lebenswissenschaften	6	45	18	5	4	8	2	3	7	2
Lebenswissenschaften	7	49	16	5	4	7	1	2	6	3
Bioökonomie	7	45	20	4	4	6	2	4	6	2
Biotechnologie	7	49	16	5	4	8	2	2	4	3

Quelle: Analysen des Fraunhofer ISI auf Basis von EPO PATSTAT

Handel

Exportanteile

Die folgende Betrachtung der technologiespezifischen Exportanteile ausgewählter Länder gibt einerseits Aufschluss über ihre Exportstärke im Sinne von Wettbewerbsfähigkeit sowie andererseits über – oft lohnkostengetriebene – Dynamiken der Produktionsverlagerung im Bereich der für Schlüsseltechnologien relevanten Gütergruppen.

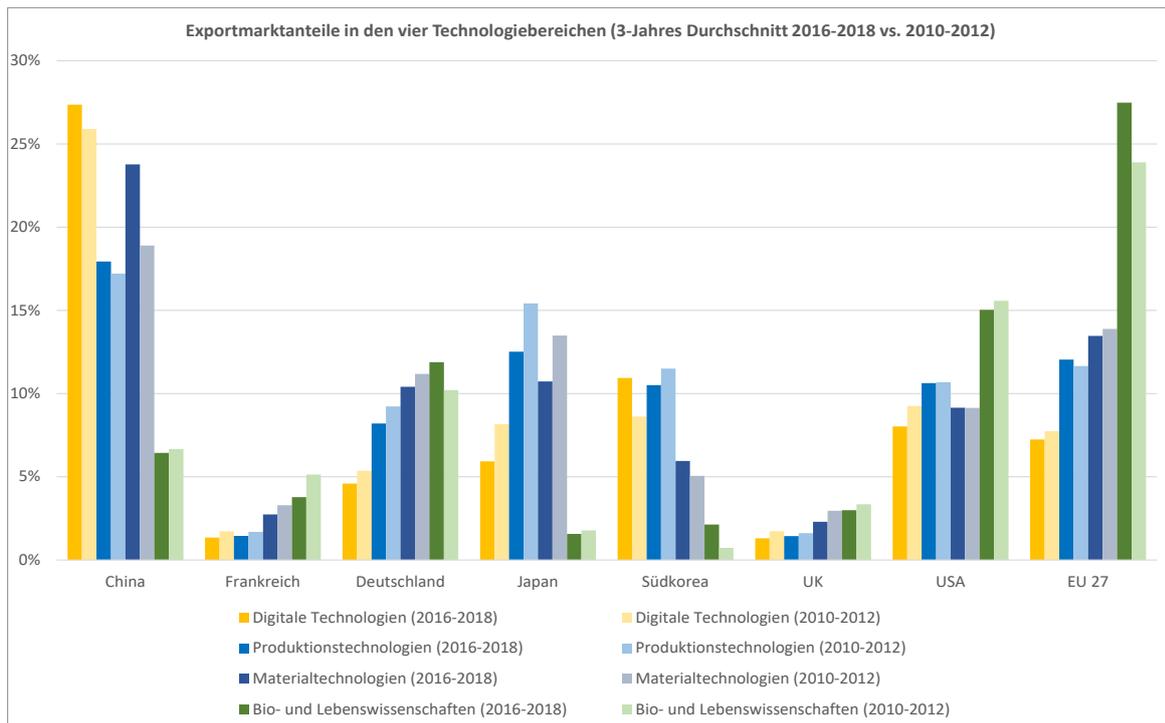
Abbildung 14 zeigt die durchschnittlichen Exportmarktanteile der wichtigsten Nationen sowie der EU-27 in den vier Schlüsseltechnologiebereichen zu zwei verschiedenen Dreijahresperioden, 2010-2012 und 2016-2018. Um die Aussagekraft der Daten im Hinblick auf internationale Wettbewerbsfähigkeit vergleichbarer zu machen, wurden als Exporte der EU-27 dabei lediglich jene Handelsströme betrachtet, die den gemeinsamen Binnenmarkt verlassen und jene zwischen den EU-Staaten herausgerechnet.

Auffällig ist zunächst, dass der Welthandel in den digitalen Technologien, also der Hardware für alle digitalen Schlüsseltechnologien, auch softwaregetriebene, stark von China dominiert wird. Die Exportanteile Chinas haben in diesem Bereich bis 2015 stark zugenommen und stabilisieren sich seitdem bei leicht unter 30%. Die Stabilisierung kann unter Umständen durch die Verlagerung von Teilen der Halbleiterproduktion in weitere (süd-)ostasiatische Länder erklärt werden, seitdem sich auch in China die Lohnkosten deutlich erhöht haben. Gleichzeitig haben auch Südkoreas Exportanteile im Betrachtungszeitraum (2007-2019) konstant zugenommen und das Land ist mittlerweile der zweitgrößte Exporteur in diesem Technologiereich, vor Japan und den USA.

Durch das Wachstum Chinas haben die Exportanteile der USA und Japans seit 2007 relativ stetig abgenommen (bei absolut nahezu gleichbleibendem Niveau), sodass die Exportanteile beider Länder mittlerweile jeweils unter 10% liegen. Deutschlands Marktanteil im Bereich der digitalen Technologien verbleibt stabil bei leicht unter 5%, was zugleich dem geringsten Anteil in allen vier Technologiebereichen entspricht. Auf die EU-27 entfällt insgesamt ein Exportanteil von 7,5%, der damit merklich hinter dem der USA bzw. Japans zurückbleibt und zu nahezu zwei Dritteln von Deutschland getragen wird.

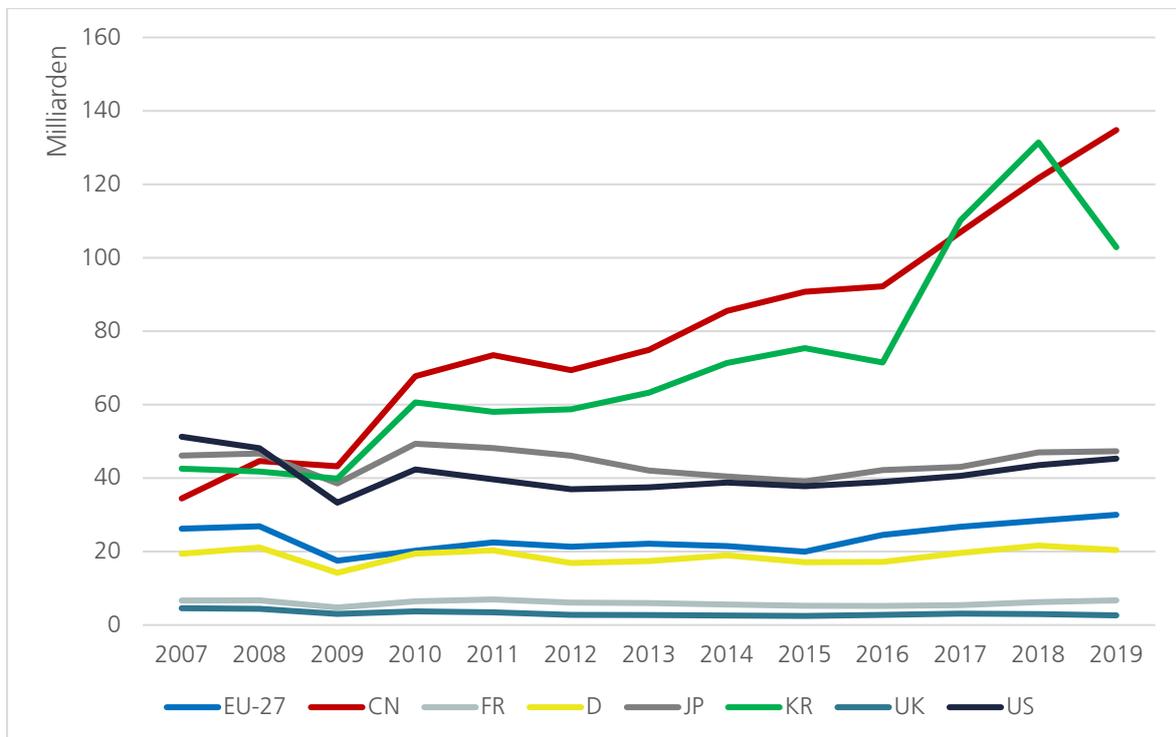
Exemplarisch zeigt Abbildung 15 die Entwicklung der Exporte im Bereich der Mikro- und Nanoelektronik, dem am Handelsvolumen gemessen größten Einzelbereich. Während 2007 die USA, Japan, China und Südkorea in diesem Bereich noch über relativ ähnliche Anteile zwischen 10-15% verfügten, werden Produktion und Handel in diesem Bereich seit Mitte der 2010er Jahre immer deutlicher von China und Südkorea dominiert. Der Trendverlauf für weitere Einzeltechnologien ähnelt z.B. in den Bereichen Digital Security, Digital Mobility und Internet of Things dem oben dargestellten, mit dem Unterschied, dass in den beiden letzteren allein China den Markt dominiert. V.a. in den Bereichen der nun zunehmend für Anwendungen im Bereich Big Data und Künstliche Intelligenz relevanten Komponenten zeigt sich dies in noch auffälligerer Weise – hier verfügt China schon seit einiger Zeit über eine deutliche Marktdominanz, die es nun weiter ausbauen könnte.

Abbildung 14: Exportmarktanteile in den vier Technologiebereichen



Quelle: Eigene Analyse auf Basis von UN COMTRADE

Abbildung 15: Exporte im Bereich Mikro- und Nanoelektronik (in Mrd. USD)



Quelle: Eigene Analyse auf Basis von UN COMTRADE

Auch im Bereich der Materialtechnologien entfällt der bei weitem größte Anteil aller weltweiten Exporte auf China, anders als in den digitalen Technologien ist dieser Anteil gegenüber dem Zeitraum 2010-2012 sogar noch einmal um sechs Prozentpunkte gestiegen. Japan und Deutschland folgen mit rund 10%, wobei Deutschlands Anteil seit 2014 relativ stabil blieb. Japans Anteil ist insbesondere im Bereich der Nanotechnologie deutlich zurückgegangen, wo es Ende der 2000er Dekade mit rund 23% noch gleichauf mit China lag, mittlerweile aber nur noch über einen globalen Exportanteil von 10% verfügt, womit es hinter Südkorea auf dem dritten Platz liegt.

In den Produktionstechnologien ist die Konzentration der Produktionskapazitäten aufgrund des bislang kleineren Anteils Chinas noch deutlich geringer. Relativ gesehen ist in diesem Technologiebereich der Abstand zwischen China und den "Triade-Nationen" wie Japan, den USA sowie der EU-27 noch merklich geringer ausgeprägt, wenngleich auch hier der Anteil Chinas stetig wächst. Zudem lassen sich in diesem Technologiebereich unterschiedliche Entwicklungen bei den Einzeltechnologien erkennen: Im Bereich Photonik hält China einen Marktanteil von über 25%, auch im Bereich Robotik liegt es mittlerweile deutlich vorn. Im Bereich Advanced Manufacturing, der komplexe Maschinen und Messinstrumente umfasst, liegen hingegen nach wie vor Deutschland, die USA und Japan vorn.

Die Außenhandelsstruktur im vierten Bereich der Bio- und Lebenswissenschaften unterscheidet sich stark von den anderen Bereichen, da der Welthandel hier nicht von asiatischen Ländern, sondern von den USA, Deutschland und anderen europäischen Ländern dominiert werden. Insbesondere im Bereich der Lebenswissenschaften, der allen voran medizinische Güter umfasst, wird der Welthandel von Ländern mit starken pharmazeutischen Industrien wie den USA und Deutschland aber auch kleineren Ländern wie der Schweiz, Irland und weiteren Mitgliedsstaaten der EU dominiert. Der Beitrag dieser Nationen spiegelt sich auch im hier besonders hohen Exportanteil der EU-27 (über 25%) wider, welcher weniger als in anderen Bereichen (z.B. in den für Robotik, Photonik und Nanotechnologie relevanten Güter-Bereichen, siehe Anhang) stark allein vom deutschen Anteil getragen wird.

Handelsbilanzen

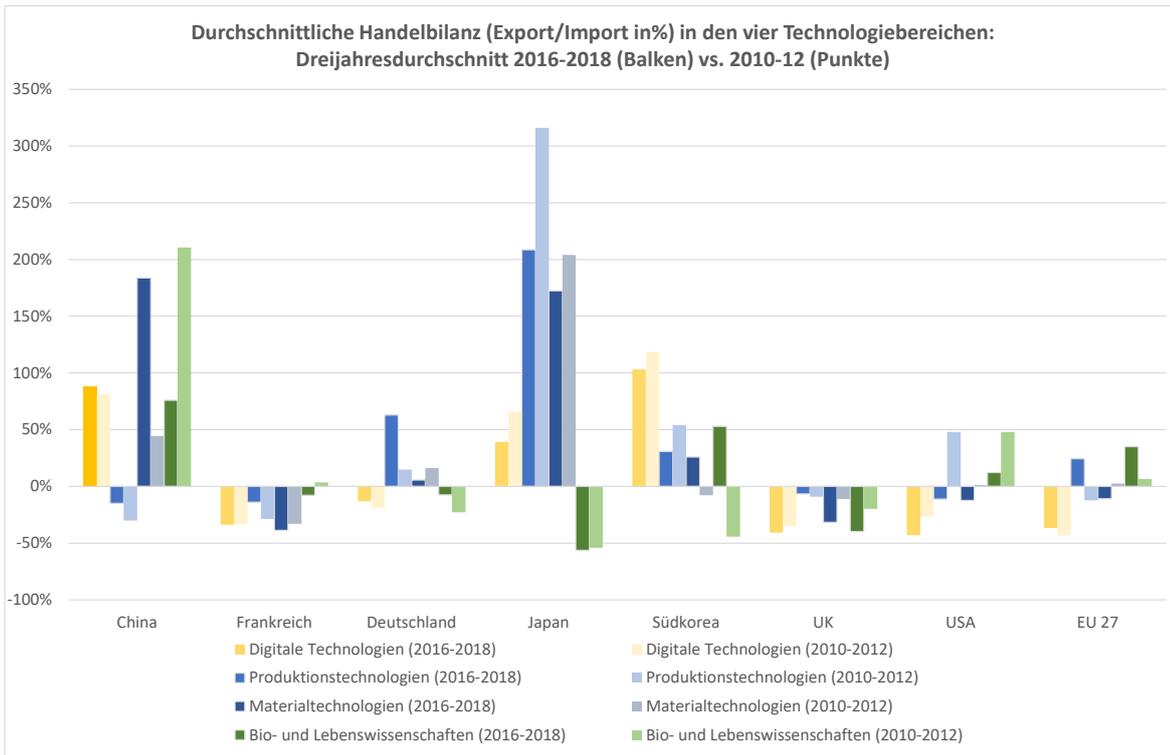
Grundsätzlich unterstreicht die Analyse der relativen Handelsbilanzen (Abbildung 16), dass alle in dieser Studie untersuchten Länder im Hinblick auf die für Schlüsseltechnologien relevante Güterproduktion grundsätzlich gut positioniert sind – anders etwa als dies in den Schwellenländern Mittel- und Südamerikas oder gar klassischen Entwicklungsländern der Fall wäre. Anders als im Falle grundsätzlicher, struktureller Importabhängigkeiten im Technologiebereich spiegeln die im Folgenden dargestellten Unterschiede in den Handelsbilanzen v.a. einer gewachsenen, und sich gleichzeitig in stetigem Wandel befindlichen, globalen Arbeitsteilung zwischen grundsätzlich technologisch befähigten Akteuren. Deutlich wird dies nicht zuletzt dadurch, dass positive Handelsbilanzen allgemein überwiegen oder bzw. positive Bilanzen von der Amplitude her meist deutlicher ausfallen als negative.

In diesem Sinne bestätigt die Betrachtung der Handelsbilanzen die Ergebnisse der Analyse der Exportanteile in vielen Bereichen und unterstreicht noch einmal die Auswirkungen der vorlaufenden (und in Teilen weiter andauernden) Produktionsverlagerung nach Ostasien. Während Japan und Südkorea oft deutliche Exportüberschüsse verzeichnen, weisen die USA und auch die EU-27, in vielen Bereichen, teils weiter steigende, Importabhängigkeiten auf. Eine Ausnahme für Europa bildet traditionell der Bereich Advanced Manufacturing, wengleich auch hier Japan eine relativ deutlich positivere Bilanz erzielt. Darüber hinaus kann Deutschland in den Bereichen Photonik, Robotik, und Lebenswissenschaften merkliche Handelsüberschüsse erzielen. In den Bereichen Digital Security, Internet of Things, Digitale Mobilität, Neue Materialien, Nanotechnologien und Bioökonomie ist die deutsche Handelsbilanz mehr oder minder ausgeglichen. Klare Defizite finden sich dagegen in den Bereichen Künstliche Intelligenz und Big Data, relativ deutlich geringere, aber angesichts des betroffenen Gesamtvolumens hier dennoch erwähnenswerte im Bereich Mikro- und Nanoelektronik.

China befand sich noch Ende der 2000er Jahre in einer Reihe struktureller Abhängigkeiten, wie diese für ein klassisches Schwellenland typisch sind, wengleich dies in den Daten auf Ebene der Gütergruppen schon seit Beginn des Betrachtungszeitraums durch seine Rolle als Produktionsstandort überlagert wurde. Auch in der sichtbaren Bilanz haben sich diese jedoch im Verlauf der letzten fünf Jahre in einigen kritischen Bereichen merklich verringern lassen (Photonik, Robotik, Advanced Materials, Nanotechnologie), auch im besonders kritischen Bereich der Hardwareproduktion zeigen sich erste Verschiebungen in der Gesamtbilanz (Mikro- und Nanotechnologie). Nur in wenigen, eher klassischen Bereichen besteht eine strukturelle Abhängigkeit Chinas noch nahezu unverändert fort (Advanced Manufacturing). In den für die sich dynamisch entwickelnden, softwaregetriebenen Technologien besonders relevanten Güterbereichen hingegen weist China sogar die deutlichsten Überschüsse auf (z.B. Künstliche Intelligenz, Big Data, Internet of Things). Aufgrund der teils begrenzten Trennschärfe der Zuordnung von Gütergruppen zu Technologien sollten diese Ergebnisse im Detail nicht überinterpretiert werden. Deutlich wird allerdings ohne Zweifel, dass China vor allem hinsichtlich der für die zukünftige Produktentwicklung von Gütern im digitalen Bereich bereits heute hervorragend, wenn nicht marktbestimmend, positioniert ist.

Deutschland exportiert im Bereich Produktionstechnologien knapp 60% mehr als es importiert, mit steigender Tendenz gegenüber 2010-2012, kann in diesem Bereich also weiter von seinem traditionellen Alleinstellungsmerkmal profitieren. In den anderen Bereichen ist die Handelsbilanz ausgeglichen, mit leichten Überschüssen in den Materialtechnologien und leichten Defiziten in den digitalen Technologien und den Bio- und Lebenswissenschaften. Damit ist Deutschland besser positioniert als Frankreich und Großbritannien, die in allen Bereichen Nettoimporteure sind, und auch die Vereinigten Staaten, bei denen dies oftmals der Fall ist. Merkliche Defizite bestehen vor allem in den oben genannten Bereichen Künstliche Intelligenz und Big Data, in denen sich China positioniert. Die Entwicklung für die EU-27 ähnelt Deutschlands, nur im Bereich der Bio- und Lebenswissenschaften spielen auch andere europäische Länder eine stärkere Rolle in der Beeinflussung des Trends.

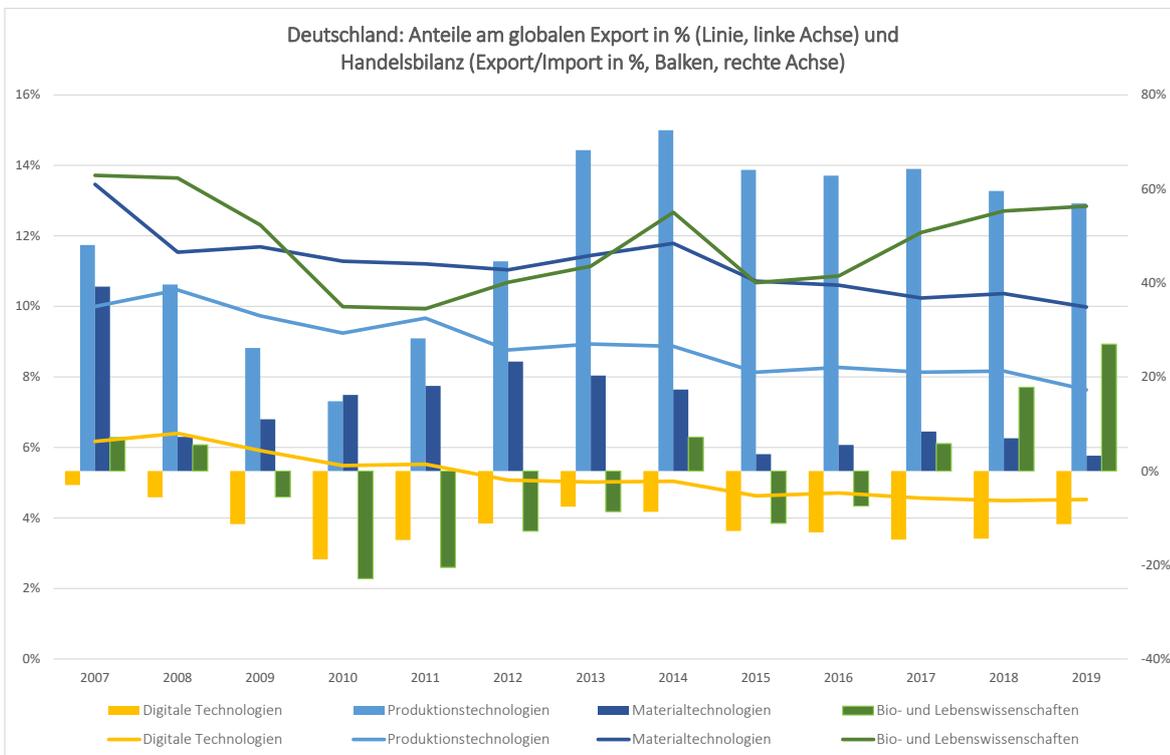
Abbildung 16: Handelsüberschuss bzw.- Defizit nach Technologiebereichen (in %)



Anmerkung: Relative Handelsbilanz ((Export/Import) - 1) * 100; China ohne Hong Kong

Quelle: Eigene Auswertungen auf Basis von UN COMTRADE

Abbildung 17: Deutschlands Anteile am globalen Export

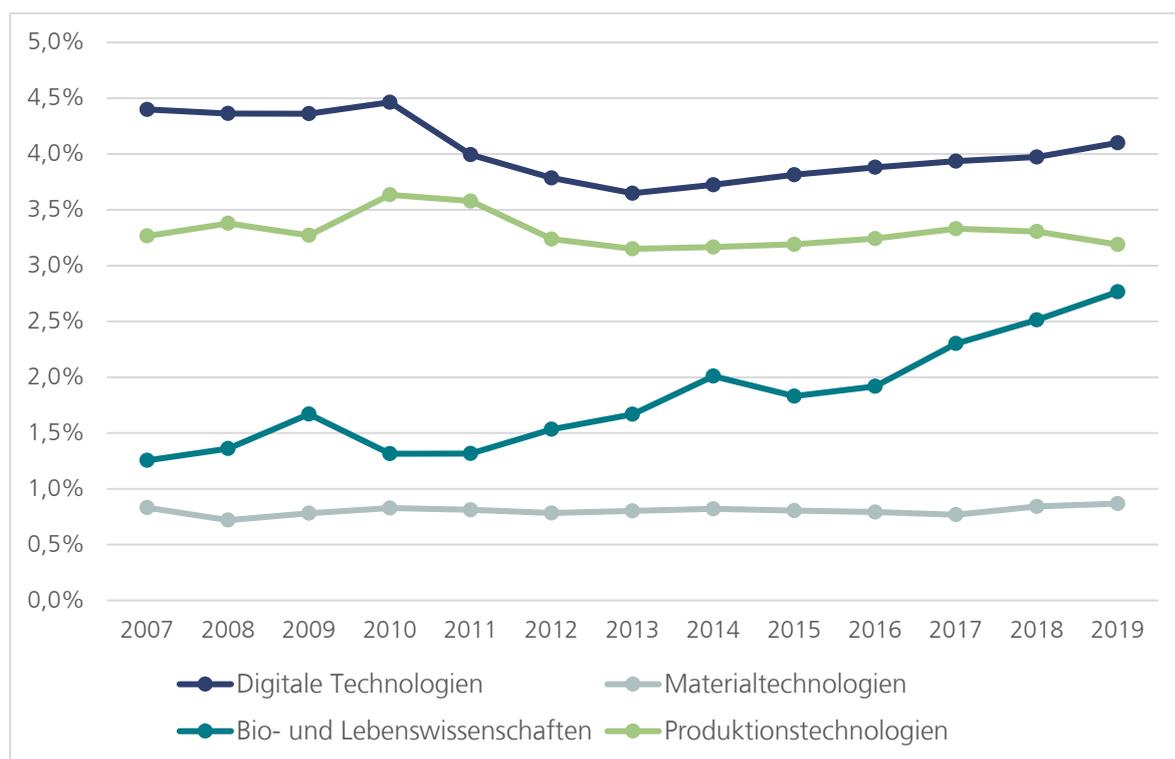


Quelle: Eigene Auswertungen auf Basis von UN COMTRADE

Abbildung 17 zeigt die Entwicklung der Exportmarktanteile sowie der Handelsbilanzen Deutschlands über den kompletten Betrachtungszeitraum von 2007 bis 2019. Hierbei wird noch einmal die Sonderstellung der Produktionstechnologien für den deutschen Außenhandel deutlich. Auch wenn Deutschlands Anteil am globalen Export in diesem Bereich über die Zeit leicht abnimmt, erzielt es noch immer Überschüsse zwischen 50 und 60%. Der Bereich Bio- und Lebenswissenschaften verdient v.a. Aufmerksamkeit, da sich Deutschland hier von einem Nettoimporteur zu einem Nettoexporteur entwickelt hat.

Hierzu belegt Abbildung 18 ergänzend, dass dieser Trend nicht etwa von einer Abnahme der Importe getrieben ist, sondern tatsächlich von einer Zunahme der Exporte. Bei den digitalen Technologien sowie den Materialtechnologien ist der Trend in den letzten Jahren relativ unverändert. In Summe entspricht die Exportstruktur Deutschlands dem globalen Trend insofern, als dass Güter mit Relevanz für digitale Technologien vor jenen mit Relevanz für Produktionstechnologien die größten Exportgütergruppen darstellen, während Güter mit Bezug zu den Materialtechnologien den mit Abstand kleinsten Anteil ausmachen.

Abbildung 18: Anteile der vier Technologiebereiche an Deutschlands Exporten



Quelle: Eigene Auswertungen auf Basis von UN COMTRADE

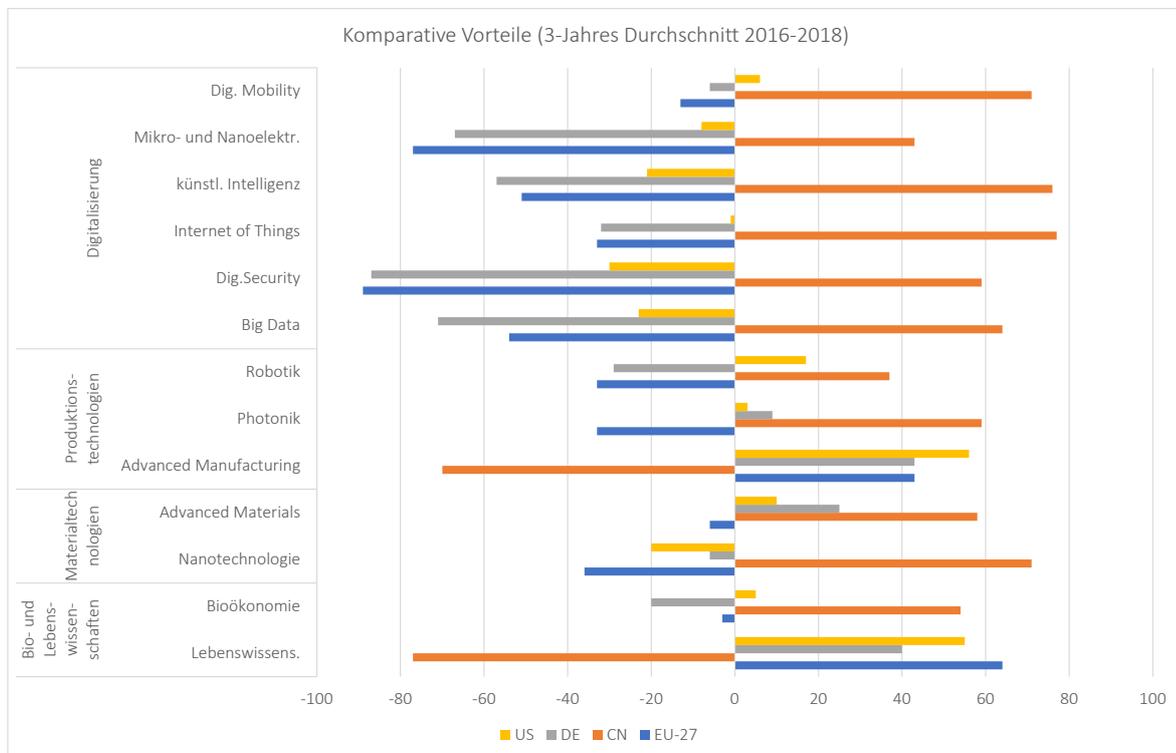
Spezialisierung

Der offenbarte komparative Vorteil (engl. *Revealed Comparative Advantage*, kurz: *RCA*) ist eine weitverbreitende Methode in der Handelsökonomie, um zu messen, ob ein Land, relativ zu seiner Größe, in einem bestimmten Sektor ein signifikanter Exporteur ist. Hierbei wird Exportanteil des Produkts oder Sektors in einem Land in Relation zu dem Anteil dieses Produkts oder Sektors im globalen Markt gesetzt.

Abbildung 19 zeigt die komparativen Vorteile als Dreijahresdurchschnitt (2016-2018) in einer normalisierten Form (Formel siehe vorheriger Abschnitt zu Patenten), wobei ein positiver Wert einen komparativen Vorteil darstellt ($RCA > 1$) und negative Werte bedeuten, dass das nationale Exportanteil dieses Sektors kleiner ist als der globale Durchschnitt.

Mit Ausnahme der Lebenswissenschaften und dem Bereich "Advanced Manufacturing" zeigt China in allen Schlüsseltechnologien starke Exportspezialisierungen. Diese sind insbesondere in den digitalen Technologien wie Internet of Things, Künstliche Intelligenz und Digitale Mobilität stark ausgeprägt. Diese KETs sind jedoch volumenmäßig deutlich kleinere Sektoren als bspw. die Mikro- und Nanoelektronik und dementsprechend ggf. etwas weniger aussagekräftig. In der handelsstärksten KET, der Mikro- und Nanoelektronik ist Chinas komparativer Vorteil etwas weniger stark ausgeprägt.

Abbildung 19: Komparative Vorteile in den 13 Einzeltechnologien



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Eigene Auswertungen auf Basis von UN COMTRADE

Deutschland und die EU-27 zeigen vergleichsweise ähnliche Spezialisierungsgrade und -muster, was nicht zuletzt daran liegt, dass Deutschland den größten Anteil an den europäischen Exporten hält. In den digitalen Technologien haben die EU-27 und Deutschland durchweg negative RCA, während bei den Produktionstechnologien Deutschland in der Photonik weiterhin komparative Vorteile besitzt. Die höheren RCA in den Lebenswissenschaften und Advanced Manufacturing bestätigen die Trends aus dem vorherigen Abschnitt.

Mit Blick auf den Export technologierelevanter Güter zeigen die USA zwar im Bereich der digitalen Technologien ebenfalls keine nennenswerte Spezialisierung mehr, allerdings sind die Werte deutlich weniger negativ als für die EU-27 und Deutschland. Dies verdeutlicht, dass die Halbleiterproduktion relativ gesehen in den USA weiterhin einen höheren Anteil an den Exporten ausmacht als in Europa. Zudem zeigen die ebenfalls positiven Werte der USA in den Bereichen Lebenswissenschaften und Advanced Manufacturing, dass die globalen Exporte in diesen Schlüsseltechnologien von Europa und den USA geprägt werden.

Komplexität und Exportmarktanteile

Abbildung 20 belegt einen grundsätzlichen Zusammenhang zwischen wirtschaftlicher Diversifikation und Exportanteilen in den Schlüsseltechnologien in Form einer positiven Korrelation zwischen dem sog. Economic Complexity Index (ECI) sowie dem Anteil von Schlüsseltechnologien in der Exportstruktur einzelner Länder. Während sich hieraus keine direkte Kausalität ableiten lässt, bestätigt die Abbildung dennoch jenen allgemeinen Zusammenhang zwischen dem Diversifizierungsgrad von Volkswirtschaften und deren Technologieorientierung, der in der Entwicklungstheorie bereits seit Jahrzehnten postuliert wird. Dessen ungeachtet zeigt die Analyse ebenfalls, dass insbesondere (süd-)ostasiatische Länder wie China, Thailand, Korea, Singapur oder die Philippinen merklich höheren Exportanteil an schlüsseltechnologierelevanten Gütern ausweisen, als dies auf Grundlage des Komplexitätsniveaus ihrer Produktionskapazitäten zu vermuten wäre. Hierin spiegelt sich eine weltweite Arbeitsteilung, die durch lohnkosteninduzierte Verlagerungen von Produktionskapazitäten initiiert wurde, mittlerweile aber eine komplexere Pfadabhängigkeit aufweist. Andererseits ist Deutschland zwar das Land mit der weltweit dritthöchsten ökonomischen Komplexität nach Japan und der Schweiz, erzielt aber im Vergleich zu ostasiatischen Staaten nur einen niedrigeren Anteil von Schlüsseltechnologieexporten an seinen Gesamtausfuhren.

4 Bewertung der Position Deutschlands in relevanten Feldern des Außenhandels (Importabhängigkeiten)

Auch in Bezug auf die technologische Souveränität Deutschlands ist die Betrachtung der Handelsströme von Relevanz, da sie Aufschluss hinsichtlich der Versorgungssicherheit im Bereich Schlüsseltechnologierelevanter Güter gibt (Edler et al., 2020). Allgemein ist hierbei zunächst die Frage zu klären, ob Deutschlands Importe in bestimmten Gütergruppen stärker auf einzelne Länder konzentriert sind, als dies in diesen Gütergruppen länderübergreifend oder aber in anderen Gütergruppen der Fall ist.

Zur Operationalisierung der Marktkonzentration und zur Analyse möglicher Abhängigkeiten wurden Hirschman-Herfindahl-Indizes (HHI) für die 13 Einzeltechnologien gebildet. Der HHI ist ein weitverbreitetes Konzept zur Messung von Marktkonzentration und der HHI wird aus der Summe der quadrierten Marktanteile (in Prozentpunkten) aller Marktteilnehmer gebildet (Details siehe Methodenanhang).

Abbildung 21 zeigt die Marktkonzentration deutscher Importe im Vergleich mit der globalen Marktkonzentration. Hierbei wird deutlich, dass Deutschlands Importe, mit Ausnahme derer in den Bio- und Lebenswissenschaften, in allen Schlüsseltechnologien leicht geringer konzentriert sind bzw. diversifizierter sind als im weltweiten Durchschnitt. Gleichzeitig ist die Konzentration in den Schlüsseltechnologien deutlich höher, als sie technologieübergreifend für alle Importe der Fall ist (vgl. gelbe Linie für Deutschland, blaue Linie für Welt).

Auffallend ist zudem, dass Deutschlands Importe im stark souveränitätsrelevanten Bereich Digital Security unterdurchschnittlich konzentriert sind und somit deutlich weniger von China und Südkorea abhängen, als dies angesichts deren gemeinsamen Weltexportanteils von ca. 60% zu vermuten wäre.

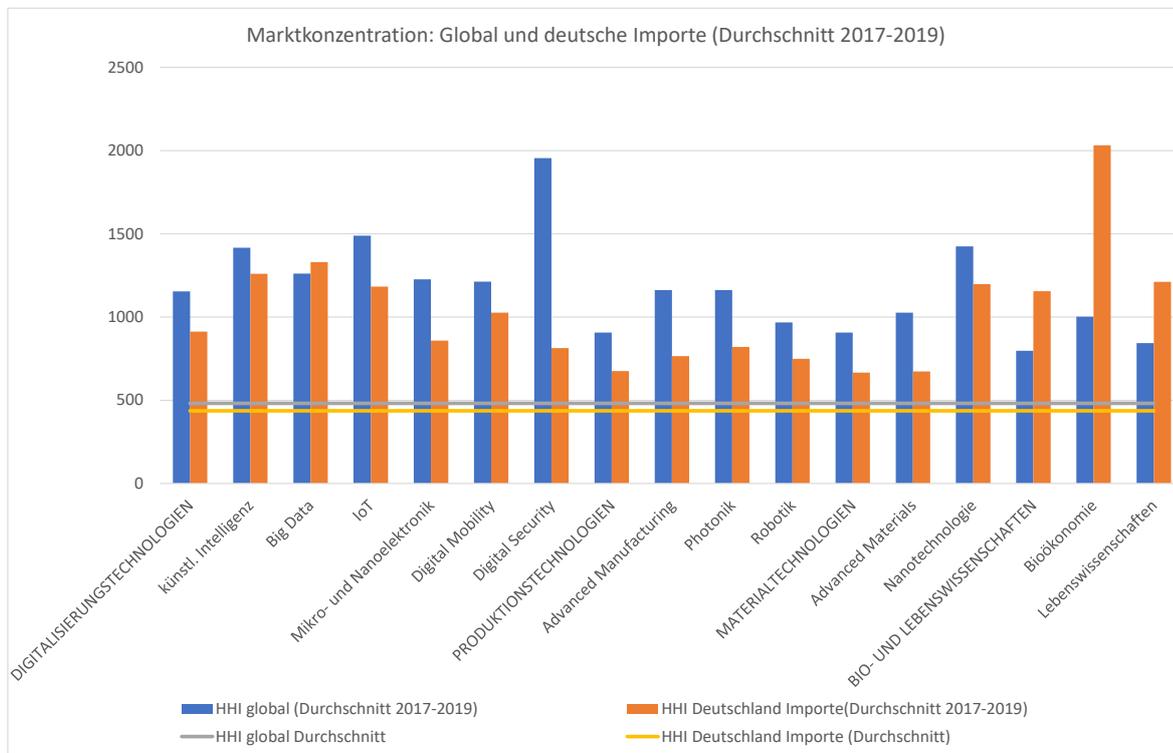
Tabelle 3 zeigt zudem für jede Schlüsseltechnologie die drei wichtigsten Importländer Deutschlands. Analog zum Weltmarkt hält auch China ebenfalls den größten Marktanteil an den deutschen Importen und dieser Anteil hat in den letzten Jahren auch in allen Schlüsseltechnologien, mit Ausnahme der Photonik und Digital Security, zugenommen. Nichtsdestotrotz finden sich regelmäßig auch einige kleinere europäische Länder wie Tschechien, Polen und Ungarn unter den Hauptimportnationen. In dieser innereuropäischen Arbeitsteilung findet sich eine der zentralen Ursachen der im Weltvergleich geringeren Konzentration von Deutschlands Importen im Bereich der Schlüsseltechnologien.

Diese Rolle der geographisch und politisch nächstehenden Länder Osteuropas kann für den Erhalt technologischer Souveränität mittel- bis langfristig von Bedeutung sein. Insbesondere im Bereich der digitalen Technologien sind osteuropäische Importe signifikant.

Zudem zeigen sich Unterschiede innerhalb der digitalen Technologien: Im klassischen Mikro- und Nanoelektronikbereich ist Malaysia zu einem relevanten Produktionsstandort vieler multinationaler Elektronikkonzerne und damit zu einem der wichtigsten Exporteure aufgestiegen. In den für die kleineren, dynamischeren Bereiche wie Künstlicher Intelligenz, Internet of Things oder Big Data relevanten Gütergruppen werden Produktion und Export dagegen proportional deutlich stärker von China dominiert.

Bei den Produktionstechnologien kommen Deutschlands Importe analog zum globalen Trend noch vermehrt aus Japan und den USA. Auch in den Materialwissenschaften ähnelt die Entwicklung dem globalen Bild, mit fallenden Importen aus Japan und dafür deutlich steigenden Anteilen von Südkorea und China. Die Bio- und Lebenswissenschaften sind der einzige Bereich, in dem die deutschen Importe eine höhere Konzentration als der globale Durchschnitt aufweisen. Tabelle 3 zeigt hierzu jedoch, dass der Effekt in den Lebenswissenschaften hauptsächlich durch umfangliche Importe aus den Nachbarländern Schweiz und Niederlande getrieben wird und damit Evidenz europäischer Integration, nicht aber einer Besorgnis erregenden Abhängigkeit von asiatischen Ländern ist. Auch bei der hohen Konzentration im Bereich Bioökonomie handelt es sich möglicherweise um ein statistisches Artefakt, da hier vor allem der Umschlagplatz Singapur einen sehr hohen Anteil aufweist, der aber nur bedingt etwas über den ursprünglichen Produktionsort aussagt.

Abbildung 21: Importkonzentration in den vier Schlüsseltechnologiebereichen und den 13 Einzeltechnologien, Hirschmann-Herfindahl Indizes



Anmerkung: "Importkonzentration" bezieht sich auf die Streuung der Herkunft relevanter Importgüter; je höher der Konzentrationsgrad, je stärker die Abhängigkeit von einzelnen Nationen

Quelle: Eigene Analyse basierend auf UN COMTRADE

Tabelle 3: Wichtigste Herkunftsländer deutscher Importe im Bereich der Schlüsseltechnologien

Digitale Technologien I								
Importanteil (2015-2019) sowie Entwicklung 2009-2014 in Prozentpunkten								
Künstliche Intelligenz			Big Data			Internet of Things		
CN	32,60%	-0,20%	CN	31,70%	8,70%	CN	30,50%	2,20%
CZ	8,20%	1,40%	CZ	10,90%	1,80%	PL	6,60%	3,50%
PL	7,40%	3,80%	TH	6,70%	-0,40%	US	6,30%	-0,30%

Digitale Technologien II								
Importanteil (2015-2019) sowie Entwicklung 2009-2014 in Prozentpunkten								
Mikro-und Nanoelektronik			Digital Mobility			Digital Security		
MY	13,80%	4,30%	CN	26,50%	-4,00%	CN	20,10%	6,20%
CN	12,90%	-9,60%	HU	11,90%	4,90%	UK	8,10%	0,60%
US	10,00%	-0,30%	US	8,40%	1,60%	US	7,20%	-2,20%

Produktionstechnologien								
Importanteil (2015-2019) sowie Entwicklung 2009-2014 in Prozentpunkten								
Advanced Manufacturing			Photonik			Robotik		
JP	15,40%	-3,80%	CN	16,50%	-10,60%	CN	16,00%	4,30%
CH	14,50%	-0,10%	JP	11,60%	0,90%	US	9,40%	-0,30%
US	12,30%	-1,60%	US	11,50%	3,30%	JP	8,00%	-2,00%

Materialwissenschaften					
Importanteil (2015-2019) sowie Entwicklung 2009-2014 in Prozentpunkten					
Advanced Materials			Nanotechnologie		
CN	15,80%	3,70%	CN	22,00%	6,90%
JP	8,70%	0,30%	KR	15,00%	11,30%
PL	7,00%	1,80%	JP	13,00%	-6,10%

Bio- und Lebenswissenschaften					
Importanteil (2015-2019) sowie Entwicklung 2009-2014 in Prozentpunkten					
Bioökonomie			Lebenswissenschaften		
SG	43,30%	5,50%	NL	22,90%	6,60%
CN	13,10%	0,60%	CH	17,80%	-0,10%
BE	10,40%	0,30%	US	14,20%	-8,80%

Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von UN COMTRADE

5 Bewertung der Position Deutschlands in der Standardisierung im Bereich ausgewählter Schlüsseltechnologien

Obwohl die Relevanz von Normen und Standards auch für die nationale Positionierung in Schlüsseltechnologien relevant sind, fehlen bislang Indikatoren, die die Aktivitäten der nationalen Akteure in den verschiedenen Schlüsseltechnologien transparent machen. Dies liegt daran, dass Normen und Standards Gemeinschaftsprodukte sind, die in Zusammenarbeit vieler verschiedener Gruppen und Akteure erstellt werden. Sie enthalten daher in der Regel keine Autorenlisten. Jedoch existieren indirekte Möglichkeiten, die Akteure, die Inhalte zur Normung und Standardisierung beitragen, zu identifizieren (Blind et al., 2020). Im Folgenden wird gezeigt, welche Position Deutschland auf Basis standard-essentieller Patente bzw. standard-revanter Publikationen in der internationalen Standardisierung in verschiedenen Schlüsseltechnologien einnimmt. Im Vorfeld haben wir auch die Leitungsfunktionen in Technischen Komitees der internationalen Standardisierungsorganisationen ISO, IEC und ITU identifiziert, die im Zusammenhang zu den verschiedenen Schlüsseltechnologien stehen. Die Vereinigten Staaten halten hier immer noch den Löwenanteil der Vorsitze gefolgt von Korea und Japan. Aber deutsche Vertreter sind in Produktionstechnologien, aber auch in den Bio- und Lebenswissenschaften in prominenten Leitungsfunktionen in den Technischen Komitees der internationalen Standardisierungsorganisationen zu finden, während chinesische Vertreter in den Bereichen der Schlüsseltechnologien mit wenigen Ausnahmen noch keine sichtbaren Leitungspositionen einnehmen. Für alle Technischen Komitees bei ISO kann man jedoch durchaus einen signifikanten Anstieg der Leitungspositionen durch China beobachten, während vor allem die Vereinigten Staaten diese Positionen abgeben haben. Diese Entwicklungen folgen eng den entsprechenden Strukturen der Patentportfolios der beiden Länder (Blind und Von Laer, 2021).

Komplementär zu diesen qualitativen Hintergrundinformationen wenden wir zwei quantitative Ansätze an, um den nationalen Einfluss auf internationale Standardisierung zu bestimmen. Eine schon länger etablierte Möglichkeit, die an der Normung und Standardisierung beteiligten Akteure zu identifizieren und deren Aktivitäten zu beobachten, ist die Analyse standard-essentieller Patente (Pohlmann et al. im EFI Bericht, 2012). Insbesondere im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik werden seit dem Beginn der internationalen Standardisierung im Bereich des Mobilfunks (Bekkers et al., 2002) für die standard-relevante Patente von den Eigentümern als standard-essentiell deklariert. Die Standardisierungsorganisationen haben eigene Datenbanken. Mithilfe der Datenbank der IPlytics GmbH konnte der aktuelle Stand der ca. 300.000 Deklarationen in den wichtigsten Standardisierungsorganisationen für die Analyse genutzt werden.

Jedoch haben deutsche Organisationen weniger als 1% dieser standard-essentiellen Patente deklariert. Hierbei dominiert die Fraunhofer-Gesellschaft, aber auch Siemens hat vor allem in der Vergangenheit standard-essentielle Patente deklariert. Inzwischen haben jedoch auch Automobilun-

ternehmen vereinzelt angefangen, standard-essentielle Patente zu deklarieren. Trotz der im Vergleich zum deutschen Anteil an den globalen Patentanmeldungen sehr unterdurchschnittliche Anteil an den Deklarationen auch in ihrer absoluten Anzahl, werden die wesentlichen Ergebnisse der aktivsten Länder kurz dargestellt.

Im Bereich Advanced Manufacturing dominieren die Vereinigten Staaten mit einem Drittel der Deklaration vor Korea und Japan mit etwas über 10%. Europa weist weniger als 10% auf, wobei Deutschland mit 12 Deklarationen etwas über 1% der knapp Tausend Deklarationen hält. Chinesische Unternehmen haben ihren Aufholprozess im Vergleich zur Mobilfunktechnologie (Von Laer et al., 2021) hier erst gestartet und weisen knapp 4% der Deklarationen auf. Im Bereich der Photonik halten dagegen japanische Unternehmen fast ein Drittel der Deklarationen, gefolgt von Korea mit einem Viertel. Schließlich sind in der Robotik mehr als die Hälfte der knapp 800 Deklarationen Unternehmen aus den Vereinigten Staaten zuzuordnen, gefolgt von koreanischen Unternehmen, die ungefähr ein Viertel deklariert haben. Deutsche Unternehmen weisen wiederum etwas mehr als 1% auf, während chinesische Unternehmen knapp 2% für sich beanspruchen.

Im Bereich der Künstlichen Intelligenz, als eine der wichtigen Digitalisierungstechnologien, in denen Software und auch Open Source Software eine im Vergleich zu Patenten wichtigere Rolle spielen (Blind et al. 2021), aber auch zunehmend die Schnittstelle zur Standardisierung relevant wird (Blind und Böhm 2019), beanspruchen Unternehmen aus den Vereinigten Staaten etwas mehr als ein Viertel der deklarierten Patente, koreanische und japanische Unternehmen jeweils etwas mehr als ein Fünftel der Deklarationen. Hier beanspruchen deutsche Unternehmen nicht einmal 1%, während chinesische Unternehmen schon über 4% der knapp 1.400 Deklarationen für sich reklamieren. Im mit ca. 13.000 Deklarationen schon sehr stark angewachsenem Bereich Digital Security gibt es eine größere Diversität hinsichtlich der Länder mit Unternehmen, die Patente als standard-essentiell deklariert haben. Zwar halten Unternehmen aus den USA mehr als ein Viertel der Deklarationen, aber auch die Unternehmen aus Ländern der EU-27 kommen schon auf über 20%, wovon deutsche Unternehmen ungefähr 2% für sich reklamieren. Chinesische Unternehmen beanspruchen etwas mehr als 10%, gefolgt von koreanischen und japanischen Unternehmen mit jeweils etwas mehr als 8%. Eine ähnliche Vielfalt sehen wir im Bereich Big Data, in dem aber durch seinen starken Softwareanteil nur etwas mehr als 800 Patente als standard-essentiell deklariert wurden. Hier halten wiederum Unternehmen aus den USA etwas mehr als ein Viertel der Deklarationen, während Patentinhaber aus den EU-27 auf circa 15% kommen, gefolgt von koreanischen mit 10%, japanischen und chinesischen Unternehmen mit jeweils knapp 10%. In diesem Bereich deklarieren deutsche Unternehmen weniger als 1% aller Deklarationen. Im Bereich mit über 17.000 standard-essentiellen Patenten, den Internet of Things, halten Unternehmen aus den USA knapp die Hälfte der Deklarationen vor Unternehmen aus der EU27 mit knapp 20%. Es folgen koreanische Unternehmen mit etwas über und japanische Unternehmen etwas unter 10%. Chinesische Unternehmen halten ungefähr 3%, während Unternehmen aus Deutschland 1,5% deklariert haben. Bei der digitalen Mobilität mit etwas über 4.000 standard-essentiellen Patenten haben

Unternehmen aus den Vereinigten Staaten ungefähr die Hälfte der standard-essentiellen Patente deklariert, während Unternehmen aus EU27 nur ungefähr 15% für sich beanspruchen. Unternehmen aus Korea sind für 8%, chinesische Unternehmen für 5% der Deklarationen verantwortlich. Hier spielt die Dominanz chinesischer Unternehmen im Bereich 5G mit rein (Pohlmann et al., 2020, Dinges et al., 2021), da hiervon auch Technologien für das autonome Fahren betroffen sind. Unternehmen aus Deutschland halten in diesem strategisch für die Automobilindustrie lediglich 1,5% der deklarierten Patente. Schließlich halten Unternehmen aus den Vereinigten Staaten über ein Drittel der standard-essentiellen Patente im mit ungefähr 700 Deklarationen relativ kleinen Bereich Mikro- und Nanoelektronik gefolgt von Unternehmen aus Japan mit 15% und Korea mit etwas über 10%. Deutsche Unternehmen zeichnen für 2% der standard-essentiellen Patente verantwortlich.

Durch die in der Regel nicht vorhandene Rolle der Informations- und Kommunikationstechnik, die weit über 90% aller standard-essentiellen Patente abdeckt, gibt es in den Materialwissenschaften und den Bio- und Lebenswissenschaften nur sehr wenige Deklarationen, die keine quantitative Analyse erlauben. Deshalb greifen wir auf standard-relevante Publikationen zurück. Standard-relevante Publikationen sind in der Bibliographie von Standards gelistet (Blind 2019). Aus ihnen lassen sich sowohl die Autoren als auch deren Institutionen identifizieren, auf deren Beiträge Standards aufbauen. Aktuell weisen die 20 000 ISO-Standards und vergleichbare ISO-Dokumente, die in der Analyse berücksichtigt wurden, über 60.000 Referenzen wissenschaftlicher Publikationen auf, die in der Datenbank SCOPUS gelistet sind. Autoren aus Deutschland sind für ca. 10% aller Autorenschaften verantwortlich (Blind et al., 2020). Neben dem Löwenanteil der Autor:innen aus Universitäten sind sonst Wissenschaftler:innen aus Ressortforschungseinrichtungen, der Forschungsgesellschaften, aber auch Unternehmen vertreten. ISO-Standards decken zwar in der Regel die Informations- und Kommunikationstechnik nicht ab, aber wir können mit den standard-relevanten Publikationen die Beiträge der Länder zu den beiden Materialwissenschaften und Bio- und Lebenswissenschaften bestimmen, für die die Deklarationen der standard-essentiellen Patente keine Analysen zulassen. Bei den Materialwissenschaften kommen die Autoren der Referenzen in internationalen ISO-Standards zu über einem Drittel aus den EU27, während die Autoren aus den Vereinigten Staaten für ungefähr ein Viertel der Autorenschaften verantwortlich sind. Deutsche Autoren stehen für ca. 10% noch vor britischen Autoren mit knapp 10%, japanischen Autoren mit 8% und chinesischen Autoren mit 5%. Bei den Bio- und Lebenswissenschaften ergibt sich ein ähnliches Bild mit über einem Drittel der Autorenschaften aus den EU27 und einem Viertel aus den Vereinigten Staaten. Deutsche Autoren sind für etwas mehr als 10% der Autorenschaften verantwortlich gefolgt von britischen Autoren mit einem Anteil von etwas als weniger als 10%. Japanische Autoren stehen für 4%, chinesische Autoren für 2,5% der Autorenschaften.

Fasst man die Ergebnisse der Analysen standard-essentieller Patente und standard-relevanter Publikationen zu den verschiedenen Teilbereichen zusammen, kommt man zu folgenden Hauptbe-

obachtungen bezüglich des deutschen Einflusses auf die internationale Standardisierung. Zum einen deklarieren Organisationen aus Deutschland nur circa 1% der standard-essentiellen Patente, die sich nahezu ausschließlich auf die Informations- und Kommunikationstechnologie konzentrieren. Hiervon wird ein Großteil von der Fraunhofer Gesellschaft im Bereich Video- und Audio-coding deklariert (Blind et al., 2020). Die Deklarationen werden von Unternehmen aus den Vereinigten Staaten dominiert gefolgt von Unternehmen aus Korea und Japan. Chinesische Unternehmen haben in diesen Bereichen im Gegensatz zur Mobilfunktechnologie erst angefangen, Patente als standard-essential zu deklarieren. Zum anderen sind im Bereich der Materialwissenschaften und der Bio- und Lebenswissenschaften ca. 10% der in den Standards der internationalen Standardisierungsorganisation referenzierten wissenschaftlichen Publikationen Autoren deutscher Organisationen zuordenbar. In diesen beiden Bereichen haben Autoren aus den EU27 auch den größten Anteil an Referenzen noch vor den Vereinigten Staaten. Insgesamt ist die Schwäche Deutschlands in den Informations- und Kommunikationstechnologien auch in den standard-essentiellen Patenten zu beobachten, während die stärkere Position Deutschlands in den Materialwissenschaften und den Bio- und Lebenswissenschaften sich auch in den Anteilen an den standard-relevanten Publikationen widerspiegelt.

Kapitel 3 & 4 - Fazit für die vorliegende Studie

Neben dem Aufstieg Chinas, der sich vor allem seit 2015 voll manifestiert, ist international v.a. auch eine Stärkung Koreas zu beobachten. Die USA hatten im Rahmen der Weltwirtschaftskrise Ende der 2000er Jahre teils stärkere Einbußen zu verzeichnen als europäische Akteure haben diesen Einschnitt aber mittlerweile in den meisten Bereichen überwunden,

Wie bereits in der Vergangenheit nimmt Deutschland mit Blick auf Patentanmeldungen eine international merklich bedeutendere Rolle ein, als im Bereich Wissenschaft oder Außenhandel. Noch immer ist Deutschland in dieser Hinsicht gegenüber seinem globalen Wertschöpfungsanteil deutlich überdurchschnittlich positioniert. Schwerpunkte finden sich hierbei v.a. im Bereich der klassischen Produktionstechnologien, in denen Deutschland auch global absolut maßgeblich bleibt, auch wenn asiatische Länder aufholen. Die Anteile von Bio- und Lebenswissenschaften und Materialwissenschaften an den wissenschaftlich-technologischen Gesamtaktivitäten Deutschlands nehmen leicht ab, die von Digitalisierungstechnologien und Produktionstechnologien demgegenüber leicht zu,

In den aktuell relevantesten Bereichen der Digitalisierungstechnologien (v.a. Künstliche Intelligenz, Big Data, Digitale Sicherheit; eingeschränkt auch Internet of Things) steht Deutschland dagegen absolut betrachtet im Schatten der USA und Chinas, was sich, wie oben dargestellt, mittelfristig auch auf die Entwicklungen in anderen Schlüsseltechnologien auszuwirken droht. Zwar werden globale Entwicklungen z.B. in den Bereichen Künstliche Intelligenz und/oder Big Data

relativ betrachtet gut mitvollzogen, was aufgrund schon zu Beginn der wesentlich niedrigeren Basis allerdings nicht zu einem Aufholen in absoluter Hinsicht beiträgt. Mindestens unter den technologisch führenden Nationen ordnet sich Deutschland zunehmend seiner Größe entsprechend ein und verliert damit seine vormals auch absolut maßgebliche Stellung im globalen Technologiewettbewerb. Auch insgesamt führt das Erstarken Chinas, Koreas sowie, wissenschaftlich, Indiens zu einem deutlichen Rückgang jenes Anteils, den die ehemaligen Triade-Länder (US, EU, JP) an der weltweiten Innovationstätigkeit halten.

Dessen ungeachtet verfügt Deutschland noch immer über mehr als ausreichende Kapazitäten und Kompetenzen, um in relevanten Bereichen Technologien selbst fortzuentwickeln und diese auf neue Anwendungszusammenhänge anzupassen. Durch die zunehmend alles durchdringende Rolle von Digitalisierungstechnologien besteht allerdings zunehmend der Gefahr der "Aushöhlung" bestehender Kompetenzen in spezifischen Anwendungsfeldern, wie v.a. den Produktionstechnologien.

Darüber hinaus sind deutsche Unternehmen bzw. Institutionen im Bereich der Ausgestaltung zukünftiger Rahmenbedingungen bis auf wenige Ausnahmen in fast dramatischer Weise abwesend. Zurzeit scheint es Deutschland im Bereich der Standardisierung in der Informations- und Kommunikationstechnologie nicht mehr zu gelingen, sich in relevante Foren der Aushandlung zukünftiger Standards maßgeblich, oder auch nur erkennbar mit seinen eigenen Technologien einzubringen. Offenbar fehlt es deutschen Akteuren in dieser Hinsicht zzt. an der Fähigkeit oder am Willen, die Grundlage ihrer eigenen Zukunft eigenständig mitzugestalten. Sollte sich diese Haltung durchsetzen, droht mittelfristig bereits die Möglichkeit zur souveränen Mitgestaltung dieser Prozesse verloren zu gehen.

Zudem spiegeln die wissenschaftlich-technologischen Kooperationsmuster Deutschlands mit verschiedenen Ländern weltweit noch immer die techno-ökonomischen Strukturen der 1980er und 1990er Jahre wider. Während sowohl wissenschaftlich als auch mit Blick auf Konzernstrukturen (gespiegelt in Ko-Patenten) eine enge Integration mit europäischen Partnerländern und Nordamerika besteht, konnten vergleichbare Verbindungen zu den mittlerweile führenden Nationen Asiens nicht aufgebaut werden. Positiv betrachtet unterstreichen diese Zahlen den Erfolg und auch die Nachhaltigkeit der europäischen und transatlantischen Integration Deutschlands. Gleichzeitig zeigen sie jedoch auf, dass zu großen Teilen der zurzeit zentralen Wissensquellen in Asien noch immer kein hinreichender Kontakt aufgebaut werden konnte, wenngleich z.B. der Aufstieg Japans und auch jener Koreas mittlerweile lange zurückliegen. Gerade mit China ist zzt., auch aus geopolitischen Gründen, eine weitere Desintegration zu beobachten, lediglich mit Indien zeichnet sich ein etwas anderes Bild.

Hinzu kommt die Tatsache, dass bereits seit Anfang der 1990er Jahre weite Teile der Produktion relevanter Technologiekomponenten ins, meist asiatische, Ausland verlagert wurden. Der Bereich Lebenswissenschaften, in dem noch immer die USA und westeuropäische Staaten den Welthandel

dominieren, stellen hierbei eine Ausnahme dar. Hier besteht und entsteht ein dynamisch wachsender Exportmarkt in dem Europa und die USA aufgrund ihrer starken Pharma- und Medizinindustrien (noch) komparative Vorteile besitzen.

Während Deutschland – und auch die Vereinigten Staaten – nach wie vor über zentrale Kompetenzen im Bereich der Entwicklung verfügen, sind sie in der Regel v.a. im digitalen Bereich nicht mehr in der Lage, zukünftige Produkte und Lösungen selbst zu fertigen oder auch nur vor Ort zu pilotieren. Analog zu den Ergebnissen der Patentanalyse nehmen Deutschlands Anteile am Welthandel, mit Ausnahme der Lebenswissenschaften, durch die Stärkung asiatischer Wettbewerber in allen Bereichen kontinuierlich leicht ab. Trotz dieser Tendenz hält Deutschland allerdings nach wie vor Anteile von 5-10% am Handel in für die meisten Schlüsseltechnologien relevanten Bereichen, was weiterhin deutlich über seinem Anteil an der Weltwirtschaftsleistung liegt. Grundsätzlich war die internationale Aufgabenteilung zwischen Europa/USA und Asien viele Jahre lang sowohl erfolgreich als auch kommerziell opportun – und ist dies im Grundsatz bis heute. Gleichzeitig unterstützte sie, schon in den 1990er aber v.a. den 2000er Jahren, Lerneffekte, Technologietransfers und Aufholbewegungen. Diese führten dazu, dass Teile der vormaligen asiatischen Produktionsbasen, allen voran China, an der softwaregetriebenen digitalen Revolution der späten 2010er Jahre auf Augenhöhe teilnehmen und Europa in Teilen technologisch überholen konnten. Die weitere Verlagerung des für Schlüsseltechnologien relevanten Güterexportes nach Ostasien zeigt, dass Japan, Südkorea, China und einige andere ostasiatische Nationen mittlerweile auch bei komplexeren Gütern den Welthandel dominieren.

Die vormaligen europäischen Führungsnationen hingegen bleiben strukturell davon abhängig, dass sie von asiatischen Partnerstaaten zuverlässig und regelmäßig mit Gütern beliefert werden bzw., diese Staaten gemäß ihrer Bedürfnisse Güter zu vertretbaren Preisen fertigen. Ob diese hieran langfristig ein vergleichbares Interesse haben wie in noch den 2000er Jahren ist dabei zunehmend unklar. China z.B. hat im Verlauf der letzten fünf Jahre seine technologischen Handelsbilanzdefizite stark reduzieren können und ist u.a. in den Bereichen Hardware und Robotik viel weniger von ausländischer Technik und ausländischen Investitionen abhängig als in der Vergangenheit. Darüber hinaus verfügt es mittlerweile selbst über einen starken Binnenmarkt, sodass auch die ökonomische Abhängigkeit von umfangreichen Exporten weitgehend entfällt. Für den Moment ist allerdings anzumerken, dass technologisch komplexe Importe Deutschlands in sensiblen Kernbereichen in vielen Bereichen zzt. noch eher aus Japan oder Korea, denn aus China stammen.

Für den Moment besteht, von spezifischen Gütergruppen abgesehen, in den meisten Technologiebereichen insgesamt keine Abhängigkeit Deutschlands von einzelnen asiatischen Lieferanten. Insgesamt sind Deutschlands Importe meist sogar weniger konzentriert als im globalen Mittelwert, was nicht zuletzt in einer gut etablierten innereuropäischen Arbeitsteilung begründet liegt, im Rahmen derer sich auch in Zukunft relevante Optionen und Alternativen der Produktionsverlagerung ergeben werden.

6 Wissenschaftlich-technologische Kooperationen Deutschlands im Bereich ausgewählter Schlüsseltechnologien

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlich-technischen Kooperationen Deutschlands im Bereich der Schlüsseltechnologien betrachtet, motiviert v.a. durch die Fragestellung, ob Deutschland mit allen Anbietern von Technologien in geeignetem Umfang vernetzt ist, bzw. für welche Technologiebereiche sich in welchem geographischen Umfeld sich besondere Schwerpunkte der Zusammenarbeit identifizieren lassen.

Zu berücksichtigen ist hierbei vorab, dass sich wissenschaftliche Kooperationen und technologische Kooperationen ihrem Wesen nach maßgeblich unterscheiden. Bei wissenschaftlichen Kooperationen handelt es sich im Grundsatz um individuelle Zusammenarbeiten zum wechselseitigen Nutzung durch die, kraft allgemein zugänglicher Veröffentlichung, keine nachlaufenden Eigentumsrechte entstehen. Oftmals handelt es sich bei ihnen um individuelle, interessens- und wissensgeleitete Vorhaben. Bei technologischen Kooperationen hingegen handelt es sich um Zusammenarbeiten, die in ihrem Kern auf die Etablierung eines kommerziell relevanten geistigen Eigentumsrechtes abzielen. Solche Kooperationen erfolgen in aller Regel kaum rein durch Neugier geleitet, sondern strategisch und dabei nicht selten in organisatorischen Zusammenhängen. Die Verteilung von Ko-Patenten spiegelt dabei in der Regel vor allem die geographische Verteilung von Konzernstrukturen, innerhalb derer verschiedene Einheiten an gemeinsamen Vorhaben arbeiten.

Im Ergebnis zeigt sich im Publikationsbereich eine ausgeprägte Dominanz der USA, mit Ausnahme des Bereichs Advanced Manufacturing (vgl. Tabelle 4 und Tabelle 5). Relativ gesprochen spiegelt dieser recht hohe Anteil von deutlich über einem Viertel allerdings v.a. die hohe Bedeutung der USA am Publikationsgeschehen weltweit. Eine im Vergleich zur Publikationsleistung deutlich überdurchschnittliche Rolle nehmen demgegenüber Kooperationen mit Großbritannien ein, hier liegt das Verhältnis der relativen Anteile meist zwischen 2,5 und 3,5. Auf Großbritannien folgen u.a. Italien, Österreich, China und Dänemark, auch China erreicht in immer mehr Bereichen Anteile von um die 10%. Dessen ungeachtet zeigt die Betrachtung der Relationen die überdurchschnittliche Integration der europäischen Wissenschaftssysteme, inkl. jener mit Österreich, Dänemark sowie, etwas überraschend, Finnland – allerdings nicht mit Frankreich. Auch mit Brasilien, Russland und Israel besteht – im Verhältnis zum insgesamt doch eher geringen Publikationsaufkommen dieser Länder – ein recht intensiver Austausch. Relativ betrachtet weniger ausgeprägt ist Deutschlands Austausch dagegen mit China und Indien, wo der Anteil an Deutschlands Kooperationen regelmäßig nur etwa einem Drittel des akademischen Gewichtes dieser Nationen erreicht. Im Fall von Korea werden Anteile von etwa der Hälfte mit Japan, Anteile in etwa der zu erwartenden Höhe erreicht. Im Vergleich der Themenbereiche sind überdurchschnittliche Kooperationsneigungen im Bereich Materialtechnologien am deutlichsten ausgeprägt, gefolgt von den Bereichen Digitalisierungstechnologien und Produktionstechnologien. Im Bereich der Bio- und Lebenswissenschaften liegen sie nur unwesentlich über dem Durchschnitt.

Im Bereich der Ko-Patentierung ist die Dominanz der USA als Partner noch deutlich stärker ausgeprägt (vgl. Tabelle 6 und Tabelle 7). Hier werden regelmäßig Werte über ein Drittel, teils über 40% erreicht. Großbritannien spielt demgegenüber mit ca. 5% (8% in den Bio- und Lebenswissenschaften) eine eher nachgeordnete Rolle, wichtigere Partner sind Österreich und die Schweiz mit Anteilen von je ca. 15%. Dies deckt sich mit vorherigen Untersuchungen, die die Rolle von Sprachgrenzen und wirtschaftlichen Integrationsräumen in Ko-Patentanalysen aufzeigen. Im Kern dürfte sich diese, weit überdurchschnittliche Rolle unserer deutschsprachigen Nachbarländer aus der Vielzahl von Unternehmen ergeben, die in verschiedenen Ländern Entwicklungsteams unterhalten, die an gemeinsamen Projekten arbeiten. Anders als im akademischen Bereich, wo sich eine gewisse Entkopplung abbildete besteht im technologischen Bereich zudem eine enge Bindung an Frankreich, das fast feldunabhängig ca. 10% aller Kooperationen auf sich vereinen kann, es folgen Großbritannien und Italien.

Mit Blick auf die Relationen zeigt sich auch aus dieser Perspektive die starke Bedeutung innereuropäischer Zusammenarbeit. Neben der herausragenden Ausrichtung auf Österreich und die Schweiz ergeben sich auch für alle anderen großen Mitgliedsstaaten regelhaft überdurchschnittliche Kooperationsneigungen. Dies gilt für die nordischen Länder aber auch Spanien und Italien. Auch mit Indien findet sich ein überdurchschnittlicher Anteil an Kooperationen, was sich aus der dort vielfach noch gegebenen Abhängigkeit von ausländischen Direktinvestitionen erklären lässt. Der Anteil der Kooperationen mit den USA spiegelt dagegen erneut v.a. deren dominierenden Beitrag zum Patentaufkommen insgesamt.

Schwach und deutlich unterdurchschnittlich ausgeprägt sind dagegen v.a. die Kooperationen mit asiatischen Nationen wie China, Japan, Korea, was sich mit einer traditionell geringen internationalen Integration der dortigen Unternehmenssektoren (Japan, Korea), sowie der zunehmenden Überwindung einer Frühphase der eigenen Abhängigkeit, gekoppelt mit technologischem Unabhängigkeitsstreben (China) erklären lässt. Auch mit Russland und Brasilien bestehen im Bereich der Schlüsseltechnologien (anders als insgesamt) deutlich unterdurchschnittliche Kooperationen. Thematisch bestehen überdurchschnittliche Kooperationsneigungen vor allem im digitalen Bereich, getrieben durch die klassische Mikroelektronik sowie der Bereiche Künstliche Intelligenz, Big Data und Internet of Things.

Anders als im Bereich der wissenschaftlichen Zusammenarbeit finden sich hinsichtlich der Ko-Patentierung oft interessante Einzelfälle sehr ausgeprägter Kooperationen in bestimmten Bereichen. So stehen im Bereich Digital Security Zusammenarbeiten mit Frankreich und Indien hervor, während sich in den Feldern Künstliche Intelligenz und Big Data der Schwerpunkt auf die USA noch verstärkt. Im Bereich Internet of Things liegt ein Schwerpunkt auf Zusammenarbeiten mit Österreich, Italien und Israel, im Bereich Nanotechnologie fällt die besondere Bedeutung der Schweiz und Spaniens, nicht aber der USA, aus dem Rahmen. Im Bereich Produktionstechnologie verstärkt sich die Rolle von Österreich und der Schweiz, die der USA verringert sich relativ, im Bereich Bio- und Lebenswissenschaften sticht erneut die Schweiz heraus, folgend flankiert von Frankreich und Großbritannien.

Tabelle 4: Ko-Publikationsanteile 2017-2019 (mit Deutschland)

Partner	Patentanmeldungen (insgesamt)	Digitalisierung	Künstliche Intelligenz	Digitale Sicherheitstechnologien	Big Data	Internet of Things	Digitale Mobilitätstechnologien	Mikro- und Nanoelektronik	Material-technologien	Nanotechnologie	Advanced Materials	Produktionstechnologien	Advanced Manufacturing	Photonik	Robotik	Bio- und Lebenswissenschaften	Life Science	Bioökonomie	Biotechnologie
AT	7%	12%	10%	16%	11%	5%	9%	12%	10%	10%	10%	10%	7%	13%	10%	12%	12%	11%	8%
BR	3%	7%	6%	9%	7%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	5%	2%	9%	4%	7%	7%	7%	6%
CA	6%	3%	3%	4%	4%	4%	3%	2%	2%	1%	2%	2%	2%	1%	2%	3%	3%	4%	2%
CH	11%	7%	7%	8%	6%	4%	8%	3%	3%	3%	3%	5%	4%	4%	6%	6%	7%	5%	4%
CN	9%	11%	10%	14%	11%	7%	7%	8%	6%	7%	6%	9%	7%	7%	10%	11%	11%	9%	9%
DK	4%	11%	12%	8%	14%	11%	16%	17%	16%	18%	16%	11%	7%	12%	11%	9%	8%	10%	12%
ES	9%	5%	4%	7%	4%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	4%	0%	6%	4%	5%	5%	4%	4%
FI	3%	9%	8%	12%	7%	12%	8%	8%	7%	7%	7%	10%	6%	8%	11%	9%	9%	8%	8%
FR	12%	3%	2%	5%	3%	3%	0%	2%	2%	2%	2%	2%	1%	3%	2%	3%	3%	3%	2%
GB	18%	21%	19%	27%	21%	16%	13%	11%	11%	10%	11%	18%	17%	22%	17%	19%	20%	17%	14%
IL	2%	2%	2%	3%	2%	1%	1%	2%	2%	3%	2%	2%	1%	3%	1%	2%	2%	2%	2%
IN	3%	3%	3%	3%	3%	2%	1%	4%	4%	5%	4%	2%	4%	3%	2%	2%	2%	2%	3%
IT	11%	12%	10%	16%	10%	12%	8%	9%	7%	9%	7%	13%	9%	12%	14%	10%	10%	8%	7%
JP	5%	4%	4%	4%	3%	4%	1%	5%	5%	4%	5%	5%	3%	4%	5%	4%	4%	4%	4%
KR	2%	3%	3%	2%	3%	4%	2%	2%	2%	3%	2%	3%	1%	3%	3%	2%	2%	2%	2%
RU	5%	4%	4%	4%	3%	0%	1%	7%	9%	6%	9%	3%	2%	8%	2%	4%	4%	4%	4%
SE	6%	7%	6%	9%	6%	4%	4%	5%	4%	4%	4%	5%	3%	2%	6%	7%	7%	6%	4%
US	28%	28%	28%	31%	29%	21%	21%	19%	18%	16%	18%	25%	13%	26%	27%	30%	31%	24%	24%

Quelle: Analysen des Fraunhofer ISI auf Grundlage von Elsevier SCOPUS

Tabelle 5: Verhältnis Ko-Publikationsanteil mit Deutschland / Gesamtanteil an globalen Publikationen; nach Relevanz

Partner	Patentanmeldungen (insgesamt)	Digitalisierung	Sicherheits- und Digitaltechnologien						Material- technologien	Produktionstechnologien			Bio- und Lebens- wissenschaften	Life Science					
			Künstliche Intelligenz	Digitale Sicherheits-technologien	Big Data	Internet of Things	Digitale Mobilitätstechnologien	Mikro- und Nano- elektronik		Nanotechnologie	Advanced Materials	Produktions- technologien		Advanced Manufacturing	Photonik	Robotik	Life Science	Bioökonomie	Biotechnologie
CN	0,4	0,4	0,3	0,7	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3
US	1,3	1,5	1,6	1,3	2,1	1,2	2,0	1,1	1,4	1,4	1,4	1,3	1,0	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
GB	2,6	3,2	3,3	3,3	3,6	2,7	3,4	1,9	2,7	3,0	2,7	2,9	3,5	3,8	2,5	3,1	3,1	3,1	2,9
IN	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,8	0,5	0,4	0,5	0,4	0,7	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4
JP	1,1	1,4	1,5	2,2	1,3	1,1	0,3	1,7	1,1	1,1	1,1	1,0	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
IT	2,8	3,4	3,7	3,6	2,6	3,9	2,4	3,3	3,0	3,6	3,0	2,2	2,4	3,5	2,0	2,4	2,3	2,2	2,0
CA	1,6	1,0	1,0	0,9	1,0	1,1	1,5	0,5	1,0	0,7	1,0	0,5	0,7	0,3	0,5	0,9	0,9	1,0	0,7
FR	3,3	1,0	1,0	1,2	1,0	1,0	0,0	0,8	0,6	0,8	0,6	0,6	0,5	0,7	0,5	0,7	0,7	0,8	0,6
ES	2,5	1,5	1,3	2,3	1,0	0,6	1,2	0,5	0,7	1,5	0,7	1,4	0,0	1,8	1,3	1,4	1,4	1,1	1,3
KR	0,7	0,7	0,7	0,9	0,4	1,1	0,4	0,3	0,5	0,8	0,5	0,6	0,2	1,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
RU	1,7	2,2	2,4	1,9	2,9	0,2	0,5	5,0	2,2	3,4	2,2	1,6	1,0	2,1	1,2	1,7	1,7	1,7	2,8
BR	1,1	3,1	3,6	2,8	2,8	1,9	3,8	3,0	2,2	4,5	2,2	3,3	1,0	6,5	3,0	1,7	1,6	1,3	2,0
CH	6,6	4,6	5,7	4,2	10,1	3,3	7,5	2,9	3,0	3,3	3,0	3,3	5,1	2,6	3,3	3,7	3,6	3,8	2,7
SE	3,9	5,4	6,3	5,3	5,1	4,1	3,4	5,5	4,2	4,0	4,2	3,7	2,8	1,8	4,3	4,1	4,1	4,1	3,4
DK	4,2	14,1	21,5	7,1	26,9	16,3	28,4	29,1	35,1	33,4	35,5	12,4	10,2	12,0	12,5	7,5	6,8	9,5	11,0
AT	8,0	18,1	18,8	19,0	16,9	8,9	13,9	22,6	16,2	18,4	16,1	12,8	12,0	12,7	12,4	12,9	12,8	12,8	9,2
IL	2,9	3,7	4,0	4,7	16,0	2,0	1,5	3,5	3,3	4,1	3,2	2,9	3,4	2,7	2,6	3,2	3,1	3,2	2,6
FI	3,9	14,8	16,1	14,8	6,6	20,9	17,4	14,1	12,7	15,7	12,7	18,6	14,2	13,2	20,6	12,0	11,9	10,9	13,6

Hinweis: Länder geordnet nach Anteil am Gesamtanteil aller globalen Publikationen 2019; nach Relevanz

Quelle: Analysen des Fraunhofer ISI auf Grundlage von Elsevier SCOPUS

Tabelle 6: Ko-Patentanteile 2016-2018 (mit Deutschland)

Partner	Patentanmeldungen (insgesamt)	Digitalisierung	Sicherheitstechnologien						Material- technologien	Produktions- technologien			Bio- und Lebens- wissenschaften	Life Science	Bioökonomie	Biotechnologie			
			Künstliche Intelligenz	Digitale Sicherheitstechnologien	Big Data	Internet of Things	Digitale Mobilitätstechnologien	Mikro- und Nano- elektronik		Advanced Manufacturing	Photonik	Robotik							
AT	9%	10%	8%	5%	6%	19%	10%	13%	8%	6%	8%	14%	13%	17%	15%	8%	8%	6%	7%
BR	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
CA	1%	2%	2%	2%	3%	0%	1%	2%	1%	6%	1%	1%	0%	2%	0%	2%	2%	1%	2%
CH	14%	10%	3%	6%	4%	5%	10%	15%	13%	22%	12%	17%	20%	12%	17%	14%	16%	14%	16%
CN	6%	3%	3%	4%	8%	0%	2%	3%	7%	0%	7%	4%	4%	2%	14%	3%	2%	3%	2%
DK	2%	1%	3%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	6%	1%	0%	0%	0%	1%	5%	5%	5%	6%
ES	3%	2%	2%	2%	3%	5%	1%	2%	2%	22%	2%	1%	1%	3%	1%	2%	2%	2%	2%
FI	1%	1%	0%	3%	1%	5%	1%	1%	1%	0%	1%	1%	1%	1%	0%	3%	2%	3%	3%
FR	10%	8%	11%	11%	4%	5%	8%	6%	9%	6%	9%	9%	10%	9%	3%	9%	9%	9%	9%
GB	6%	5%	8%	7%	6%	0%	2%	6%	4%	6%	4%	5%	5%	3%	2%	8%	7%	8%	7%
IL	1%	2%	1%	2%	6%	10%	1%	1%	0%	11%	0%	1%	1%	0%	3%	1%	1%	1%	2%
IN	3%	6%	3%	14%	3%	5%	3%	4%	3%	6%	2%	2%	2%	1%	0%	2%	1%	2%	1%
IT	4%	5%	7%	6%	5%	14%	3%	3%	4%	6%	4%	5%	5%	6%	5%	2%	1%	2%	1%
JP	4%	4%	1%	9%	4%	0%	3%	4%	3%	0%	3%	2%	2%	2%	3%	2%	2%	2%	1%
KR	1%	3%	2%	0%	0%	0%	0%	6%	3%	6%	3%	1%	1%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
RU	1%	0%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SE	4%	3%	4%	4%	1%	0%	6%	0%	2%	6%	2%	4%	5%	1%	8%	3%	3%	3%	3%
US	28%	34%	44%	42%	44%	38%	28%	29%	31%	6%	31%	22%	22%	23%	17%	35%	36%	34%	39%

Hinweis: Transnationale Patentanmeldungen, Identifizierung von Ko-Patenten nach dem Erfinderprinzip (gemeinsame Erfindungen)

Quelle: Analysen des Fraunhofer ISI auf Grundlage von EPA PATSTAT

Tabelle 7: Verhältnis Ko-Patentanteil 2016-2018 mit Deutschland / Gesamtanteil an globalen Anmeldungen 2018; nach Relevanz

Partner	Patentanmeldungen (insgesamt)	Digitalisierung	Künstliche Intelligenz	Digitale Sicherheitstechnologien	Big Data	Internet of Things	Digitale Mobilitätstechnologien	Mikro- und Nano- elektronik	Material- technologien	Nanotechnologie	Advanced Materials	Produktions- technologien	Advanced Manufacturing	Photonik	Robotik	Bio- und Lebens- wissenschaften	Life Science	Bioökonomie	Biotechnologie
US	1,2	1,5	1,4	1,4	1,3	1,7	1,2	1,8	1,7	0,2	1,8	1,2	1,1	1,4	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9
CN	0,3	0,2	0,1	0,2	0,5	0,0	0,2	0,2	0,7	0,0	0,7	0,2	0,3	0,1	0,5	0,2	0,1	0,2	0,1
JP	0,2	0,2	0,1	0,8	0,3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
KR	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,5	0,3	1,3	0,3	0,2	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
FR	2,4	2,3	4,4	1,8	1,2	0,7	1,9	2,2	2,0	1,1	2,0	2,6	2,5	2,9	2,0	2,2	2,5	2,5	2,4
GB	2,1	1,9	2,4	1,2	1,6	0,0	0,9	3,9	2,4	2,0	2,4	2,1	2,0	1,8	0,8	1,8	1,7	2,1	1,6
IT	1,8	6,0	9,2	6,0	11,8	13,3	3,5	5,8	2,7	6,2	2,6	2,6	1,9	5,3	2,2	1,4	1,0	1,5	0,8
CH	7,3	9,4	2,8	3,8	3,1	1,8	9,5	18,9	8,5	37,2	8,2	10,4	9,4	12,1	21,3	5,9	7,0	5,9	7,1
SE	2,5	2,8	4,8	2,1	1,2	0,0	2,7	1,2	1,8	2,7	1,9	2,9	3,0	1,5	4,5	2,5	3,1	2,2	2,9
IN	2,4	3,7	1,0	4,9	0,9	7,1	2,2	7,2	2,9	4,7	2,8	1,9	1,8	2,0	0,0	1,1	0,9	1,2	0,9
CA	1,0	1,3	0,8	0,8	0,7	0,0	0,7	4,6	1,0	1,9	0,9	0,6	0,2	1,9	0,0	0,8	0,9	0,5	0,9
AT	8,5	12,6	31,1	7,8	29,4	14,2	9,9	13,8	6,1	37,2	6,0	11,3	9,1	15,0	23,6	9,4	10,2	7,7	10,1
ES	2,5	4,1	4,9	2,7	4,4	11,8	2,5	6,7	2,5	7,1	2,5	1,4	0,7	2,9	1,0	1,7	1,8	1,4	1,8
IL	1,0	1,4	0,4	0,9	4,5	8,9	0,6	2,6	0,8	4,1	0,9	0,9	0,7	0,3	2,6	1,0	1,1	0,9	1,2
FI	2,0	1,7	0,0	2,4	1,0	5,1	0,8	2,4	1,5	0,0	1,5	1,3	1,0	1,9	0,0	3,6	4,8	3,6	6,8
DK	2,2	4,2	10,8	0,0	0,0	0,0	2,1	5,9	4,5	7,4	4,4	0,8	0,6	2,0	1,5	3,2	3,5	2,9	3,6
RU	1,6	0,4	0,7	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	1,4	1,2	1,6	1,1	0,0	0,2	0,3	0,3	0,4
BR	1,6	1,0	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	0,6	0,0	0,6	2,7	2,8	8,8	0,0	0,9	0,6	0,7	0,0

Hinweis: Transnationale Patentanmeldungen; Länder geordnet nach Anteil am Gesamtanteil aller globalen Patentanmeldungen 2018

Quelle: Analysen des Fraunhofer ISI auf Grundlage von EPA PATSTAT

Kapitel 5 - Fazit für die vorliegende Studie

Die wissenschaftlich-technologischen Kooperationsmuster Deutschlands mit verschiedenen Ländern weltweit spiegeln noch immer die technoökonomischen Strukturen der 1980er und 1990er Jahre wider. Während sowohl wissenschaftlich als auch mit Blick auf Konzernstrukturen (gespiegelt in Ko-Patenten) eine enge Integration mit europäischen Partnerländern und Nordamerika besteht, konnten vergleichbare Verbindungen zu den mittlerweile führenden Nationen Asiens nicht aufgebaut werden.

Positiv betrachtet unterstreichen diese Zahlen den Erfolg und auch die Nachhaltigkeit der europäischen und transatlantischen Integration Deutschlands. Gleichzeitig zeigen sie jedoch auf, dass zu großen Teilen der zentralen Wissensquellen der Gegenwart noch immer kein hinreichender Kontakt aufgebaut werden konnte, wenngleich z.B. der Aufstieg Japans bereits über 20 und auch jener Koreas mittlerweile gut 15 Jahre zurückliegt. Gerade mit China ist zzt., auch aus geopolitischen Gründen, eine weitere Desintegration zu beobachten, lediglich mit Indien zeichnet sich ein etwas anderes Bild.

7 Konzepte zur FuI politischen Begleitung und Entwicklung von Schlüsseltechnologien

7.1 Faktoren, die die Entwicklung und Adaption von Technologien behindern und so politische Interventionen begründen

Eine relevante Klassifikation zu Hemmnisfaktoren für Innovationen würde von der OECD und Eurostat im Oslo-Handbuch vorgenommen (OECD und Eurostat, 2005). Dieses gilt als der wichtigste internationale Leitfaden, der Richtlinien für eine gemeinsame Grundlage für die Sammlung und Auswertung von Daten über technologische Innovationen festlegt (OECD und Eurostat, 2018; Schiefer, 2018) und seinerseits die methodische Grundlage für die Innovationsstatistik der Europäischen Union bildet. Diese wiederum basiert empirisch auf der Erhebung "Community Innovation Survey (CIS)", die Informationen über das Innovationsverhalten von Unternehmen in verschiedenen Branchen erhebt und verschiedene Aspekte der Innovationsentwicklung wie Informationsquellen, staatliche Finanzierungen, Innovationsausgaben usw. dokumentiert. In diesem Rahmen werden Unternehmen direkt danach gefragt, welches aus ihrer Perspektive die wichtigsten Hemmnisfaktoren sind. Hierzu zählen entsprechend OECD-Klassifikation vier Hauptbereiche:

- **Kostenfaktoren** (z.B. Risiko, Finanzierung),
- **Wissensfaktoren** (z.B. FuE, Personal, technische und Marktinformationen, externe Dienstleistungen, Kooperationen, Organisation, personelle Kapazitäten),
- **Marktfaktoren** (z.B. Nachfrage, Marktstruktur), und
- **institutionelle Faktoren** (z.B. Infrastruktur, Eigentumsrechte, Gesetzgebung, Regulierung, Standards, Steuerregelungen).

Wie eine Literaturrecherche nach neuen relevanten Publikationen in den letzten zehn Jahren bzw. seit 2009 zeigt, konnten allerdings kaum bzw. wenig einschlägige Veröffentlichungen identifiziert werden, welche Hemmnisfaktoren von Unternehmen bei der Etablierung von Schlüsseltechnologien untersuchen und hierbei zugleich systematisch die Klassifizierung der OECD zugrunde legen. Eine Ausnahme bildet die Analyse von Thielmann et al. (2009) im Rahmen derer relevante Blockaden bzw. Hemmnisse bei der Etablierung neuer Schlüsseltechnologien anhand der Beispiele Nano-/Mikroelektronik, Windenergietechnologien sowie des MP3-Players und Mini-Beamers entlang genau dieser vier Dimensionen in den Blick genommen wurden.

Seitdem hat sich über die Jahre hinweg allerdings nicht nur die Abgrenzung dessen, was unter Schlüsseltechnologien (engl. Key Enabling Technologies - KETs) gefasst wird, verändert (siehe erstes Kapitel), sondern es haben sich mit dem Wandel hin zu einer nachfrageseitig getriebenen Innovationspolitik im Sinne einer Missionsorientierung, dem Fokus auf Systemtransformationen etc. auch die Perspektiven auf Schlüsseltechnologien nachhaltig geändert. Entsprechend ist zu vermuten, dass sich auch Innovationshemmnisse von Unternehmen bei Produkt- und Prozessinnovationen geändert haben.

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Relevanz digitaler Technologien (s.o.) ist in diesem Zusammenhang nicht zuletzt eine Befragung der deutschen (Mikro-)Elektronikindustrie mit Unterstützung des ZVEI relevant, die Hemmnisfaktoren insbesondere für diesen Bereich in den Blick nimmt (Ergebnisbericht intern 2020 und Veröffentlichung geplant 2021, Schmaltz et al., 2021). Durchgeführt 2019 bezieht sich die Studie zwar auf die Zeit vor der Corona-Pandemie, kann jedoch 10 Jahre nach den Analysen von Thielmann et al. (2009) bzw. Thielmann (2009) als relevantes Update betrachtet werden. Zudem wurden die Bewertungen in 2009 anhand weniger Interviews durchgeführt, während in 2019 eine breit angelegte Online-Befragung zugrunde liegt. Darüber hinaus liegt mit der deutschen Innovationserhebung (Rammer et al., 2020) eine aktuelle quantitative Analyse (Befragung) von Hemmnisfaktoren auch branchenübergreifend vor. Grundsätzlich liegt dessen ungeachtet der Schwerpunkt entsprechender Analysen noch immer überwiegend auf dem Bereich der Mikro- und Nanoelektronik. Eine breiter angelegte Literatur mit differenzierten Analysen weiterer Schlüsseltechnologien konnte bislang nicht identifiziert werden.

Aufgrund der begrenzt verfügbaren und meist nicht statistisch bzw. quantitativ vorliegenden Information zu Innovationshemmnissen bei der Etablierung von Schlüsseltechnologien in Unternehmen werden im Folgenden daher

- Erkenntnisse aus der Innovationserhebung (mit Fokus auf Deutschland) herangezogen (Rammer et. al 2020, 2021; vgl. Abbildung 22) und mit
- Erkenntnissen aus der Literatur und Befragungen zu Hemmnisfaktoren für Unternehmen bei Schlüsseltechnologien wie der Mikro- und Nanoelektronik (Thielmann et al., 2009; Thielmann, 2009; Wydra et al., 2010; Schmaltz et al., 2021) abgeglichen.

Die Analyse kann hiermit zwar teilweise quantitativ erfolgen, muss mit Fokus auf bestimmte Schlüsseltechnologien allerdings auch qualitativ an Beispielen vertieft werden.

Bereits 2010 wurde in diesem Zusammenhang auch die grundsätzliche Frage der Wettbewerbsfähigkeit anhand des EU-Beihilferechts sowie des Zugriffs entlang der Wertschöpfungskette geführt diskutiert, oftmals vor allem mit Blick auf die Auslagerung der Halbleiterproduktion nach Asien. Diese Debatte gewinnt, wie oben dargestellt, aktuell erneut bzw. erweitert unter der Überschrift "Technologiesouveränität" an Bedeutung. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit auch grundsätzliche (geo)politische Rahmenbedingungen sowie im weiteren Sinne industriepolitische (d.h. subventionsrechtliche) Entscheidungen relevante Hemmnisfaktoren für Innovation darstellen können.

Diese Fragestellungen sind insbesondere dann relevant, wenn das Konzept technologischer Souveränität (Beherrschung der Entwicklung von Technologien) zu einem umfassenderen Konzept der Innovationssouveränität (Beherrschung von Markteinführung und Kommerzialisierung) erweitert wird. Als politisch konsensfähig erscheint hierzu die Einschätzung, dass ein Mindestmaß an Technologie-Know-how und Produktions-Know-how (wenn auch im Pilotmaßstab) vorliegen und beherrschbar sein sollte, um zukünftig auch in Folgetechnologien und -anwendungen Prozess- und Produktinnovationen hervorbringen zu können.

Blockaden bei der Etablierung der Mikro- und Nanoelektronik im Wandel (2009 und 2019)

Wie der Bericht "Blockaden bei der Etablierung neuer Schlüsseltechnologien" aus 2009 zeigt, (Thielmann et al., 2009) stellten **Kostenfaktoren** damals durchgängig zentrale und dominierende Hemmnisse dar. Hohe wirtschaftliche Risiken und hohe Innovationskosten, vor allem die mangelnden öffentlichen und privaten Finanzierungsquellen, galten als zentrale Blockaden. Im Fall der Nanoelektronik lagen die Kosten zunächst in dem noch hohen FuE-Aufwand und zudem in immer teurer werdenden Fertigungsstätten begründet. **Institutionelle Faktoren**, wie rechtliche Rahmenbedingungen, Regulierung, Steuerregelungen, aber auch das Etablieren von Normen und Standards und besonders bürokratische Hürden waren für Technologieinnovationen im Bereich der Nanoelektronik besonders relevant. Unter den **Wissensfaktoren** stellten das Problem des Fachkräftemangels und die Schwierigkeit, Kooperationspartner zu finden, durchweg Blockaden dar. Bei den **Marktfaktoren** wurden insgesamt weniger Hemmnisse gesehen. Einzig das Problem, dass der potenzielle Markt durch etablierte Unternehmen besetzt ist, war eine technologieübergreifende Blockade.

Die Hemmnisse in der Mikro- und Nanoelektronik waren damals noch stark geprägt durch die Debatte einer "fehlenden oder unzureichenden Europäischen Industriepolitik" (Thielmann, 2009) mit dem Beklagen einer fehlenden Vision und Sichtbarkeit sowie einer fehlenden (europäischen) Abreitsteilung. Das EU-Beihilferecht sollte insbesondere aus Sicht der Akteure der Mikro- und Nanoelektronik angepasst werden (Wydra et al., 2010). Die Debatte ging in den Folgejahren u.a. in die Initiative der Europäischen Kommission zur Modernisierung des EU-Beihilferechts (SAM-Paket - IP/12/458) über, welches seit 2014 in Kraft ist. Die EU-Kommission hat in einer auf Art. 107 Abs. 3 Buchst. b. des Vertrages über die Arbeitsweise der Europäischen Union (AEUV) gestützten Mitteilung Kriterien festgelegt (2014/C 188/02), welche die Mitgliedstaaten beachten müssen, wenn sie im Einklang mit dem EU-Beihilferecht transnationale Vorhaben fördern wollen, die von strategischer Bedeutung für die EU und die Verwirklichung der Ziele der Strategie Europa 2020 sind, sogenannte "Important Projects of Common European Interest (IPCEI)". Die Förder volumina der ersten genehmigten IPCEIs (Dezember 2018 das erste IPCEI im Bereich Mikroelektronik sowie im Dezember 2019 das erste IPCEI im Bereich Batterien) liegen bei mehreren Milliarden Euro aggregierter staatlicher Beihilfe durch die EU-Mitgliedsstaaten sowie mindestens ebenso hohe private Investments der Unternehmen mit dem Ziel, die beklagten Innovationshemmnisse im Bereich der Kostendimension zu adressieren^{8, 9}.

Die Mikro- und Nanoelektronik stellt mit ihren Halbleiterchips, aber auch elektronischen Komponenten (Sensorik, Aktorik etc.) eine Querschnittstechnologie für alle Branchen dar und gemeinsam

⁸ https://ec.europa.eu/germany/news/20181218-genehmigung-foerderung-mikroelektronik-sachsen_de

⁹ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_19_6705

mit Softwareentwicklungen die Enabler-Technologien für die laufende und kommende Digitalisierung der Industrie und unseres Alltags. Die Technologien jedoch sind insbesondere im B2B-Bereich anzusiedeln, d.h. sie werden von Technologie-/Komponentenherstellern i.d.R. für Systemintegratoren angeboten oder entwickelt und in Produktion, Prozessen, Systemlösungen eingesetzt. In Deutschland können Mitgliedsunternehmen des Zentralverbands Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) als relevante Anbieter von Mikro- und Nanoelektronik-Technologien identifiziert werden. Eine Online-Befragung unter den Unternehmen des ZVEI aus 2019 (Schmaltz et al., 2021), bei welcher die Blockadedimensionen des Oslo-Handbuchs zugrunde gelegt wurden, gibt daher einen aktuelleren Einblick in die sektor- bzw. branchenspezifischen Bedürfnisse und Hürden der Elektro- und Elektronikindustrie (die Umfrage wurde von 103 Teilnehmenden beantwortet).

Erkenntnisse aus der Befragung zeigen, dass über 40% der Unternehmen 2,5-7% in ihrer Ausgaben und über 30% der Unternehmen sogar mehr als 7% ihrer Ausgaben in Forschung und Entwicklung investieren. Etwa 46% (fast die Hälfte) der Unternehmen vergeben dabei externe Forschungsprojekte, welche teilweise große bis sehr große Forschungsprojekte darstellen. Dies gilt für große Unternehmen, aber teilweise auch für mittelgroße Unternehmen. **Forschungskooperationen** nehmen somit einen hohen bzw. wachsenden Stellenwert ein.

Die Anwendungsfelder, in welchen die Unternehmen Produkte/Dienstleistungen/Kompetenzen anbieten, sind breit gestreut. "Industrie und Industrie 4.0", "Energie" und "Transport und Mobilität" sind die Anwendungsfelder mit den aktuell größten Aktivitäten der Firmen. Auch zukünftig stellen diese die wichtigsten Anwendungsfelder dar. Hinzu kommt der Bereich Sicherheit (z.B. Cybersicherheit). Es zeigt sich somit eine zunehmende Bedeutung von durch **Systemtransformationen** geprägten Märkten sowie die Bedeutung von **Digitalisierungstechnologien** über Sektoren hinweg.

So werden laut der Elektronikindustrie Energietechnologien, inkl. Batterietechnologien, Leistungselektronik und intelligente Netze im Rahmen der zunehmenden Elektrifizierung an Bedeutung gewinnen. Die stark zunehmende Menge an Daten, die im Zusammenhang mit dem Internet der Dinge (Internet of Things - IoT), der Industrie 4.0, dem autonomen Fahren aber auch in vielen Konsumenten Anwendungen anfallen, müssen schnell, richtig und sinnvoll zu wertvollen Informationen verarbeitet werden. In diesem Kontext werden die Technologien der intelligenten Datenauswertung, inkl. Künstlicher Intelligenz (KI) und maschinellem Lernen, deutlich an Bedeutung gewinnen. Darüber hinaus werden neue Produktionstechnologien (von Rapid Prototyping, wie z.B. 3D-Druck, bis zu Advanced Packaging-Technologien) und Kommunikationstechnologien (inkl. 5G) zunehmend wichtig. In Übereinstimmung mit dem Bedarf an externen Kompetenzen erwarten die Firmen einen zunehmenden Stellenwert der Software in ihren Unternehmen.

Mit Blick auf die Hemmnisse bei den Unternehmen sehen sich bei **Kostenfaktoren** fast 50% der Unternehmen bei Prozessinnovationen als stark oder ziemlich vom Hemmnis zu hoher **Innovationskosten** betroffen, bei Produktinnovationen sind dies etwa 30% (dies gilt insbesondere mit Blick auf FuE). Prozessinnovationen scheinen somit eine zunehmende Rolle und Bedeutung einzunehmen. Unternehmen wünschen sich daher eine Stärkung öffentlicher Finanzinstrumente (inkl. steuerliche Anreize) sowie eine stärkere Förderung von KMU.

Bei **Wissensfaktoren** beklagt mehr als die Hälfte der Unternehmen einen starken bzw. relevanten Mangel an **qualifiziertem Personal**, wiederum besonders im Bereich FuE. Die ausgeprägte Bedeutung des Fachkräftemangels lässt sich zwar nicht direkt quantitativ mit den Analysen aus 2009 vergleichen (Thielmann et al., 2009), jedoch zeigt sich vor dem Hintergrund des zunehmenden Umschulungs- und Weiterbildungsbedarfs durch den Einzug von Digitalisierungstechnologien in die Branchen und die Verschmelzung der Branchen selbst durchaus eine zunehmende Bedeutung bzw. Wettbewerbsrelevanz von Fachkräften für Unternehmen. Unternehmen wünschen sich einen verstärkten Aufbau von Fachpersonal im Unternehmen, eine bessere Vernetzung von Unternehmen untereinander und mit FuE-Akteuren (Kooperationen).

Die unsichere oder fehlende Nachfrage nach innovativen Technologien, Dienstleistungen oder Produkten sowie eine starke **Abhängigkeit von Zulieferern und Partnern** sind bei Prozessinnovationen mit Blick auf die **Marktfaktoren** die stärksten Hemmnisse. Mit Blick auf Produktinnovationen spielt hingegen die Dominanz anderer Unternehmen eine größere Rolle. Unternehmen sehen hier eine stärkere Fokussierung auf Nischen- bzw. Spezialmärkte für KMU sowie eine stärkere Präsenz im Ausland als zielführende Maßnahmen.

Bei den **institutionellen Hemmnisfaktoren** sehen die Unternehmen insbesondere Hürden im Bereich von Bürokratie, Gesetzgebung, rechtlichen Rahmenbedingungen, Regulierung und Steuerregelungen. Die Förderung der Wertschöpfungskette als Ganzes, inkl. zeitlicher und inhaltlicher Abstimmung der FuE-Förderung bis zur Marktentwicklung, der Ausbau bzw. die Erneuerung externer Infrastruktur (z.B. Internet: Glasfaser + 5G) sowie die frühzeitige Schaffung von regulativen Rahmenbedingungen (technische Standards und Normen, rechtliche Rahmenbedingungen) werden als wichtige Maßnahmen identifiziert.

Blockaden und Innovationsverhalten von Unternehmen im Wandel

Es lässt sich generell feststellen, dass so gut wie alle Schlüsseltechnologien besonders forschungs- und kapitalintensiv sind, d.h. alle Barrieren rund um die Finanzierung und Hochskalierung sind besonders relevant. Dies gilt damals wie heute. Jedoch lässt sich anhand der Innovationserhebung am Verhalten deutscher Unternehmen auch feststellen, dass (bis auf 2020 Corona-bedingt) die Innovationsausgaben der Unternehmen weiter ansteigen. Im Branchendurchschnitt lagen bzw. liegen diese bei 3,3% des Umsatzes, in der Elektronikindustrie z.B. über 10% (vgl. Rammer et al., 2020; 2021).

Abbildung 22: Innovationshemmnisse in Unternehmen



Quelle: Rammer et al. (2020)

Mit Blick auf branchenübergreifende Innovationshemmnisse deutscher Unternehmen stellen **Kostenfaktoren** wie hohe Kosten (34%) oder hohes Risiko (31%), aber auch Mangel an internen (25%) und externen (19%) Finanzierungsquellen eine Reihe von Hemmnisfaktoren dar, welche aber über die Jahre hinweg eher für Unternehmen gleichbleibend relevant geblieben sind (Rammer et al., 2020).

Mit Blick auf **Wissensfaktoren** wurden 34% aller Unternehmen in Deutschland laut Innovationserhebung 2019 (Rammer et al., 2020) im Zeitraum 2016-2018 durch einen Mangel an geeignetem Fachpersonal bei der Durchführung von Innovationsaktivitäten behindert. Das ist der höchste Wert, der je für diesen Hemmnisfaktor erfasst wurde. Dieser lag 2012-2014 noch bei 22% und 2004-2006 bei nur 10%. Der **Fachkräftemangel** ist derzeit somit ein wichtigeres Innovationshemmnis, als es die Kostenfaktoren sind. Mehr als jedes zweite Unternehmen mit Fachkräftemangel musste deshalb auf bestimmte Innovationsaktivitäten verzichten. Der Wert lag 2004-2006 noch bei 38%. Die Elektroindustrie weist den höchsten Anteil von Unternehmen auf, die aufgrund des Fachkräftemangels ihre Innovationsaktivitäten einschränken mussten (53%). Der Fachkräftemangel durchzieht aber alle Branchen (Rammer et al., 2020). Diese Ergebnisse unterstützen und bestätigen deutlich das für die Mikro- und Nanoelektronik identifizierte Hemmnis des Fachkräftemangels, welches aber demnach ein branchenübergreifendes Hemmnis darstellt.

Bei den **Marktfaktoren und institutionellen Faktoren** spielen Verwaltungsverfahren (Bürokratie), Standards/Normen, interne Widerstände und technische sowie Marktinformationen für 15-19% der deutschen Unternehmen Hemmnisse dar (Rammer et al., 2020).

Ein Hinweis auf die komplexer und herausfordernder werdenden Innovationsprozesse liefern die Kooperationsaktivitäten der Unternehmen. 2016-2018 waren 19,6% aller innovationsaktiven Unternehmen an FuE- oder anderen **Innovationskooperationen** beteiligt. Der Anteil der kooperierenden Unternehmen stieg damit ggü. 2012-2014 (damals 17,4%) weiter an. Großunternehmen

weisen mit 48% einen deutlich höheren Anteilswert auf als KMU (18,1%). Die höchsten Anteilswerte von innovationsaktiven Unternehmen mit Innovationskooperationen finden sich in den forschungsintensiven Industriebranchen (z.B. 34% in der Elektronikindustrie).

Ein Hinweis auf die Veränderungen der Branchen und zunehmenden Systemtransformationen geben zudem die sich ändernden Geschäftsmodelle. Im Zeitraum 2017-2019 haben 46% der Unternehmen in Deutschland merkliche Änderungen an ihrem **Geschäftsmodell** vorgenommen. Die mit Abstand häufigste Geschäftsmodellinnovation betraf die Einbeziehung neuer Lieferanten oder Kooperationspartner mit fast 37% aller Unternehmen. Fast 10% der Unternehmen haben ihre Beziehungen zu bestehenden Lieferanten oder Kooperationspartnern grundlegend verändert, was von neuen Kooperationsmodellen bis zur Reorganisation von Lieferketten reichen kann. Die Adressierung neuer geographischer Märkte oder Kundensegmente war die am zweithäufigsten anzutreffende Geschäftsmodellinnovation. Ebenso spielten neue Formen der Kundenkommunikation (z.B. über soziale Medien) oder personalisierte Formen des Kundenbeziehungsmanagements eine große Rolle (Rammer et al., 2021).

Auch Digitalisierung gewinnt in den Unternehmen an Bedeutung. Im Jahr 2020 nutzten 85% der Unternehmen in Deutschland **digitale** Elemente im Rahmen ihres Geschäftsmodells. Dabei hatten für 28% der Unternehmen die digitalen Elemente eine hohe Bedeutung. Am häufigsten wurden digitale Plattformen zum Vertrieb von Produkten oder Dienstleistungen genutzt. Weit verbreitet sind außerdem die digitale Integration von Lieferanten oder Geschäfts-/Kooperationspartnern sowie die Nutzung sozialer Netzwerke für Kundengewinnung und Kundenkontakte. Die Bedeutung von maschinellem Lernen und Künstlicher Intelligenz, von Crowdsourcing mithilfe digitaler Medien/Werkzeuge etc., ist für die Geschäftsmodelle der Unternehmen dagegen bislang noch gering (Rammer et al., 2021).

Im Jahr 2019 waren etwa 29% der Unternehmen in Deutschland Produktinnovatoren. Die **Prozessinnovatorenquote** hingegen lag bei knapp 50% (Rammer et al., 2021). Dieser branchenweite Durchschnitt scheint sich gut mit den Unternehmen der Elektronikindustrie zu decken, welche Kostenfaktoren mit 30% bei Produktinnovationen und 50% bei Prozessinnovationen sehen (Schmaltz et al., 2021).

Blockaden für die Entwicklung künftiger Schlüsseltechnologien

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- Die **Hemmnisdimensionen** (Kosten, Wissen, Markt und Institutionen) und darunter gefasste Faktoren bilden auch weiterhin das Spektrum der Innovationshemmnisse von Unternehmen gut ab. Das Oslo-Handbuch und die Klassifikationen darin sind also weiterhin für Analysen geeignet, jedoch hat sich die Bedeutung der einzelnen Faktoren geändert.

- Zurückzuführen ist diese Änderung auf den alle Sektoren und Bereiche durchdringenden Trend zur **Digitalisierung** ebenso wie den Wandel hin zur politischen Orientierung an **Systemtransformationen**, welche sich aus neuen gesellschaftlichen Bedarfen sowie der sich verschärfenden Klimakrise ergibt und damit die Notwendigkeit immenser Investitionen in Infrastrukturanpassungen (z.B. Energiesystem, Transportsystem, Kommunikationssystem, Ernährungssystem, Gesundheitssystem etc.) nach sich zieht.
- Unternehmen sind zunehmend von der Digitalisierung betroffen und nehmen Digitalisierungsthemen unterschiedlich auf. Viele kleinere Unternehmen (KMU) haben es aufgrund **begrenzter Ressourcen** (personell und finanziell) schwerer, digitale Technologien um- und einzusetzen. Dabei liegt gerade in Deutschland und Europa eine ausgeprägte KMU-Landschaft vor. Generell gilt für **KMU** auch weiterhin bzw. immer mehr der oft fehlende oder schlechte Zugang zu Technologien und **Infrastrukturen** als hohes Innovationshemmnis. KMU haben zudem teils besondere Probleme, Wertschöpfungsketten aufzubauen, da nötiges Wissen über Technologien, Akteure, Märkte etc. fehlt.
- **Prozessinnovationen** scheinen gegenüber Produktinnovationen eine zunehmend wichtigere Rolle einzunehmen. Gerade hier können Künstliche Intelligenz und autonome Technologien helfen, Prozesse effizienter und wettbewerbsfähiger zu machen (Ressourcenoptimierung in den Bereichen Material, Energie, Wasser; Ausschuss in der Produktion; Ausfall von Maschinen durch Überwachung und Automatisierung oder Autonomisierung). Gerade in diesem Bereich werden jedoch hohe Innovationskosten beklagt.
- Vor dem Hintergrund sich abzeichnender bzw. zunehmend dringlicher Systemtransformationen sind zunehmend auch Systemlösungen und damit ein Innovieren entlang der Wertschöpfungskette gefragt. Kaum (oder kein) ein Unternehmen schafft es alleine, die Komplexität vom Material zur Komponente, dem System in seiner Anwendung bis zum Recycling und einer Kreislaufführung zu durchdringen und zu beherrschen. Neue **Kooperationsmodelle und auch Geschäftsmodelle** werden für die Industrie somit wichtiger, um künftige Märkte durch gemeinsames Innovieren zu erschließen.
- Der Mangel an Fachkräften wurde zwar immer schon thematisiert, steht aber heute noch deutlicher im Vordergrund. Ganze Branchen stehen im Wandel (z.B. Automobilindustrie, Energieversorger, etc.) und vor der Herausforderung massiver Umschulungs- und Weiterbildungserfordernisse. Neue Beschäftigungsfelder entstehen, im Rahmen derer sowohl "Digitalisierungskennnisse" als auch systemisches Wissen entlang der Wertschöpfungskette immer wichtiger werden. Auch der Umgang mit zunehmender Komplexität und ggf. Abstraktion (z.B. mit nicht individuell nachvollziehbaren KI-basierten Entscheidungen) erfordert neue Kompetenzen. Dabei ist eine Verschmelzung der Sektoren zu beobachten, welche damit auch bei den Fachkräften zu gegenseitigen "Kannibalisierungseffekten" führt. Fachkräfte im IT-Bereich werden überall gesucht und gehen meist lieber in die neuen/interessanten Bereiche und nicht unbedingt in die "klassische Industrie".

- Mit Systemtransformationen sind meist enorme "Infrastruktur-Investitionen" verbunden. Die anfallenden Kosten stellen ein zunehmendes Hemmnis für die Unternehmen dar (vor allem für kleinere Unternehmen, aber auch Großunternehmen). Bekannte Beispiele sind Transportinfrastrukturen (Ladeinfrastrukturen, Elektromobilität, ...), Energieinfrastrukturen (Windkraft, PV, Gas-/Wasserstoffnetze, ...), Kommunikationsinfrastrukturen (5G, 6G, Glasfasernetze, ...), Forschungsinfrastrukturen (z.B. in den Bereichen Quantentechnologien, Künstliche Intelligenz, ...). Die Rolle der Digitalisierung kann sich hierbei konkret auf Prozessinnovationen auswirken, aber ebenso im Umgang mit den komplexen großen Infrastrukturmaßnahmen (Logistik, Management etc.) unterstützen.

Mit Blick auf den Aspekt Technologiesouveränität ist festzuhalten, dass sich die meisten führenden Nationen sowie die Europäische Union gerade im Bereich der Schlüsseltechnologien um eine klare Positionierung bemühen (müssen), wodurch mit protektionistischen Maßnahmen und Versuchen der bestmöglichen Nutzung internationaler Wertschöpfungsketten zum eigenen Vorteil in allen Bereichen zu rechnen ist (Edler et al., 2021). Ungeachtet des konzeptionellen Desiderats einer offenen und regelbasierten Welthandelsordnung bzw. einer stets kooperativen Zusammenarbeit in Wissenschaft und Technologie muss daher die Möglichkeit anders orientierter Strategien staatlich antizipiert werden, nicht zuletzt, da sie sich in den letzten Jahren teils deutlich manifestiert hat (Edler et al., 2021).

In diesem Zusammenhang kann daher auch die nur fragmentarische Abdeckung bestimmter Teile der Wertschöpfungskette als zunehmendes Hemmnis oder Risiko gesehen werden, nicht zuletzt, da sie das immer relevantere Innovieren entlang der Wertschöpfungskette (s.o.) erschwert, wenn nicht verunmöglicht. Dies ist gerade im Bereich der Schlüsseltechnologien problematisch, da diese wichtige gesamtwirtschaftliche "Enabler" für andere Technologien, Produkte, Prozesse, Anwendungen bzw. ganze Branchen darstellen.

7.2 Internationaler Vergleich von FuI-Politik, Industriepolitik und Protektionismus: Europäische Union / USA / China

Dieser Berichtsteil stellt die Ergebnisse einer international vergleichenden Analyse zu politischen Konzepten zur FuI-politischen Begleitung und Entwicklung von Schlüsseltechnologien bzw. zum Erhalt technologischer Souveränität bei Schlüsseltechnologien dar. Schwerpunkte der Analyse waren die Europäische Union, die USA und China.

Die identifizierten politischen Maßnahmen und übergeordneten Strategien werden in einem breiten industriepolitischen Kontext diskutiert, um einerseits Bezüge zu aktuellen Trends in der Forschungs-, Innovations- und Industriepolitik herstellen, andererseits aber auch konkrete Analysen politischer Ansätze für Technologiesouveränität im Sinne konziser Fallstudien durchführen zu können, aus denen sich Schlussfolgerungen ableiten lassen.

Europäische Union (EU)

Der anhaltende Rückgang des Beschäftigungsanteils im Verarbeitenden Gewerbe, sowohl in den USA als auch in Europa (mit der Ausnahme Deutschlands), und der disruptive technologische Wandel, nicht zuletzt durch Digitalisierung und Automatisierung, haben die Nachfrage nach einer stärkeren proaktiven Industriepolitik zuletzt deutlich erhöht. Gleichzeitig ist gerade in der Industriepolitik ein neuer Trend zur verstärkten Unabhängigkeit unter dem Schlagwort "Technologiesouveränität" zu beobachten. Hintergrund ist unter anderem der zunehmende Wettbewerbsdruck durch China und der Umgang mit ausländischen Direktinvestitionen, die oftmals mit der Befürchtung eines Ausverkaufs der heimischen Industrie einhergeht (Aiginger und Rodrik, 2020). Darüber hinaus hat das Vertrauen in eine nur auf Marktkräfte setzende Wirtschaftspolitik spätestens seit der weltweiten Finanz- und Wirtschaftskrise ab 2008 erhebliche Risse bekommen. Die Krise ließ sich in den meisten Ländern im Wesentlichen nur durch eine interventionistische Wirtschaftspolitik in angemessener Weise bekämpfen, wodurch staatliche Interventionen in Märkte und nicht zuletzt auch Protektionismus hoffähiger wurden (Belitz et al., 2021).

Der Schwerpunkt der europäischen Industriepolitik liegt in der Förderung der sogenannten Key Enabling Technologies (KETs). Dieser Förderbereich wurde 2009 von der Europäischen Kommission festgelegt und in den Folgejahren weiter präzisiert. Eine konkrete Umsetzung der Förderung von Schlüsseltechnologien wurde **im Forschungsrahmenprogramm "Horizont 2020"** (2014-2020) implementiert. Dort nimmt die Förderung der KETs in der Fördersäule "Leadership in enabling and industrial technologies pillar" eine zentrale Rolle ein. Insgesamt waren 5,9 Mrd. € für KETs dort eingeplant (Wydra und Leimberg, 2015). Das neue EU-Rahmenprogramm für Forschung und Innovation **"Horizont Europa"** (2021-2027) fördert moderne Technologien gar mit bis zu 15 Mrd. € (Izsak et al., 2020).

Darüber hinaus wurde der Fokus zur Förderung von KETs über eine reine Forschungs- und Entwicklungsförderung hinaus ausgeweitet durch die parallele Förderung im Rahmen der europäischen Strukturfonds. Die KET's werden explizit in den **"Investment Priorities" des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)** genannt und gelten zudem als zentrales Element für **"Smart-Specialisation"-Strategien** der europäischen Regionen. 65% aller Regionen in der EU und 15 Mitgliedstaaten nennen mindestens eine der KETs als "Smart-Specialisation"-Priorität (Europäische Union, 2018). Ein Entwicklungsvorhaben kann folglich von mehreren Finanzierungsquellen gleichzeitig gefördert werden (Wydra und Leimberg, 2015).

Am 10. März 2020, einen Tag bevor die Weltgesundheitsorganisation den Ausbruch von COVID-19 zur weltweiten Pandemie erklärte, wurde **die neue europäische Industriestrategie** vorgestellt. Ziel der Strategie ist es, die Transformation zu einer grünen und digitalen Wirtschaft zu unterstützen. Die Strategie soll helfen, die europäische Industrie umweltfreundlicher, zirkulärer und digitaler zu

machen und gleichzeitig die internationale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.¹⁰ Neben der bereits beschriebenen Finanzierung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Rahmen des Forschungsrahmenprogramms "Horizont 2020" werden dort zwei weitere Instrumente genannt, mit denen die EU bestimmte Industrie- und Technologiebereiche in Zukunft noch stärker fördern möchte:

- **Institutionalisierte Partnerschaften:** Hierbei handelt es sich um Initiativen, bei denen sich die Europäische Kommission, europäische Mitgliedstaaten und private Partner verpflichten, die Entwicklung und Implementierung eines gemeinsamen Forschungs- und Innovationsprogramms zu unterstützen. Bisher wurden 38 solcher Partnerschaften vorgeschlagen, u.a. zum Thema High Performance Computing (9), digitale Schlüsseltechnologien (19), Smarte Netzwerke und Dienstleistungen (11), Künstliche Intelligenz, Daten und Robotik (12), Photonik (13) sowie diskrete Fertigungstechnologien (15).¹¹
- **Important Projects of Common European Interest (IPCEI):** IPCEIs sind Förderprojekte von erheblichem strategischen Interesse, die zu den übergeordneten Förderzielen der EU beitragen und die Wettbewerbsfähigkeit, Nachhaltigkeit oder Wertschöpfung in der gesamten EU stärken sollen. Die Projekte beziehen mindestens zwei Mitgliedsstaaten mit ein, weisen positive Spillover-Effekte auf den europäischen Binnenmarkt und die Gesellschaft auf und kommen nicht nur den beteiligten Mitgliedstaaten und Unternehmen zugute. Bisher wurden zwei IPCEI-Initiativen gestartet – zur Förderung der Mikroelektronik in Höhe von 1,75 Mrd. € (2018) sowie zur Entwicklung und Produktion von Batteriezellen in der EU in Höhe von 2,9 Mrd. € (2019). Ein weiteres Projekt zu Wasserstoff befindet sich derzeit (Stand Mai 2021) in der Vorbereitung (Izsak et al., 2020).

Bereits 2019 wurde in einem **Deutsch-Französischen Manifest für eine Industriepolitik für das 21. Jahrhundert** die Forderung nach einem stärkeren Engagement zum Aufbau bzw. zur Sicherung von Technologiesouveränität in für die EU zentralen Bereichen wie bspw. Künstlicher Intelligenz laut. Dabei wird ebenfalls auf das Instrument der IPCEIs hingewiesen, um die Förderung von Spitzentechnologien in Europa von der Forschung und Entwicklung bis zum ersten industriellen Einsatz zu beschleunigen.¹² In dem Manifest fordern Frankreich und Deutschland zudem eine **Überarbeitung der europäischen Wettbewerbsregeln**, um die globale Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen zu fördern. Nicht zuletzt die wachsende chinesische Präsenz in Europa und vor allem die Übernahme europäischer Technologiefirmen durch staatlich unterstützte

¹⁰ Europäische Kommission (2020): Eine neue Industriestrategie für ein weltweit wettbewerbsfähiges, grünes und digitales Europa: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/communication-eu-industrial-strategy-march-2020_de.pdf

¹¹ Europäische Kommission (2019): Orientations towards the First Strategic Plan for Horizon Europe: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/research_and_innovation/strategy_on_research_and_innovation/documents/ec_rtd_orientations-he-strategic-plan_122019.pdf

¹² Deutsch-Französisches Manifest für die Industriepolitik (2019): https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/F/franco-german-manifesto-for-a-european-industrial-policy.pdf?__blob=publicationFile&v=2

chinesische Firmen haben vermehrt zu Forderungen nach einer Überprüfung der Wettbewerbsregeln und zur Anwendung von nationalen Sicherheitsklauseln geführt, um Firmenkäufe durch chinesische Unternehmen zu verhindern. Auch bei Fusionen europäischer Firmen, die von der europäischen Wettbewerbsbehörde kritisch geprüft werden, wird häufig die Wettbewerbsfähigkeit mit chinesischen Großkonzernen auf globaler Ebene als Argument für die Genehmigung solcher Fusionen angeführt (Aiginger und Rodrik, 2020).

Zudem hat die Corona-Krise Schwachstellen und Interdependenzen globaler Wertschöpfungsketten deutlich gemacht. Diese Erfahrungen veranlasste die Europäische Kommission, den Übergang zu einem grünen, digitalen und widerstandsfähigeren Wirtschafts- und Industriemodell zu beschleunigen und strategische Abhängigkeiten, sowohl technologischer als auch industrieller Art, zu analysieren und zu adressieren. Vor diesem Hintergrund kündigte Kommissionspräsidentin Ursula von der Leyen im Mai 2021 eine **Aktualisierung der** erst 2020 präsentierten **Industriestrategie** an. Dabei will die Kommission in Zukunft internationale Lieferketten noch weiter diversifizieren und internationale Partnerschaften sowie industrielle Allianzen stärker fördern. Zudem kündigte die Kommission eine **europäische Standardisierungsstrategie** an, um europäische Interessen bei der Standardisierung, sowohl innerhalb der EU als auch weltweit, zu wahren und gleichzeitig eine offene Zusammenarbeit mit internationalen Partnern zu sichern.¹³ Hinsichtlich der zunehmenden Forderungen zur Überarbeitung des Wettbewerbsrechts¹⁴ ergänzte die Europäische Kommission die Aktualisierung der Industriestrategie auch um eine **Verordnung über drittstaatliche, Verzerrungen am europäischen Binnenmarkt verursachende staatliche Subventionen**.¹⁵ Darin präsentiert die Kommission ein neues Instrument zur Bekämpfung potenziell wettbewerbsverzerrender Effekte von ausländischen Subventionen auf den europäischen Binnenmarkt vor und folgt damit den Vorschlägen aus dem Weißbuch über ausländische Subventionen im Binnenmarkt aus dem Jahr 2020. Konkret soll die Kommission die Befugnis erhalten, **finanzielle Zuwendungen von Regierungen eines Nicht-EU-Landes zu untersuchen**, die Unternehmen zugutekommen, welche in der EU wirtschaftlich tätig sind, und gegebenenfalls deren wettbewerbsverzerrende Wirkungen zu beseitigen. Das Instrument zielt folglich darauf ab, eine Regulierungslücke zu schließen, die darin besteht, dass Subventionen, die von Regierungen außerhalb der Europäischen Union gewährt werden, derzeit weitgehend unkontrolliert bleiben, während die von den Mitgliedstaaten gewährten Subventionen einer strengen Kontrolle unterliegen.

13 Europäische Kommission (2021): Aktualisierung der neuen europäischen Industriestrategie: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/communication-industrial-strategy-update-2020_en.pdf

14 zu M&A Regulation (EU) 2019/452, a framework for the screening of foreign direct investments into the EU; zu Anti-Dumping Regulation (EU) 2016/1036 on protection against dumped imports from non-EU countries

15 Europäische Kommission (2021): Verordnung über drittstaatliche, Verzerrungen im Binnenmarkt verursachende Subventionen: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_1982

Politische Rahmenbedingungen bzgl. spezifischer Schlüsseltechnologien

Folgende politische Initiativen sind zentral zur Förderung spezifischer Schlüsseltechnologien:

(1) Technologien für die Digitalisierung

- Fokus auf digitale Technologien im Rahmen der **Aufbau- und Resilienzfähigkeit** (v.a. Vernetzung, 5G-Netzwerke und Cloud-Anwendungen),
- Aufbau strategischer digitaler Kapazitäten der EU und Förderung der digitalen Transformation durch das **Digital Europe Programme**, u.a. die Einrichtung eines flächendeckenden **Netzwerks von digital Innovation Hubs** als Teil des neuen Multiannual Financial Framework (MFF 2021-2027) in Höhe von 8,2 Mrd. €,
- **Institutionalisierte Partnerschaft für Künstliche Intelligenz, Daten und Robotik** (geplant),
- **IPCEI-Initiative für Mikroelektronik** (seit 2018) im Wert von 1,75 Mrd. €,
- Das Förderinstrument **Connecting Europe Facility 2 - Digital (CEF2Digital)** fördert den Ausbau hochleistungsfähiger digitaler Infrastruktur in Europa mit einem Gesamtvolumen von insgesamt 2 Mrd. € für die Jahre 2021-2027.

(2) Materialwissenschaften/-technologien

- Fokus auf **Materialforschung** im neuen Rahmenprogramm "Horizon Europe",
- Das **European Union Observatory for Nanomaterials (EUON)** ist eine 2017 gestartete Initiative mit dem Ziel, die Transparenz und Verfügbarkeit von Informationen über Nanomaterialien zu erhöhen.

(3) Technologien für Bio- und Lebenswissenschaften

- **Fokus auf Biotechnologie und Bioökonomie** im neuen Forschungsrahmenprogramm "Horizon Europe" (2021-2027),
- **Das Knowledge Centre for Bioeconomy (KCB)** ist eine Initiative der Europäischen Kommission für ein besseres Wissensmanagement für die Politikgestaltung im Bereich der Bioökonomie,
- Aktualisierte **Bioökonomie-Strategie** und **Bioökonomie-Aktionsplan** mit neuen Prioritäten für den Beitrag der Bioökonomie zum Klimaschutz und zur nachhaltigen Entwicklung in Europa.

(4) Neuartige Produktionstechnologien

- **Fokus auf Advanced Manufacturing** im neuen Forschungsrahmenprogramm "Horizon Europe" (2021-2027),
- **Institutionalisierte Partnerschaft für Künstliche Intelligenz, Daten und Robotik** (geplant),
- **Institutionalisierte Partnerschaft für Photonik** (geplant),
- Initiierung eines **Advanced Manufacturing Support Centre** für KMU durch die Europäische Kommission 2018,
- Aufbau von **EIT Manufacturing**, einer Innovationsgemeinschaft innerhalb des **European Institute of Innovation & Technology (EIT)**, die die führenden Akteure der Fertigungsindustrie in Europa miteinander verbindet.

Vereinigte Staaten (USA)

Die Industriepolitik in den USA ist in vielerlei Hinsicht stärker marktgetrieben, als dies in der EU oder auch in China der Fall ist. Dennoch lässt sich in den USA in den vergangenen Jahren, nicht zuletzt seit der vergangenen Trump-Administration, eine stetige Zunahme protektionistischer Instrumente insbesondere in der Handelspolitik verzeichnen (Yalcin et al., 2017). Dies gilt sowohl für tarifäre als auch für nicht-tarifäre Handelshemmnisse. So verhängten die USA im Rahmen der "**America-First**"-Strategie zahlreiche **Zusatzzölle** vor allem gegen China, aber auch gegenüber anderen Handelspartnern, darunter selbst enge politische Verbündete wie der EU, und erhofften sich dadurch eine Stärkung der eigenen Wirtschaft und der heimischen Beschäftigung. Während die USA zunächst nur auf einen kleinen Teil chinesischer Waren Zusatzzölle erhob, reagierte China mit Gegenmaßnahmen. In der folgenden Eskalation weiteten beide Länder ihre Zölle auf einen immer größeren Anteil der gegenseitigen Importe aus bzw. erhöhten die Zusatzzölle auf bereits betroffene Güter. Der Schwerpunkt der US-Zölle lag insbesondere auf chinesischen Investitions- und Vorleistungsgütern (Deutsche Bundesbank, 2020). Ende 2019 waren etwa zwei Drittel des gesamten Warenaustauschs zwischen den USA und China mit Zusatzzöllen belegt. In der Konsequenz verringerten sich die Handelsströme seit Beginn des Handelsstreits. So sank der Wert der US-Warenimporte aus China im Herbst 2019 saisonbereinigt um mehr als ein Fünftel unter den Stand vor der Erhebung der ersten Zölle. Zwar unterzeichneten beide Länder Anfang 2020 ein erstes Abkommen zur Entschärfung des Handelsstreits, dennoch bleibt ein Großteil der verhängten Zusatzzölle vorerst in Kraft (ebd.).

Darüber hinaus verhängten die USA im Januar 2020 weitere **Export- und Technologietransferbeschränkungen** gegenüber China, indem das US Department of Commerce Bureau of Industry and Security (BIS) die Hinzufügung von 60 weiteren chinesischen Unternehmen auf die sogenannte Entity List, darunter SMIC, Chinas größter Halbleiterhersteller, über 25 Tochtergesellschaften der China State Shipbuilding Corporation (CSSC) und mehreren anderen Unternehmen aus unterschiedlichen Industriesektoren. Seitdem ist nun für jeden Export, Re-Export oder Transfer von Technologie, Waren oder Software, die der Ausfuhrkontrolle unterliegen, eine Genehmigung erforderlich, wenn eines der auf dieser Liste genannten Unternehmen an der Transaktion beteiligt ist.¹⁶

¹⁶ <https://www.federalregister.gov/documents/2020/12/22/2020-28031/addition-of-entities-to-the-entity-list-revision-of-entry-on-the-entity-list-and-removal-of-entities> (abgerufen am 21.06.2021).

Politische Rahmenbedingungen bzgl. spezifischer Schlüsseltechnologien

Folgende politische Initiativen sind zentral zur Förderung spezifischer Schlüsseltechnologien:

(1) Technologien für die Digitalisierung

Die Entwicklung digitaler Technologien ist in den USA primär marktgetrieben. Industriepolitische Strategien lassen sich diesbezüglich vor allem anhand der industriefreundlichen Regulierung dieses Sektors erkennen. Nichtsdestotrotz unterzeichnete der ehemalige US Präsident Donald Trump 2019 die nationale Initiative zur Aufrechterhaltung der amerikanischen Führungsrolle in der Künstlichen Intelligenz ("**National AI Initiative**").¹⁷ Die zentralen Schwerpunkte dieser Initiative lauten wie folgt:

- Verdopplung der nicht verteidigungsbezogenen Forschung und Entwicklung zu künstlicher Intelligenz über zwei Jahre (Plan: \$850 Mio. in 2021, koordiniert durch den NSF),
- Verbessertes Zugang zu qualitativ hochwertigen Daten, Modellen und Rechnerressourcen, um deren Wert für die Forschung und Entwicklung zu Künstlicher Intelligenz zu erhöhen und gleichzeitig Sicherheit, Datenschutz und Vertraulichkeit zu fördern,
- Abbau von Hindernissen für die sichere Entwicklung, Erprobung, Einführung von KI-Technologien sowie die Überarbeitung von Regulierungen und Leitlinien für KI, die die Entwicklung neuer technischer Standards für KI befördern sollen,
- Erschließung von Märkten für die amerikanische KI-Industrie und Förderung internationaler Kooperationen, bspw. im Rahmen von OECD-Konsensabkommen über die grundlegenden Prinzipien für die Steuerung vertrauenswürdiger KI; Unterstützung dieser Prinzipien durch das AI Policy Observatory,
- Einrichtung eines KI-Kompetenzzentrums durch die General Services Administration, um Bundesbehörden die Möglichkeit zu geben, Best Practices für die Einbindung von KI in Regierungsverfahren zu fördern,
- Verstärkte Aus- und Weiterbildung von Arbeitnehmern und Studierenden, u.a. durch Qualifizierungsprogramme und verstärkter Fokus auf KI in MINT-Studienfächern.

(2) Materialwissenschaften/-technologien

Die USA begannen in den 1990er Jahren, insbesondere Nanotechnologie strategisch und finanziell verstärkt zu fördern. So wurde die Nanotechnologie 1991 als eine von 22 Schlüsseltechnologien ausgewählt und im gleichen Jahr zu den "Strategischen Technologien" gezählt. Im Jahr 2000 wurde durch die Clinton Administration die **National Nanotechnology Initiative (NNI)** verabschiedet, die einen langfristigen Kooperationsplan beinhaltet, um gemeinsame Ziele, Strategien

¹⁷ The White House Office of Science and Technology Policy (2020): American Artificial Intelligence Initiative. Annual Report, <https://www.nitrd.gov/nitrdgroups/images/c/c1/American-AI-Initiative-One-Year-Annual-Report.pdf> (abgerufen am 21.06.2021).

und Forschungsbereiche sowie Förderbudgets und Programme behördenübergreifend zu koordinieren (Lia und Guan, 2016). Bis einschließlich 2020 wurden im Rahmen dieser Initiative über \$29 Mrd. in die Forschung und Entwicklung der Nanotechnologie investiert (Heimberger et al., 2020b). Formell ins Gesetz geschrieben wurde die Initiative 2003 im Rahmen der Verabschiedung des "21st Century Nanotechnology Research and Development Act" durch den US Kongress. Hierdurch erhielten die Programme und Aktivitäten der Initiative eine noch größere Anerkennung. Zudem wies das Gesetz den beteiligten Behörden Zuständigkeiten zu und gewährte Ausgaben für mehrere Jahre. Die Initiative stellte das weltweit erste nationale Nanotechnologieprogramm dar und wurde in den folgenden Jahren immer weiter fortgeschrieben und erneuert (Fisher und Mahajan, 2006; Sargent, 2016). Neben landesweiter Initiativen gibt es auch auf Ebene der Bundesstaaten Unterstützung für die Nanotechnologie. Insbesondere Oregon, New York, Ohio und Illinois sind wichtige Bundesstaaten, die signifikante Fördermittel mit Schwerpunkt auf die Entwicklung der Nanotechnologie bereitstellen. Zu nennen ist hier beispielsweise die Gründung des Oregon Nanoscience and Microtechnologies Institute (ONAMI), welches jedes Jahr durch den Bundesstaat Oregon mit \$40 Mio. gefördert wird (Gao et al., 2016).

(3) Technologien für Bio- und Lebenswissenschaften

Der Erfolg der US-amerikanischen Biotech-Branche ist unter anderem auf erste Durchbrüche in der Biotechnologie in den 1970er Jahren zurückzuführen. Mit der Gründung von Genentech wurde 1976 eines der ersten Unternehmen in dieser neuen Branche gegründet, das zudem mit dem menschlichen Insulin erstmals ein erfolgreiches Biotech-Produkt am Markt platzierte. Diese erfolgreiche Verwertung und Vermarktung von Forschungsergebnissen zeigte das Potenzial von Forschung und Entwicklung in diesem Bereich und die Notwendigkeit effizienter Technologietransferstrukturen auf, um öffentlich geförderte Forschung schneller in die Anwendung zu bringen (Owen, 2016; Block, 2011). Auch die staatlichen Investitionen in Forschung und Entwicklung im Bereich der Biotechnologie stieg ab Mitte der 1970er Jahre stark an. So förderten die **National Institutes of Health (NIH)** bis 1976 bereits 123 Projekte in diesem jungen Feld. Ein wesentlicher Fokus lag dabei insbesondere auf dem Potenzial von rDNA für die Krebsforschung. Der stärkere Fokus auf die Biotechnologie zeigte sich auch im steigenden Anteil von Forschungsmitteln durch das NIH für diesen Bereich an den gesamten nicht-verteidigungsbezogenen FuE-Ausgaben der USA, die sich von 12% im Jahr 1985 auf 30% im Jahr 2000 mehr als verdoppelten (Vallas et al., 2011). Die politische Förderung dieses neuen Technologiebereichs lässt sich auch als "verdeckte Industriepolitik" und als Antwort auf die wirtschaftlichen Herausforderungen der späten 1970er und 1980er Jahre deuten. Während der in dieser Zeit vorherrschenden neoliberalen Ideologie, die jede explizite industriepolitische Förderung bestimmter Technologien auf Bundesebene verhin-derte, entstand parallel ein breiter Flickenteppich aus einzelstaatlichen Initiativen und Einzelpolitiken, die eine Form von de facto-Industriepolitik darstellen (ebd.). Tatsächlich lässt sich das

Wachstum der US-amerikanischen Biotech-Industrie größtenteils durch konkrete Weichenstellungen in der bundespolitischen Gesetzgebung erklären. Die Bundespolitik machte den Staat zu einem zentralen Produzenten wissenschaftlicher Erkenntnisse, auf die sich die Industrie stützt. Zudem halfen zahlreiche Subventionen für die Produktentwicklung, die Schaffung eines industriefreundlichen regulatorischen Rahmens, welcher Eigentumsrechte festlegt und rechtliche Grenzen definiert. So erließ der US Kongress bis Mitte der 1980er Jahre zahlreiche Maßnahmen und Gesetze, die darauf abzielten, die Verwertung und Kommerzialisierung der biotechnologischen Forschung zu verbessern, u.a.:

- **Bayh-Dole Act (1980):** Ermöglichte es wissenschaftlichen Einrichtungen, die aus öffentlich finanzierter Forschung resultierenden Erfindungen zu patentieren und zu lizenzieren. Dies beförderte den Ausbau an Technologietransferstrukturen an wissenschaftlichen Einrichtungen und führte zur Ausgründung zahlreicher Biotech-Unternehmen,
- **Stevenson-Wydler Technology Innovation Act (1980):** Verpflichtete Bundesbehörden Technologietransferstellen an (staatlichen) wissenschaftlichen Einrichtungen einzurichten, die es privatwirtschaftlichen Unternehmen ermöglichen, Ressourcen und Technologien von Bundeslaboratorien zu nutzen, was die Innovationsfähigkeit der Unternehmen erhöhte,
- **Small Business Innovation Development Act (1982):** Zielte darauf ab, den Anteil der Bundesausgaben für Forschung und Entwicklung, der an KMU fließt, zu erhöhen; das mit diesem Gesetz geschaffene Small Business Innovation Research Programm (SBIR) hat maßgeblich zum Wachstum zahlreicher Biotech-Firmen beigetragen,
- **Orphan Drug Act (1983):** Förderte Forschung und Entwicklung zu sogenannten "verwaisten", d.h. seltenen Krankheiten und gewährte Laboren und Unternehmen großzügige Steuergutschriften, zusätzliche Forschungsmittel und eine schnelle Zulassung für Medikamente für kleine Patientengruppen (Vallas et al., 2011; Evens und Kaitin, 2015).

Ferner bestätigte der US-amerikanische Supreme Court 1980, dass genetisch veränderte Mikroorganismen bzw. lebende Organismen patentiert werden können, was die FuE zu diesem Bereich weiter beflügelte (Owen und Hopkins, 2016). Zunehmende Lobbyarbeit von Wissenschaft und Industrie veranlasste das NIH Recombinant DNA Advisory Committee (RAC) darüber hinaus, einschränkende Richtlinien zu lockern. So führte insbesondere die Beweislastumkehr dazu, dass Wissenschaftler:innen bspw. nicht mehr nachweisen müssen, dass Gentechnik sicher ist. Vielmehr muss die Öffentlichkeit zeigen, dass sie gefährlich ist. Diese und weitere Schritte beförderten die Kommerzialisierung der biotechnologischen Forschung, was ab den 1980er Jahren zur Entwicklung erster Cluster und Biotech-Hubs in den USA führte, bspw. in Boston (Route 128), San Francisco oder San Diego, an deren Erfolge immer mehr Regionen anknüpfen wollten (Vallas et al., 2011; Kleinman et al., 2008).

(4) Neuartige Produktionstechnologien

2011 wurde vom Office of Science and Technology Policy (OSTP) im Weißen Haus der Plan "**Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing**" verabschiedet, in dem erhebliche Bundesinvestitionen für die Entwicklung und Erprobung neuer Fertigungstechnologien angekündigt wurden, um die USA wieder zu einer Volkswirtschaft mit einem weltweit führenden produzierenden Gewerbe zu machen (Bonvillian, 2017). Der Plan sah die gemeinsame Nutzung von Einrichtungen und Infrastrukturen durch KMU vor, um neue Produktionsansätze zu entwickeln, Produktionssteigerungen zu generieren und neue Produkte herstellen zu können. Hierfür schlug der Plan eine Partnerschaft zwischen Industrie, Hochschulen und Regierung sowie eine behördenübergreifende "**Advanced Manufacturing Initiative**" (AMI) vor.¹⁸ Kurz darauf verkündete das Weiße Haus die "**Advanced Manufacturing Partnership**" (AMP), ein Konsortium aus hochrangigen Regierungsmitarbeiter:innen, Industrievertreter:innen und Universitätspräsident:innen, die sich auf die strategische Förderung von fortschrittlichen Fertigungstechnologien konzentrieren sollen (insbesondere auf fortschrittliche Sensorik, Messung und Prozesssteuerung, neue Materialdesigns und -verarbeitung, Visualisierung, IT und digitale Fertigungstechnologien, nachhaltige Fertigung, Nanomanufacturing, flexible Elektronikfertigung, Biomanufacturing und Bioinformatik, additive Fertigung, Fertigungs- und Prüfeinrichtungen, Industrierobotik und Fügetechnologien). Strategische Ziele der AMP waren:

- der Aufbau von **Manufacturing Innovation Institutes (MIIS)**, die, orientiert am Konzept der Fraunhofer-Institute in Deutschland, regionale KMU bei der Entwicklung und Erprobung neuer Fertigungstechnologien unterstützen,
- die kooperative Entwicklung von Fertigungstechnologien und Bereitstellung von technischen Infrastrukturen durch die MIIS, in denen Unternehmen experimentieren und ihre Belegschaft in Kooperation mit lokalen Hochschulen weiterbilden können,
- der regionalen Einbettung der MIIS, um Vorteile regionaler Industrieclustern zu nutzen,
- die Kooperation der MIICs durch ein Nationales Netzwerk (NNMI); das Netzwerk wurde 2016 umbenannt in "Manufacturing USA" (Bonvillian, 2017).

Infolgedessen wurden in den darauffolgenden Jahren 14 regionale MIIS in den USA aufgebaut, mit jeweils individuellem Fokus auf bestimmte Technologien, Materialien und Herstellungsprozesse. Jedes dieser MIIS erhält einen Bundeszuschuss in Höhe von \$70-120 Mio. für fünf Jahre. Die Investitionen werden durch Unternehmen, Hochschulen und lokale Regierungsbehörden ergänzt (ebd.).

¹⁸ Report to the President on Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing (2011): <https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-advanced-manufacturing-june2011.pdf> (abgerufen am 25.06.2021).

Ebenfalls 2011 wurde die **National Robotics Initiative (NRI)** durch die US National Science Foundation (NSF) gemeinsam mit anderen Bundesbehörden ins Leben gerufen. Das Ziel der Initiative ist es, die Entwicklung und den Einsatz von kollaborativen Robotern (Corobots) zu beschleunigen, die neben oder kooperativ mit Menschen arbeiten. In den folgenden fünf Jahren haben die NRI-Förderorganisationen etwa \$241 Mio. für 310 Forschungs- und Entwicklungsprojekte an 152 Einrichtungen investiert (Hicks und Simmons, 2019). Die Initiative fördert vier Forschungsbereiche:

- Skalierbarkeit: Wie können Roboter in höherem Maßstab mit Menschen oder anderen Robotern kooperieren als derzeit möglich? Wie können sie sich an reale Umgebungen anpassen?
- Anpassungsfähigkeit: Wie können sich Roboter an komplexe Aufgaben, an menschliche Interaktionen und Kommunikation anpassen?
- Zugangsbarrieren: Wie können Barrieren für die Erforschung der Robotik gesenkt werden?
- Gesellschaftliche Auswirkungen: Wie kann die Robotik in Aus- und Weiterbildung integriert werden? Was sind die sozialen, wirtschaftlichen, rechtlichen oder sicherheitspolitischen Implikationen der Robotik in der Zukunft? (Heimberger et al., 2020b).

In der zweiten Aktualisierung der **amerikanischen Innovationsstrategie 2015** hat die damalige Obama Administration das Ziel definiert, ein Netzwerk von insgesamt 45 Manufacturing Innovation Institutes bis 2025 zu schaffen, um das Innovationspotenzial der USA stärker zu heben (ebd.).

Im Oktober 2018 hat der National Science and Technology Council einen strategischen Plan zu Advanced Manufacturing entwickelt mit einer Vision für eine "amerikanische Führungsrolle in der fortschrittlichen Fertigung über alle Industriesektoren hinweg für nationale Sicherheit und wirtschaftlichen Wohlstand".¹⁹ Folgende Ziele schreibt der Plan fest:

- Entwicklung und Transformation von neuen Fertigungstechnologien: Unter diesem Ziel werden sowohl strategische Ziele als auch eine Vielzahl von technischen Prioritäten festgehalten (bspw. fortgeschrittene Industrierobotik, Hochleistungswerkstoffe, additive Fertigung, Halbleiter oder neue Werkstoffe,
- Bildung, Ausbildung und Anbindung der Arbeitskräfte in der Fertigung: Entwicklung von Humankapitelstrategien zur Aus- und Weiterbildung von Arbeitnehmer:innen,
- Ausbau der Fähigkeiten der heimischen Fertigungslieferkette: Dieses Ziel fokussiert auf die Stärkung heimischer Lieferketten, die zunehmend globalisiert ausgerichtet sind. Adressierte Themen sind hier u.a. Cybersicherheit, öffentlich-private Partnerschaften, neue Unternehmensgründungen, der "Buy American"-Ansatz oder verbesserter Zugang zu Kapital (ebd.).

¹⁹ National Science and Technology Council (2018): Strategy for American Leadership in Advanced Manufacturing: <https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2018/10/Advanced-Manufacturing-Strategic-Plan-2018.pdf> (abgerufen am 12.07.2021).

VR China

Die chinesische Industriepolitik folgt einem Paradigma, das sich grundsätzlich von industriepolitischen Ansätzen westlicher Industrienationen unterscheidet. Insgesamt ist der Einfluss des politischen Systems die entscheidende Variable im chinesischen Modell. Die proaktive Rolle des Staates, die das Selbstverständnis der politischen Führung des Landes prägt, ist daher auch für die Industriepolitik charakteristisch. Der Staat soll demnach die Entwicklung von zentralen Schlüsseltechnologien fördern und dabei selbst als quasi-Unternehmer über staatliches Eigentum an Unternehmen fungieren.

Dieses Politikverständnis ist konträr zur Diskussion um Effizienz und Legitimation von Industriepolitik in Europa oder in den USA, wo der Staat eine vergleichsweise zurückhaltende Rolle einnimmt und beispielsweise auf die Schaffung unternehmensfreundlicher Rahmenbedingungen fokussiert (Schüller, 2015). Auch industriepolitisch relevante Akteure wie Zentralbank, Geschäftsbanken, Staatsunternehmen, Gewerkschaften, Verbände und Regulierungsbehörden haben keine wirkliche Entscheidungsautonomie, sondern sind über Entwicklungspläne, Mitgliedschaften in der KPCh und über Regierungsorganisationen auf unterschiedlichen Ebenen miteinander verbunden und voneinander abhängig (ebd.).

Mit diesem Modell ist China in den vergangenen Jahren nicht nur zu einer Welthandelsnation und zu einem zentralen Produktions- und Innovationstandort aufgestiegen. Zudem hat die Zentralregierung mit ihrer Strategie "**Made in China 2025**" ehrgeizige industriepolitische Ziele gesetzt, die sie mit massiven Staatsinterventionen und Expansionsplänen durchsetzt. Während China zunehmend in westliche Märkte vordringt, schottet es eigene Märkte vor ausländischer Konkurrenz ab bzw. versucht, ausländische Konkurrenz zu verdrängen (Falck und Wölfl, 2020).

Ein Beispiel hierfür ist die jüngste Verabschiedung eines **Exportkontrollgesetzes 2020**, das das "nationale Interesse" Chinas als Leitmotiv erklärt. Im Gegensatz zu europäischen Ausfuhrkontrollen, die primär den multilateralen Nicht-Verbreitungsregimen verpflichtet sind, dient das chinesische Exportkontrollgesetz nur teilweise internationalen Sicherheitsverpflichtungen. Vielmehr enthält das Gesetz zahlreiche unklare und nicht näher definierte Rechtsbegriffe, wodurch eine beliebige behördliche Interpretation des Anwendungsrahmens der chinesischen Exportkontrolle möglich ist. Hierdurch erscheint das Exportkontrollgesetz weniger als rechtsstaatliches Regulativ, sondern eher als Instrument zur Durchsetzung geo- und wirtschaftspolitischer Interessen.²⁰

Politische Rahmenbedingungen bzgl. spezifischer Schlüsseltechnologien

Im Folgenden werden die zentralen politischen Ansätze und Instrumente zur Förderung von Schlüsseltechnologien in China skizziert:

²⁰ BDI (2020): <https://bdi.eu/artikel/news/chinesische-exportkontrolle/> (abgerufen am 07.07.2021).

(1) Technologien für die Digitalisierung

Die chinesische Industriepolitik legt seit den frühen 2000er Jahren einen verstärkten Schwerpunkt auf digitale Technologien. Ziel dieser Schwerpunktsetzung war es zunächst, den durchdringenden Charakter neuer digitaler Technologien für einen dynamischen wirtschaftlichen Aufholprozess zu nutzen. Die politischen Entscheidungsträger in China haben die bedeutende Rolle der digitalen Wirtschaft erkannt. So wurden spezifische Ziele und Maßnahmen mit Fokus auf Digitalisierung in den jüngsten, **13. Fünfjahresplan** (2016-2020) aufgenommen, mit Initiativen zur Verbesserung der digitalen Infrastruktur des Landes, der grenzüberschreitenden Kabelinfrastruktur, drahtloser Netzwerke, der Stärkung der Fähigkeiten in Bezug auf Hochgeschwindigkeitsübertragung und die Entwicklung einer "digitalen Seidenstraße" als Teil der "**Belt and Road Initiative**" (Heimberger et al., 2020a). Darüber hinaus kündigte die KPCh an, zwischen 2020 und 2030 umgerechnet insgesamt \$411 Mrd. in die Umrüstung seiner Telekommunikationssysteme auf 5G zu investieren. Auch die Ausbildung neuer Talente im Bereich der Künstlichen Intelligenz sind ein wichtiges Handlungsfeld. So plant China, bis 2020 mindestens 50 Forschungsinstitute zu gründen. Zugleich plant China erhebliche Fortschritte bei der Definition internationaler Standards für neue Technologien und die Sicherung von Führungspositionen in verschiedenen internationalen Standardisierungsgremien (Shi-Kupfer und Ohlberg, 2019). Diese Ziele hat China vorerst auch erreicht. Nachdem es 2011 nicht gelungen war, in der **Internationalen Organisation für Normung** (ISO) eine Mehrheit für einen alternativen Wi-Fi-Standard zu gewinnen, ist China heute ein zentraler Akteur beispielsweise in der internationalen Standardisierung von Blockchain-Technologie, dem Internet der Dinge (IoT) und der 5G-Technologie (ebd.).

Durch die einzigartige Verknüpfung von Partei, Staat und Privatwirtschaft hat China es geschafft, einheimische IT-Champions wie Baidu, Alibaba und Tencent (bekannt als "BAT") aufzubauen und dabei ausländische Wettbewerber vom heimischen Markt fernzuhalten. Ein Beispiel für die Beschränkung des Marktzugangs für ausländische Unternehmen bei digitalen Technologien ist insbesondere das **Cybersicherheitsgesetz** von 2017. Ähnlich wie beim Exportkontrollgesetz werden konkrete Schlüsselkategorien wie "kritische Infrastruktur" oder "persönliche Daten" unzureichend konkretisiert bzw. sehr breit gefasst. Um den Zugang ausländischer Unternehmen zu Chinas IT-Infrastruktur einzuschränken, ist die **Cyberspace Administration of China** (CAC) berechtigt, eine Cybersicherheitsüberprüfung aller Produkte und Dienstleistungen, die in "kritischen Infrastrukturen" eingesetzt werden, durchzuführen. Hierzu gehört beispielsweise auch die Offenlegung von Quellcodes. Zudem gelten strenge Anforderungen an das Datenmanagement für Unternehmen, die sie vom guten Willen beteiligter Behörden abhängig machen. Hierzu zählen strenge Anforderungen an die Datenlokalisierung, wodurch Unternehmen gezwungen sind, Informationen und andere "wichtige Daten" in der VR China zu speichern. Zudem müssen sie Sicherheitsprüfungen durchführen, bevor sie persönliche oder gesellschaftliche Daten aus China heraus transferieren (Shi-Kuper und Ohlberg, 2019). Gleichzeitig stehen globale Aktivitäten von Konzernen wie Hua-

wei, ZTE und Alibaba im Einklang mit den übergeordneten Expansionsplänen der Zentralregierung. Alibaba drängt in den Westen vor, wirbt dort für seine Dienste und die damit verbundenen regulatorischen Rahmenbedingungen (die eWTP oder e-World Trade Platform). ZTE und Huawei haben es indes geschafft, zentrale Partner für wichtige Telekommunikationsbetreiber in westlichen Volkswirtschaften aufzubauen, wobei die chinesischen Ambitionen in immer mehr Ländern auf Widerstand stoßen und regulatorische Gegenreaktionen zur Folge haben. Die Expansionspläne der chinesischen Digitalwirtschaft werden auch in der "**National Informatization Strategy**" (2016-2020) deutlich. Darin wird von den chinesischen Internetunternehmen konkret gefordert, "in die Welt hinauszugehen" und die Schaffung einer "digitalen Seidenstraße" zu unterstützen (ebd.).

(2) Materialwissenschaften/-technologien

Ab den frühen 2000er Jahren, insbesondere nach dem Start der Nationalen Nanotechnologie-Initiative in den USA, hat China, wie viele andere Länder auch, seine Bemühungen in der Förderung dieser Schlüsseltechnologie verstärkt. Bereits 2001 startete China mit der **National Nanotechnology Development Strategy** (2001-2010) die erste nationale Strategie zur Förderung der Nanotechnologie, die insbesondere jährlich steigende Investitionen in FuE vorsah (Qiu, 2016). Auch in die Fünf-Jahres-Planung wurde die Nanotechnologie ab den frühen 2000er Jahren mit aufgenommen. So sah der **zehnte Fünf-Jahres-Plan** (2001-2005) erstmals Prioritäten für die Kommerzialisierung und Entwicklung der Nanotechnologie vor. Dabei waren die Förderung von kurzfristigen (bspw. Entwicklung von Nanomaterialien), mittelfristigen (bspw. Entwicklung von Bionanotechnologie und Nano-Medizintechnik) und langfristigen Projekten (bspw. Entwicklung von Nanoelektronik und Nano-Chips) vorgesehen. Der **elfte Fünf-Jahres-Plan** sah wiederum einen Schwerpunkt auf innovative Technologien, einschließlich der Entwicklung neuer Materialien für die Informations-, Bio-, Luft- und Raumfahrtindustrie vor (Jarvis und Richmond, 2011). 2012 begann zudem das strategische **Pionierprogramm zur Nanotechnologie** mit einem Budget von umgerechnet ca. \$152 Mio. für fünf Jahre, das durch die Chinesische Akademie der Wissenschaften (CAS) in Peking geleitet wurde (Heimberger et al., 2020a).

Darüber hinaus wurden seit den frühen 2000er Jahren mehrere neue nationale Zentren für Nanotechnologie in China aufgebaut:

- Nanotechnology Industrialization Base of China in Tianjin (NIBC) (gegründet 2000),
- National Engineering Research Center for Nanotechnology (NERCN) in Shanghai (2003),
- National Centre for Nanoscience and Technology in Peking (2004),
- National Engineering Research Center for Nanomedicine in Hubei (2009),
- Centre for Excellence in Nanoscience (2015) (Gao et al., 2016).

Hierdurch wurde die Nanotechnologie zu einem der Schwerpunktbereiche in den mittel- und langfristigen Wissenschaftsprogrammen ab Mitte der 2000er Jahre (Qiu, 2016). Neben nationalstaatlichen Investitionen in Höhe von ca. \$100 Mio. pro Jahr investieren zusätzlich auch Regionalregierungen in den Aufbau von staatlichen Einrichtungen und Laboren für Mikro- und Nanotechnologie (Baglieri et al., 2014; Lia und Guan, 2016). Gleichzeitig kooperiert China bei der FuE zur Nanotechnologie nach wie vor eng mit anderen Ländern. Wichtigster Kooperationspartner sind hier die USA. Gemessen an den Ko-Publikationen tragen Kooperationen zwischen chinesischen und US-amerikanischen Wissenschaftler:innen zu 55% der internationalen Kooperationen Chinas im Bereich der Nanowissenschaften bei. Unterstützt wird dies durch den Aufbau mehrerer internationaler Einrichtungen zur Förderung der Kooperation in der Nanotechnologie. Zu nennen ist hier beispielsweise das Zhejiang California International NanoSystems Institute, welches von der Provinzregierung Zhejiang, der Zhejiang Universität und dem California NanoSystems Institute gemeinsam gegründet wurde (ebd.).

(3) Technologien für Bio- und Lebenswissenschaften

Die Biotechnologie stellt bereits seit den 1980er Jahren einen zentralen Schwerpunkt für staatliche Unterstützung und Investitionen dar. Schätzungen zufolge haben Chinas Zentral-, Lokal- und Provinzregionen bisher insgesamt über \$100 Mrd. in die Forschung und Entwicklung der Biotechnologie investiert (Moore, 2020). Zudem wurde die Biotechnologie als eine von sieben Strategic Emerging Industries (SEI) identifiziert, die nach Einschätzung der Zentralregierung von entscheidender Bedeutung für die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit sind. Im letzten **Fünf-Jahres-Plan** (2016-2020) wurde die Biotechnologie-Industrie in sechs Kategorien aufgeteilt: Pharmazeutika, landwirtschaftliche Biotechnologie, Energie aus Biomasse, Umweltschutz, Bioservices und Biomedizintechnik. Insgesamt sieht der Fünf-Jahres-Plan bezüglich der Biotechnologie folgende zentrale Ziele vor:

- Steigerung der Originalität der Biotechnologie und Entwicklung neuer Technologien und Produkte; konkretes Ziel: 20-30 führende neue Technologien, 30-50 wichtige strategische neue Produkte,
- Schaffung einer Innovationsplattform für Biotechnologie zur Beschleunigung der Industrialisierung der Biotechnologie: Fokus auf grüne Bioprodukte, innovative Medikamentenforschung und biomedizinische Technik, Bau eines Bioinformatik-Zentrums, einer Bank für humangenetische Ressourcen und weitere Infrastrukturen zur Unterstützung biologischer und medizinischer Big Data,
- Verstärkung der Industrialisierung der Biotechnologie: Aufbau von Biotechnologie-Transfer- und Transformationszentren, Aufbau spezialisierter Hightech-Parks für Biotechnologie, insbesondere für 10-20 biopharmazeutische Spezialparks und 5-10 Technologieparks für Bioproduktion (Kazmierczak et al., 2019).

Bei den beschriebenen Zielen in der Fünf-Jahres-Planung werden auch der Prioritätenwechsel und der zunehmende Fokus auf den Aufbau einheimischer Kapazitäten in der Förderung der Biotechnologie deutlich. Während im **12. Fünf-Jahres-Plan** (2011-2016) noch der internationale Austausch und die Zusammenarbeit sowie die Unterstützung relativ ausgereifter Biotechnologie-Subsektoren wie die genetische Pflanzenveränderung betont wurde, konzentriert sich die Politik im **13. Fünf-Jahres-Plan** verstärkt auf die Entwicklung global wettbewerbsfähiger Unternehmen. Zudem wird das ambitionierte Ziel definiert, dass der Industriebereich bis 2020 insgesamt 4% des gesamten Bruttoinlandsprodukts ausmachen soll (Moore, 2020). Gerade die Entwicklung von Biotech-Parks stellt eine wichtige (regional-)politische Strategie zur Förderung der chinesischen Biotechnologie-Industrie dar. Zusätzlich zu den auf nationaler Ebene geschaffenen Parks gibt es in fast jeder chinesischen Provinz eine Reihe lokaler Biotechnologieparks. Bislang gibt es in ganz China über 100 Hightech- und Industrieparks mit Biotechnologiebezug auf nationaler Ebene und mehr als 400 Biotech-Industrieparks auf Provinzebene. Einige dieser Parks haben sich auch zu größeren Biotechnologie-Netzwerken zusammengeschlossen (Kazmierczak et al., 2019). Das zeigt auch die Bedeutung der Provinz- und Kommunalregierungen für die chinesische Biotechnologie (ebd.).

Dennoch spielen internationale Kooperation bei FuE in der Biotechnologie für China nach wie vor eine wichtige Rolle. Chinesische Firmen und Forschungseinrichtungen nehmen an international ausgerichteten Förderprogrammen für Biotechnologie teil, wie beispielsweise der "China-Germany Bioscience Innovation Platform", die 2002 vom chinesischen Ministerium für Wissenschaft und Technologie (MOST) und dem BMBF in Deutschland mit dem Ziel ins Leben gerufen wurde, Forschung, Kooperation in den Bereichen Biomedizin, Biopharmazie und neue biologische Materialien zu erleichtern. 2013 wurde der "UK-China Research and Innovation Partnership Fund" ins Leben gerufen. Beide Länder steuern umgerechnet \$274 Mio. für fünf Jahre bei für die Forschungsk Kooperationen in den Bereichen Stammzellenforschung, Gesundheit und Lebensmittelsicherheit. Auch bilaterale Partnerschaften zwischen Universitäten spielen eine wichtige Rolle, so wie das "Peking-Yale Joint Center for Plant Molecular Genetics and Agro-Biotechnology" oder die erste Forschungsplattform für translationale Medizin der Shenzhen University, der State University of New York at Buffalo, der Hong Kong Polytechnic University und der Roswell Park Comprehensive Cancer Center (Kazmierczak et al., 2019).

Protektionistische Ansätze im Biotechnologiesektor werden beispielsweise in der chinesischen Regulierungspolitik für Biopharmazeutika deutlich. So mindert China den Marktschutz für bestimmte neue biotechnologische Produkte, wenn sie zuerst außerhalb Chinas zur Zulassung eingereicht werden. Weitere Einschränkungen erfolgen, wenn Zulassungsanträge auf Daten beruhen, die nicht in China erhoben wurden. Solche Regulierungen helfen vor allem chinesischen Entwicklern von Biopharmazeutika und führen dazu, dass ausländische Unternehmen China als ersten Markt für den Markteintritt bevorzugen. Zugleich sieht die Zulassungspolitik für Medikamente

eine schnelle Überprüfung von Medikamenten vor, die von einheimischen Firmen entwickelt wurden, während ausländische Medikamente einem wesentlich längeren und mühsameren Prozess unterworfen sind (Kazmierczak, 2019).

(4) Neuartige Produktionstechnologien

Die eingangs erwähnte "**Made-in-China 2025**"-Strategie (MIC 2025) zielt darauf ab, die chinesische Fertigungsindustrie zu stärken, Innovationen voranzutreiben, Standards zu setzen und globale Lieferketten zu kontrollieren. Letztlich ist diese Strategie eine Antwort auf das verlangsamte chinesische Wirtschaftswachstum und die Notwendigkeit, neue Wachstumsmodelle zu entwickeln. Insgesamt definiert die Strategie zehn Schlüsselindustrien: IT, Robotik, grüne Energie und Fahrzeuge, Luft- und Raumfahrttechnologie, Meerestechnik, Biomedizin und medizinische Geräte sowie Landmaschinen. Fast alle Provinzen und Gemeinden (28 von 30) haben individuelle Umsetzungspläne für MIC 2025 entwickelt (Heimberger et al., 2020a). Die Strategie legt einen expliziten Fokus auf innovative Fertigungstechnologien ("Smart Manufacturing") und definiert das Ziel, sich zu einer "Fertigungs-Supermacht" zu entwickeln, in dem es auf jene Industriesektoren abzielt, die insbesondere in den entwickelten Volkswirtschaften signifikant zum Wirtschaftswachstum beitragen (Wübbeke et al., 2016).

Ein Teil der Strategie ist beispielsweise der "**Additive Manufacturing Industry Development Action Plan**" (2017-2020), in dem das zuständige Ministerium für Industrie und Informationstechnologie gemeinsam mit elf anderen Behörden Richtlinien zur Stärkung und Weiterentwicklung des additiven Fertigungssektors in China festschreibt. Der Plan sieht ein jährliches Umsatzwachstum in diesem Bereich von 30% vor. Weitere Ziele des Plans lauten wie folgt:

- Herausbildung international wettbewerbsfähiger chinesischer Unternehmen,
- Durchbrüche bei über 100 Arten von technischer Ausrüstung, Geräten und Materialien,
- Start von über 100 Pilotprojekten in der additiven Fertigung,
- Breite Anwendung neuer Technologien in anderen Industriesektoren, bspw. in der Luftfahrt oder der Automobilindustrie (Heimberger et al., 2020a).

Der Plan will zudem chinesische Unternehmen auch internationaler bzw. globaler ausrichten. So sieht der Plan einerseits die Förderung von internationalen Kooperationen durch die Einrichtung von Forschungs- und Entwicklungszentren in anderen Ländern und den Aufbau internationaler Marketing- und Servicenetzwerke vor. Die politisch forcierte internationale Kooperation in mehreren Kernsektoren wird auch durch den Aufbau bilateraler Kooperationsmechanismen mit 17 Ländern sowie durch die Verhandlung von Rahmenabkommen mit 33 Ländern untermauert. Andererseits verfolgt der Plan einen Ansatz, durch gezielte Outbound-Akquisitionen westliche Tech-

nologieunternehmen, insbesondere in den Sektoren wie Halbleiter, Robotik und Luftfahrt zu übernehmen (Liu, 2018). Mit dieser Strategie zielt China auf einen schrittweisen Ersatz ausländischer Technologien durch chinesische Technologien (Lokalisierung) (Wübbecke et al., 2016).

Neben der **MIC 2025-Strategie** zielt auch die **Internet Plus (IP)-Strategie** von 2015 darauf ab, eine innovationsgetriebene Entwicklung von Robotern, 3D-Druck, Big Data und der Integration von Fertigung und Dienstleistungen durch das mobile Internet zu fördern (Ernst, 2016). Konkrete Ziele für die Fertigungsindustrie schreibt auch der Entwicklungsplan für die Roboterindustrie (2016-2020) fest. Er sieht die Förderung eines breiten Einsatzes von Robotern vor. Konkret sollen bis 2020 jährlich 100.000 Industrieroboter durch chinesische Technologien produziert werden. Hierzu werden zahlreiche Programme und Förderanreize für Forschung und Entwicklung durch die Regierung vorgesehen, wie beispielsweise Subventionen für Hersteller von Robotern und Automatisierungslösungen sowie zinsgünstige Darlehen, Steuererleichterungen und Anreize für die Anmietung von Grundstücken und Gebäuden, um die robotergestützte Automatisierung in Schlüsselindustrien zu fördern (Ernst, 2016).²¹

Insgesamt bieten die umfangreichen staatlichen Finanzmittel und Subventionen die Möglichkeit, industrielle Schwerpunktbereiche politisch zu lenken. So wurde beispielsweise der **Advanced Manufacturing Fund** mit 20 Mrd. Yuan (umgerechnet ca. 2,7 Mrd. Euro) ausgestattet. Der Fonds wird getragen von der State Development and Investment Corporation, dem Finanzministerium, dem Ministerium für Industrie und Informationstechnologie und zwei weiteren staatlichen Investmentgesellschaften. Die Zentralregierung zahlte umgerechnet ca. 780 Mio. € in den Fonds ein, während die State Development and Investment Corporation und die Industrial and Commercial Bank of China ca. 520 Mio. € bzw. 650 Mio. € beisteuerten. Der Fonds kaufte unter anderem Aktien des Batterie- und Elektrofahrzeugherstellers BYD im Wert von umgerechnet ca. 190 Mio. € und investierte in ein Joint Venture mehrerer Roboterhersteller in Shanghai. Auch weitere andere staatliche Fonds stellen erhebliche Summen für die Entwicklung intelligenter Fertigungstechnologien bereit, wie der IC Fund oder der Emerging Industries Investment Fund, die über ein Kapital von umgerechnet 19 Mrd. € bzw. 5,4 Mrd. € verfügen (Wübbecke et al., 2016; Liu, 2018). Steuer- und finanzpolitische Instrumente werden auch eingesetzt, um internationale Aktivitäten zu fördern, wie beispielsweise über die Asian Infrastructure Investment Bank, den Silk Road Fund, die New Development Bank, den China-Latin America Industrial Capacity Cooperation Fund und den China-Africa Industrial Capacity Cooperation Fund (ebd.).

²¹ <https://www.china-briefing.com/news/chinas-robot-industry/> (abgerufen am 08.07.2021).

Kapitel 6 - Fazit für die vorliegende Studie

Basierend auf den Analysen der politischen Ansätze zur Sicherung bzw. zum Aufbau von Technologiesouveränität lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- In der **Europäischen Union** lässt sich ein industriepolitischer Trend hin zu einer stärkeren Fokussierung auf ganze soziotechnische Systeme bzw. auf Systemtransformationen feststellen. Konzipierte Förderinstrumente und Strategien setzen nicht nur bei der reinen Technologieförderung und -entwicklung an, sondern beziehen sich auf die gesamte Wertschöpfungskette einer Technologie, von der Materialentwicklung bzw. Rohstoffgewinnung bis hin zum Transfer oder zum Recycling. Der Fokus auf Funktionsfähigkeit ganzer Wertschöpfungsketten wurde durch die Erfahrungen in der Corona-Pandemie noch verstärkt. Dies wird beispielsweise in der Aktualisierung der europäischen Industriestrategie deutlich, die internationale Lieferketten noch weiter diversifizieren und industrielle Allianzen noch stärker fördern will. Zudem verknüpfen politische Förderinstrumente die Technologieentwicklung zunehmend mit der Zielsetzung, Lösungen für gesamtgesellschaftliche Herausforderungen zu entwickeln (Stichwort: Green Deal). Gleichzeitig werden Forderungen nach einer Überarbeitung des europäischen Wettbewerbsrechts laut, insbesondere unter dem Eindruck eines zunehmenden internationalen Wettbewerbs. So nimmt das europäische Wettbewerbsrecht neuerdings auch nichteuropäische Wirtschaftsakteure und deren finanzielle Zuwendungen von Regierungen.

Das **Verständnis von Technologiesouveränität der Europäischen Union** bezieht sich primär auf eine Verringerung der Abhängigkeiten durch Diversifizierung von Lieferketten und der Förderung ganzer Wertschöpfungsketten in Schlüsseltechnologiebereichen.

- In den **USA** lässt sich auch unter der neuen Biden-Administration eine Industrie- und Handelspolitik beobachten, die sich insbesondere gegenüber China zunehmend abschottet und Marktzugänge reguliert. Erfolge verzeichnen die USA in einigen Schlüsselindustriebereichen mit einer weniger expliziten und mehr "verdeckten" Industriepolitik. Die Rolle des Staates besteht hierbei einerseits in einer substantiellen Förderung von Forschung und Entwicklung von Technologien durch verschiedene Instrumente und Anreize, sowohl im Wissenschafts- als auch im Privatsektor. Andererseits schafft der Staat vor allem günstige Rahmenbedingungen für eine schnelle und unkomplizierte Kommerzialisierung und Vermarktung von Forschungsergebnissen. Nichtsdestotrotz wurden insbesondere seit den Erfahrungen der internationalen Finanz- und Wirtschaftskrisen auch in der US-amerikanischen Industriepolitik staatliche Interventionen und Ansätze expliziter Industriepolitik zunehmend wieder salonfähig.

Das derzeit vorherrschende **Verständnis von Technologiesouveränität in den USA** ist charakterisiert durch das Ziel, seine Führungsposition in verschiedenen Schlüsseltechnologiesektoren zu bewahren oder wiederzuerlangen und Chinas wachsenden Einfluss durch Beschränkungen des Marktzugangs einzudämmen.

- **China** fördert seit Jahren die Entwicklung zahlreicher Schlüsseltechnologien mit massiven Investitionen. Der Staat fungiert als quasi-Venture Capitalist. China forciert zum einen den industriellen Kapazitäts- und Kompetenzaufbau im Inland und beschränkt den Zugang zu heimischen Märkten für ausländische Wettbewerber. Zum anderen verfolgt China industriepolitisch einen ambitionierten globalen Expansionsplan. Die erheblichen staatlichen Finanzmittel befördern zwar durchaus den wirtschaftlichen Aufholprozess **Chinas** gegenüber dem Westen. Gleichzeitig führt diese Art der politischen Steuerung aber auch zu erheblichen Überkapazitäten und –angeboten in der Industrie. Das **chinesische Verständnis von Technologiesouveränität** folgt der industriepolitischen Zielsetzung, nicht nur weltweit führend in sämtlichen Schlüsseltechnologiebereichen zu sein, sondern ganze Wertschöpfungsketten zu dominieren und ausländische Technologien durch inländische sukzessive zu substituieren.

Aus politischer Perspektive ist somit übergreifend festzuhalten, dass Entwicklungen im Bereich der Schlüsseltechnologien sowohl in den Vereinigten Staaten als auch in China bereits seit einiger Zeit sehr bewusst langfristig und mit erheblichen Mitteln gefördert wurden und dies auch weiterhin werden. Wenngleich hierbei vor dem Hintergrund gegensätzlicher politischer Systeme durchaus sehr unterschiedliche Ansätze zur Anwendung kommen, widmeten beide Länder dem Thema der technologischen Positionierung lange Zeit deutlich mehr konkrete Aufmerksamkeit als Deutschland und Europa. Sowohl in den Vereinigten Staaten als auch in China wurde das Potenzial der sich in den frühen 2010er Jahren anbahnenden digitale Revolution früher als in Europa erkannt und politisch in einem Umfang gefördert, der in Europa – trotz jüngster Bemühungen – nach wie vor seinesgleichen sucht.

In den letzten Jahren sind sowohl die Europäische Union und auch Deutschland bemüht, diesen sowohl faktischen als auch förderpolitischen Rückstand wettzumachen. Allerdings bedarf der hierbei zu Grunde gelegte Ansatz in vielen Bereichen sowohl politisch als auch grundsätzlich noch der konzeptionellen Klärung, bevor sich ein schlüssiges Gesamtbild – und daraus wirksame förderpolitische Maßnahmen ergeben können, die die autonome Gestaltungsfähigkeit deutscher Akteure, d.h. die technologische Souveränität Deutschlands insgesamt sichern helfen.

8 Schlussfolgerungen

Dieser Bericht zeigt somit zusammenfassend Folgendes auf:

Zurzeit sind alle führenden Industrienationen herausgefordert, mit der dynamischen Entwicklung im Bereich der softwaregetriebenen Digitalisierung Schritt zu halten und entsprechende, für die zukünftige Wertschöpfung und Wohlstand gesamtwirtschaftlich entscheidenden Fähigkeiten selbst zu entwickeln und vorzuhalten. Die Größenordnung dieser Herausforderung setzt sich von denen in anderen Technologiebereichen aktuell maßgeblich und noch einmal stärker ab, als sich dies beim Entwurf erster Kataloge von Schlüsseltechnologien in den 2010er Jahren abzeichnete. In diesem Sinne kommt dem Konzept Schlüsseltechnologie eine neue, verstärkte Relevanz zu.

Deutschland verfügt in diesen Technologien zwar über relevante Kompetenzen, die es auch durchaus dynamisch weiterentwickelt, allerdings kann es rein quantitativ das zukünftige, globale Marktumfeld schwerer mitbestimmen als in der Vergangenheit. Im Vergleich zu traditionelleren Technologiebereichen sind seine Optionen der souveränen Mitgestaltung in den nun relevanten Bereichen stärker limitiert. Umso schwerer wiegt, dass bestehende Optionen der Mitgestaltung zzt. kaum genutzt werden. Wenn auf ein aktives Mitwirken im Bereich der Standardisierung weiterhin verzichtet wird, droht Deutschland im Bereich der Anwendung zukunftssträchtiger Technologien international weiter ins Hintertreffen zu geraten.

Gerade die Schlüsselbereiche Künstliche Intelligenz und Big Data sind technologisch klar abgrenzbar (d.h. keine Dachbegriffe) und entfalten gleichzeitig verlässlich erhebliche Breitenwirkung. Generell lässt eine Fokussierung politischer Fördermittel auf den Bereich der softwaregetriebenen Digitalisierungstechnologien eine hohe und auch unmittelbare Wirksamkeit erwarten. Hier sollten in der näheren Zukunft mit klar definierten, großvolumigen Investitionen klare Akzente gesetzt werden, um Deutschlands technologische Anschlussfähigkeit in diesen zentralen Bereichen zu erhalten.

Gleichzeitig bedarf es eines Alleinstellungsmerkmals, mittels dessen sich Deutschland und Europa von den USA und China absetzen können. Angesichts der veränderten Kräfteverhältnisse im globalen Innovationswettbewerb kann es dabei nicht länger das Ziel sein, bestimmte Bereiche technologisch sowie exportseitig strukturell zu dominieren. Stattdessen gilt es, sie über eine gezielte Positionierung in bestimmten Bereichen strukturell arbeitsteilig mitzugestalten und Abhängigkeiten vorzubeugen.

Entsprechende Alleinstellungsmerkmale sind auf Basis unserer Analyse am ehesten in Schnittstellenbereichen jener Technologien zu entwickeln, die aktuell durch die softwaregetriebene Digitalisierung revolutioniert werden. Im besonderen Fokus stehen hierbei die Produktionstechnologien. Deutsche bzw. europäische Lösungen können in den Bereichen Künstliche Intelligenz, Big Data und Internet of Things, die die Schnittstelle zwischen softwaregetriebenen digitalen und Produktionstechnologien bedienen, die strukturelle Resilienz des gesamten Innovationssystems stärken

und dessen technologische Souveränität im internationalen Kontext erhöhen. Konkret ist daher die Förderung neuer Lösungen in den Bereichen Robotik und Industrie 4.0 zu empfehlen. Mit vergleichbaren Argumenten lassen sich darüber hinaus Investitionen in die Bereiche Photonik, generative Fertigung, sowie Bioökonomie rechtfertigen.

Darüber hinaus gehend ist die Frage zu stellen, welche Beträge Deutschland und Europa zum Fundament zukünftiger technologischer Aktivitäten leisten wollen. Auch hier erscheint es zzt. nicht realistisch, in einem Gesamtfeld eine strukturell dominierende Rolle einzunehmen. Stattdessen erscheinen der gezielte Erhalt bestehender Kernkompetenzen (Hardwareentwicklung, Mechatronik, Biotechnologie, Pharmazeutik) sowie fokussierte Investition in die Fundamente der Zukunft (Quantencomputing, Nanomaterialien, Komposite, Bionik) von besonderer Bedeutung.

Durch die Abhängigkeit von materiellen Importen haben sich Deutschland und Europa in eine Situation gebracht, die einer technologischen Souveränität abträglich ist. Allerdings zeigen unsere Analysen, dass keinesfalls allgemein besorgniserregende Konzentrationstendenzen zu beobachten sind und sich mit der (Rück-)Verlagerung kostensensitiver Produktionsschritte nach Osteuropa durchaus noch relevante Optionen der Diversifizierung bieten, die nicht in gleichem Maße in einem geopolitischen Spannungsfeld stehen, wie Verlagerungen nach China.

Handelstheoretisch ist es für ein Land der Größe Deutschlands nicht realistisch, in allen Bereichen absolute oder auch nur komparative Vorteile zu realisieren. Zudem verfügt es nicht über die notwendigen Ressourcen alle theoretisch vorhandenen komparativen Vorteile auch tatsächlich zu realisieren. Eine Einbindung in die bestehende – und ggf. gezielt weiter zu entwickelnde – internationale Arbeitsteilung erscheint damit unverzichtbar. Gleichzeitig allerdings ist der Zugang zu Exportmärkten gerade für ein Land mittlerer Größe unverzichtbar, um das jetzige Niveau an technologischer Expertise zu halten, die nicht zuletzt auch im Anwendungskontext ausländischer Märkte weiterentwickelt wird. Zentraler ist es daher, nicht nur bestehende Exportstärken zu pflegen und zu erhalten, sondern auch beständig neue Alleinstellungsmerkmale zu entwickeln, auf Grundlage derer sich neue Exportstärken entwickeln lassen.

Ungeachtet der in Teilen begründeten Vorbehalte bezüglich materieller Abhängigkeiten ist die bestehende wissenschaftlich-technologische Zusammenarbeit v.a. mit Asien in vielen Bereichen eher als ausbaufähig anzusehen. Eine geopolitisch motivierte Abwendung von China, aber auch die mangelnde Pflege bestehender Kooperationen mit Japan, Korea und Indien würde Deutschland und Europa perspektivisch noch stärker von relevanten Wissensquellen abschneiden, zu denen schon jetzt nur unterdurchschnittlicher Zugang besteht. Gerade diese wird Deutschland aber in Zukunft benötigen, um gezielt und strategisch von anderen Ländern zu lernen und mit ihnen – wo möglich – von eigenen Interessen geleitet zu kooperieren.

Ungeachtet der geopolitischen Lage, die – nicht zuletzt in Asien – einen kritischen, wachsamem und strategischen Umgang fordert, ist festzustellen, dass sowohl Deutschland als auch Europa nicht mehr in allen Bereichen die Technologie- und Produktlebenszyklen initiieren und anführen.

In den Bereichen, allerdings, in denen Entwicklungen gleichauf mit anderen, oder aus einer aufholenden Position heraus erfolgen, erscheint eine aktive Auseinandersetzung mit eben jenen Akteuren, die die wissenschaftlich-technologische Entwicklung anführen unverzichtbar. Neben dem bestmöglichen Erhalt deutsch-chinesischer Kooperationen impliziert dies die Notwendigkeit bestehender Kooperationen im transatlantischen und europäischen Rahmen sowie die Ausweitung jener zu Japan, Korea, Indien, Singapur und anderen Kompetenzträgern im asiatischen Raum.

9 Empfehlungen

Allgemeine Empfehlungen

Generelle Maßgabe: Politisch sind insbesondere solche Technologien in den Blick nehmen, die von besonderer systemischer Relevanz sind. Hierfür müssen klare Kriterien definiert werden, um im politischen Prozess anders als lediglich interessengeleitet Prioritäten setzen zu können. Folgende Bereiche bieten sich in diesem Sinne besonders an

- digitale, insbesondere softwaregetriebene Technologien als zentrale Treiber zukünftiger Wertschöpfung anerkennen und anstreben, Deutschlands Position zu halten, und, insoweit möglich, zu verbessern,
- in Technologiebereichen, in denen sich technologische Sprünge abzeichnen, auch Beiträge zur technologischen Basis fördern, die Deutschland ein "leapfrogging" an die technologische Spitze ermöglichen könnten (Quantencomputing, Graphen, ...),
- Lösungen für neue Anwendungszusammenhänge an der Schnittfläche von digitalen und anderen Technologien, in denen Deutschland globale Alleinstellungsmerkmale entwickeln könnte (zurzeit v.a. im Bereich Produktion),
- Technologien, die helfen regierungsseitig definierte Missionen (z.B. Nachhaltigkeit, Klimaschutz) zu erreichen bzw. originär staatliche Kernaufgaben zu gewährleisten (Bioökonomie, Wasserstoff, IT-Sicherheit...

Zu betonen ist hierbei, dass allen vier Begründungszusammenhängen eine grundsätzlich gleichwertige Bedeutung zukommt. Zwar kommt der digitalen Revolution zurzeit eine in sich singuläre Bedeutung zu, eben diese ergibt sich aber erst aus ihrem Zusammenwirken mit bestehenden bzw. sich parallel weiter entwickelnden Technologien.

Aufbau von Kapazitäten

- V.a. im digitalen Bereich und bzgl. Beiträgen zu einer neuen technologischen Basis (IT der Zukunft, Produktionstechnologie aber auch Bioökonomie) ist ein konzertiertes europäisches Vorgehen erforderlich, um hinreichende kritische Masse zu erreichen,
- Missionsorientierte Technologieinvestitionen gerade auch dort prüfen, wo zentrale Technologien (noch) nicht von selbst starke Dynamiken entfalten,
- Das Bemühen um deutsche und europäische Anschlussfähigkeit in Kernbereichen der Digitalisierung wie Künstlicher Intelligenz und Big Data darf nicht aufgegeben werden, hier sollte großmaßstäbig aber gezielt auf europäischer Ebene investieren,
- In spezifischen Anwendungsfeldern sollte in Deutschland die Entwicklung nationaler Alleinstellungsmerkmale gefördert werden, z.B. in den Bereichen Produktionstechnik, Mobilität, Bioökonomie sowie in bestimmten Bereichen der Materialwissenschaften,
- Angesichts des bestehenden Rückstandes sollten vor allem im digitalen Bereich keine unrealistischen Ziele ausgelobt werden (europäisches Google),
- Insgesamt sollte bereits in den Schulen die Bildung in MINT Fächern stärker in den Mittelpunkt gestellt werden

- Die Hochschulbildung im Bereich Digitalisierung sollte sowohl über die Schaffung neuer Curricula als auch die Einrichtung zusätzlicher Lehrstühle gestärkt werden,
- Parallel sollten auch in sozial- und geisteswissenschaftlichen Fächern die Potenziale neuer, ibs. digitaler Technologien stärker erschlossen werden,
- Die bundesseitige Förderung groß angelegter, grenzüberschreitender Public-Private-Partnerships im Forschungs- und Entwicklungsbereich sollte fortgesetzt und v.a. auf die o.g. theatischen Bereiche hin ausgerichtet werden,
- Deutschland sollte in bestehenden Europäischen Programmen wie z.B. den IPCEIs und dem Europäischen Institut für Innovation und Technologie noch aktiver mitwirken und – durch Ko-finanzierung und inhaltliche Beiträge – Akzente setzen,
- Großangelegte europäische Vorhaben bis hin zu solchen nach dem Modell Airbus, die auch Aspekte der Fertigung mit einbeziehen wären erneut ernsthaft zu prüfen,
- Entgegen kritischer Stimmen sollte eine Außenwirtschaftspolitik beibehalten werden, die, auf Grundlage qualifizierter Einzelfallprüfung, die direkte Übernahme deutscher Technologieunternehmen durch staatlich gelenkte Investoren unterbindet.

Rahmenbedingungen inkl. Standardisierung

- Die Aktivitäten von Big Tech Unternehmen aus den Vereinigten Staaten und China sollten kritisch beobachtet werden, um Implikationen auf europäische Märkte effektiv zu verfolgen und nutzen, sowie bei kritischen Entwicklungen im europäischen Sinne intervenieren und mögliche Abhängigkeiten vermeiden zu können, z.B. im Bereich 5G,
- Infrastrukturen, im Datenbereich sollten aufgebaut werden, um die Abhängigkeit von nicht europäischen Anbietern von Dateninfrastrukturen zu verringern, im Aufbau dieser Infrastrukturen müssen Deutschland und Europa sprechfähig bleiben,
- Die strategische Positionierung global wettbewerbsfähiger europäischer Technologien in der internationalen Standardisierung sollte noch stärker gefördert bzw. in weitere Förderprogramme als Evaluationskriterium mit aufgenommen werden,
- In Europa kommt Open Source Software wichtige Bedeutung zu, deren Integration in die internationale Standardisierung durch Programme und institutionelle Änderungen unterstützt werden sollte,
- Um den nationalen Einfluss auf internationale Standards auch in Bereichen außerhalb der Informations- und Kommunikationstechnik aufrecht zu erhalten bzw. zu stärken, sollte für die Anreize für Wissenschaftseinrichtungen verbessert werden, z.B. durch ein WIPANO äquivalentes Programm,
- Zudem sollte die Möglichkeit standard-essentielle Patente zu deklarieren vor allem in Wissenschaftsorganisationen stärker publik gemacht werden,
- Um die Abhängigkeit von ausländischen standard-essentiellen Patenten und die damit verbundenen Kosten zu reduzieren, sollte geprüft werden, ob man nicht eigene standard-essentielle Patente in Patentpools einbringt, die eine kostengünstigere Option darstellen, um größere Patentportfolios ein zu lizenzieren.

- Kooperation in der Setzung regulativer Rahmenbedingungen im europäischen Kontext, um damit auch außereuropäischen Regulierungen im Sinne europäischer Werte, wie z.B. im Fall der DSGVO, zu beeinflussen.

Handelsbeziehungen

- Da der tatsächliche Umfang problematischer Importabhängigkeiten Deutschlands in einzelnen Gütergruppen weder zuverlässig noch umfassend erfasst ist, müssen weitere, differenzierte Studien durchführen, um problematische Entwicklungen konkret zu identifizieren und die systemische Relevanz der betroffenen Gütergruppen zu prüfen,
- Die Bundesregierung sollte Unternehmen und Verbände im konstruktiven Dialog auf die Notwendigkeit von Lieferketten-Diversifizierung hinweisen und auch finanzielle Unterstützung für entsprechende Risikoanalysen bereitstellen,
- Die Realisierbarkeit einer "Diversifizierungsbürgschaft" für Unternehmen sollte, nach dem Modell bestehender Exportkreditgarantien geprüft werden; mittels dieser könnten in wenigen, ausgewählten Bereichen die mit einer Diversifizierung von Lieferketten verbundenen Unsicherheiten bzw. kommerziellen Nachteile abgesichert werden,
- Weitere Initiativen zum Ausbau europäischer Wertschöpfungsketten sollten geprüft werden, z.B. über ergänzende Investitionen in Produktionsstandorte, und ggf. im Infrastrukturbereich flankiert über Kofinanzierungen aus europäischen Mitteln.

Kooperation

- Deutschlands strategische Intelligenz zur Entwicklung von Nationen, die mit Deutschland und Europa im Wettbewerb stehen, sollte durch die Durchführung entsprechender Studien aber auch den Aufbau eigener struktureller Kompetenzen in Verwaltung, an Hochschulen und in der außeruniversitären Forschung, gestärkt werden nicht zuletzt, um einen qualifizierten Pool von Experten für Einzelfallprüfungen (s.o.) zu schaffen,
- Die Vorteile europäischer Kooperation in Forschung und Innovation sollten vollumfänglich genutzt und ggf. weiter ausgebaut werden, Fördermöglichkeiten sollten voll ausgeschöpft und nationale Maßnahmen mit Horizon Europe koordiniert werden,
- Zur Förderung technologischen Lernens vom Ausland sollten neue, projektbasierte Kooperationsformate etabliert werden, mit dem Ziel, deutsche Forschende und auch Unternehmen aktiv zur Einnahme einer "knowledge-sourcing" Perspektive zu ermutigen,
- Die Vertretungen deutscher Wissenschaftsorganisationen im Ausland sollten stärker gefördert, intensiver koordiniert sowie weiter professionalisiert werden, insbesondere jene für Akteure außerhalb der großen Allianzorganisationen sowie der TU9, die aktuell eher schwach finanziert bleiben,
- Im technologischen Bereich sollten klare, aber konservative Kataloge hinsichtlich "Nicht-Kooperationsthemen" mit geopolitischen Konkurrenten definieren, darüber hinaus breiter definierte Kataloge für Prüfthemen bzw. nicht förderbare Themen; alle diese Kataloge sollten ca. jährlich fachkundig überarbeitet werden,

- Die Themen wissenschaftliche und technologische Kooperation sollten dabei – gerade aufgrund ihres sehr unterschiedlichen Charakters – an zentraler Stelle gemeinsam und ganzheitlich diskutiert werden um zu konsistenten Lösungen zu kommen,
- Das deutsche und europäische Fördersystem sollte grundsätzlich für nicht-europäische, auch asiatische, Partner geöffnet bleiben, ohne dass diese pauschal förderfähig zu stellen. Kriterien hierfür lassen fallbasiert für spezifische Schlüsseltechnologien ableiten.

Anhang I - Technologieabgrenzungen

Tabelle A1: Erläuterung zur Operationalisierung der Einzeltechnologien

Digitalisierungstechnologien	Materialwissenschaften	Produktion	Bio-/ Lebenswissenschaften
<p>Mikro-/Nanoelektronik</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hetero-System-Integrationstechnologien/Eingebettete Systeme • Externe Systemanbindung (Kommunikation, Datentransfer, Wi-Fi) • Heterogene Komponenten & Mehr-als-Moore • Optoelektronik • Analog und Mixed-Signal Geräte (µ-Wellen, RF, THz) • Leistungselektronik • "Computing" • Gedruckte/flexible Elektronik • Gerätetechnik • Quantentechnologie 	<p>Neue Werkstoffe</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hochleistungswerkstoffe • Oberflächentechnik und Beschichtungen • Elektronische und optische Funktionsmaterialien • Materialien zur Energiespeicherung und -erzeugung • Intelligente und multifunktionale Materialien (inkl. Phasenwechsel, Formgedächtnis, Selbstheilung,..) • Industrielle Materialien (inkl. Katalysatoren, Membranen, Filter) 	<p>Advanced Manufacturing</p> <ul style="list-style-type: none"> • Robotik / Mensch-Maschine-Interaktion • Hochleistungsrechnen/ Cloud-basierte Simulation • Additive Fertigung • Intelligent equipment • Prozessindustrie (Verarbeitung neuer Materialien, Strukturen) • Monitoring and control • Hochleistungsproduktion (Flexibilität, Präzision und Zero-Defect) • Hochleistungs-, Hochpräzisionsverarbeitung 	<p>Biotechnologie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analytik und Diagnostik • Verwertung biologischer Daten • Biomedizin • Bioverfahrenstechnik/ Bioprosesstechnologien
<p>Künstliche Intelligenz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entscheidungsmanagement • Signalerkennung • Biometrie • Virtuelle Agenten • Spracherkennung • Computerlinguistik • Video-/Bildverarbeitung • "Deep learning" • Intelligente Steuerung 	<p>Nanotechnologie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nanopartikel, Nanodraht und -röhren • 2D-Materialien • Nanostrukturierte Beschichtungen • Nanoemulsionen und -pigmente • Nanomembranen • Nanomedizin 	<p>Photonik</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intelligente, sensor-basierte Ausrüstung • Laserbasierte Anwendungen • Optische Kommunikation und Netzwerke • Leuchtmittel (O/LED) • Displays (LCD, plasma) • Optische Fasern • Optische Komponenten und Systeme • Photodetektoren 	<p>Technologien für die Bioökonomie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verwertung biologischer Daten • Umweltmanagement, biologische Systeme verstehen • Bioverfahrenstechnik/ Bioprosesstechnologien • Breeding and advanced/precision farming
<p>Internet of Things</p> <ul style="list-style-type: none"> • Breitbandtechnik (z.B. 5G, 4G, Wi-Fi) • Schmalbandtechnik (z.B. LoRa, Sigfox, NB-IoT) • Peer-to-peer-Technologien (z.B. Bluetooth, NFC) • Ortungstechnologien • Neue Sensortechnologien • Edge computing • Nahfeldkommunikation (NFC) 		<p>Robotik</p> <ul style="list-style-type: none"> • Industrieroboter • Kollaborative Roboter 	
<p>Digitale Mobilitätstechnologien</p> <ul style="list-style-type: none"> • Satellitenkommunikation • Verkehrsleittechnik • Funkortung 			
<p>Big Data</p> <ul style="list-style-type: none"> • Datenmanagement (Akquise, Extraktion und Integration) • Datenanalytik (prädiktive Analytik, In-Memory-Analytik, Netzwerkanalyse, etc.) • Text- & Data-Mining • Maschinelles Lernen 			
<p>Digitale Sicherheitstechnologien</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kryptographie • Angriffserkennungssysteme • Netzwerksicherheit 			

Quelle: eigene Darstellung

Anhang II - Methoden

Patentanalysen

Generelles

Patentanmeldungen und Patenterteilungen können als zentrale Output-Indikatoren für FuE-Prozesse angesehen werden (Freeman, 1982; Grupp, 1998). Sie erlauben damit eine Einschätzung über die technologische Leistungsfähigkeit einer Volkswirtschaft, insbesondere im Vergleich mit anderen Ländern. Um eine solche Vergleichbarkeit zu erreichen, wird an dieser Stelle zunächst das Konzept der transnationalen Patente angewendet. Transnationale Patente sind Patentfamilien mit mindestens einer Anmeldung am Europäischen Patentamt (EPA) oder über das "Patent Cooperation Treaty" (PCT) Verfahren bei der World Intellectual Property Organization (WIPO) (Frietsch and Schmoch, 2010).

Daten und Abgrenzungen

Als Datenbasis für die Patentanalysen dient die "EPO Worldwide Patent Statistical Database Patent Statistical Database" (PATSTAT), die Patentdaten für über 80 Patentämter und über 100 Länder weltweit zur Verfügung stellt.

Zur Abgrenzung der Schlüsseltechnologien innerhalb dieser Datenbank wird die Internationale Patentklassifikation (IPC) verwendet, in der Patente – unterschieden nach ihren technischen Implikationen – eingeordnet werden. Neben den IPC-Klassen finden in einigen Feldern auch Stichwortabgrenzungen bzw. Kombinationen von Klassen und Stichworten Anwendung.

Alle Patente werden nach dem Jahr ihrer weltweit ersten Anmeldung, dem sogenannten Prioritätsjahr, ausgewertet, da dieses das Datum ist, welches dem tatsächlichen Forschungsgeschehen am nächsten kommt. Weiterhin werden die vorliegenden Patentstatistiken basierend auf dem "Erfinderkonzept", d.h. dem Herkunftsland (bzw. Bundesland) des Erfinders, ausgewertet. Wie auch bei den Publikationen werden die Patente nach der sogenannten "whole-count"-Methode berechnet, d.h. jedes Patent wird allen auf dem Patent vorkommenden Institutionen/Unternehmen zugeordnet.

Indikatoren

Zur Einschätzung der technologischen Leistungsfähigkeit der Länder innerhalb der Schlüsseltechnologien werden neben der Analyse der Anzahl von Patentanmeldungen sowie deren Anteile weitere Indikatoren berechnet. Dazu gehören wie auch bei den Patenten die Spezialisierungen, d.h. analog zum Revealed Literature Advantage (RLA) wird der Revealed Patent Advantage (RPA) berechnet.

Bibliometrie/Publikationsanalysen

Generelles

Die Analyse wissenschaftlicher Publikationen erlaubt Einblicke in die wissenschaftliche Leistungsfähigkeit von Volkswirtschaften und spiegelt dabei wissenschaftliche Erkenntnisse insbesondere von Universitäten und Forschungsinstituten wider. Die überwiegende Mehrzahl der Publikationen stammt aus der öffentlichen Forschung, also von Universitäten, Fachhochschulen und anderen Forschungseinrichtungen. Unternehmen sind deutlich seltener an der Erstellung von wissenschaftlichen Publikationen beteiligt.

Die Bibliometrie, als Methode zur wissenschaftlichen Analyse und Messung von wissenschaftlichen Publikationen, nutzt Daten zu diesen Veröffentlichungen zur Bewertung der wissenschaftlichen Leistungsfähigkeit von Gruppen, Organisationen oder – wie im Falle der hier vorliegenden Studie – von Regionen und ganzen Volkswirtschaften. Publikationen sind nicht nur ein zentrales Mittel des wissenschaftlichen Diskurses, sondern auch ein wesentlicher Output von Universitäten und öffentlichen Forschungseinrichtungen, deren Hauptaufgabe es ist, Wissen zu generieren. Dieses Wissen wird in der Literatur dokumentiert. Mithilfe bibliometrischer Analysen können nicht nur Forschergruppen und Forschungsinstitute, sondern auch komplette Forschungssysteme analysiert und bewertet werden (Michels and Schmoch, 2012).

Daten und Abgrenzungen

Für die im Folgenden dargestellten Analysen wird die bibliometrische Datenbank Scopus des Anbieters Elsevier herangezogen, die neben dem Science Citation Index (SCI) die international am häufigsten verwendete Quelle für derartige Analysen darstellt. Der Vorteil von Scopus gegenüber dem SCI ist eine breitere Gesamtabdeckung und insbesondere eine höhere Abdeckung bei Ingenieurwissenschaften sowie bei europäischen und asiatischen Veröffentlichungen in Relation zu den nordamerikanischen Beiträgen (Michels and Schmoch, 2012). Die Datenbank umfasst Veröffentlichungen in mehr als 22.000 internationalen Zeitschriften sowie eine Vielzahl an Konferenzbeiträgen. Die Analysen beschränken sich auf die Zeitschriftenbeiträge (Article, Letter, Review und Note) und decken den Zeitraum von 2000-2019 ab.

Die Publikationen wurden nach der "whole-count"-Methode berechnet, das heißt jede Publikation wird allen auf der Publikation vorkommenden Institutionen ein Mal zugeordnet. Eine Aufteilung (Fraktionierung) einzelner Publikationen bspw. anhand der Anzahl der Institutionen, der beteiligten Länder oder der Autor:innen findet nicht statt. Neben den absoluten Zahlen werden Anteile der Länder an den weltweiten Publikationen im Zeitverlauf berechnet. Zur Abgrenzung der Schlüsseltechnologien innerhalb dieser Datenbank werden die Scopus-Klassen verwendet. Neben der Abgrenzung über Klassen finden in einigen Feldern auch Stichwortabgrenzungen bzw. Kombinationen von Klassen und Stichworten Anwendung.

Indikatoren

Zur weiteren Einschätzung der Entwicklungen in den Schlüsseltechnologien werden weitere Indikatoren auf Basis der Publikationsdatenbank berechnet. Beispielsweise werden das technologische Profil und die Schwerpunkte mithilfe der Spezialisierung dargestellt. Hierfür wird der Index der relativen Publikationsaktivität (RLA; Revealed Literature Advantage) berechnet.

Der RLA zeigt an, in welchen Bereichen ein Land im Vergleich zum gesamten weltweiten Publikationsaufkommen stark oder schwach vertreten ist. Er errechnet sich folgendermaßen:

$$RLA_{kj} = 100 * \tanh \ln [(P_{kj}/\sum_j P_{kj})/(\sum_k P_{kj}/\sum_k P_{kj})]$$

wobei P_{kj} für die Anzahl der Publikationen im Land k im Wissenschaftsfeld j steht. Positive Vorzeichen bedeuten, dass ein Wissenschaftsfeld ein höheres Gewicht innerhalb eines Landes als in der Welt einnimmt. Dementsprechend stellt ein negatives Vorzeichen eine unterdurchschnittliche Spezialisierung dar. Durch den RLA wird es somit möglich, die relative Position der Wissenschaftsfelder innerhalb des Wissenschafts-Portfolios eines Landes, und darüber hinaus dessen internationale Position ungeachtet von Größenunterschieden abzubilden (Frietsch, 2007).

Streuung der Schlüsseltechnologien über Technologiefelder

Eine Analyse der Streuung von Schlüsseltechnologiepateuten über Technologiefelder zielt darauf ab, die technologische Spezifität einzelner Technologien sowie deren Entwicklung über die Zeit zu dokumentieren. "Technologische Spezifität" als Konzept macht dabei deutlich, ob sich Schlüsseltechnologiepateute auf ein bestimmtes, klar definiertes Technologiefeld beschränken oder eher breit über die Technologiefelder streuen. Knapp zusammengefasst macht sie deutlich, ob es sich bei der Bezeichnung einer Schlüsseltechnologie um die präzise Bezeichnung einer Technologie oder doch eher um einen Oberbegriff handelt. In ihrer Entwicklung über die Zeit macht sie deutlich, ob erfinderische Aktivitäten in einem bestimmten Technologiefeld im Rahmen von dessen weiterer Entwicklung beginnen, Aspekte aus anderen Technologiefeldern zu integrieren oder sich stattdessen, zunehmend auf einen spezifischen Bereich konzentrieren. Zur Abgrenzung der Technologiefelder wurden dabei die 35 Klassen der WIPO-Klassifikation herangezogen (Schmoch, 2008).

Zur Zuweisung von Patenten zu spezifischen Schlüsseltechnologien wurden verschiedene Strategien verwendet, die zur Operationalisierung teils auf ausgewählte Schlüsselbegriffe, teils auf detaillierte Listen von IPC-Klassen zurückgreifen. Im ersten Fall ist das offensichtliche Ziel der Analyse zu dokumentieren, in welchen klassischen Technologiebereichen, auf deren Grundlage das IPC-System basiert, Patente angemeldet werden, die bestimmte Stichworte enthalten. Im zweiten Fall ist eine solche Analyse ebenfalls sinnvoll, da Patentanmeldungen in aller Regel mehr als einer IPC-Klasse zugewiesen sind, von denen regelhaft nur ein Teil der Suchstrategie selbst zugehörig ist. Eine Analyse der technologischen Breite macht in diesem Fall deutlich, welchen zusätzlichen Technologiebereichen jene Patente zugeordnet werden, die sich als Schlüsseltechnologiepateute

identifizieren lassen. Ko-Klassifikationen können dabei sowohl Hinweise auf komplementär erforderliche Komponenten als auch auf unterschiedliche, alternative Anwendungszusammenhänge geben.

Als Messgröße für Streuung wird der normalisierte Herfindahl-Index verwendet, der bei perfekter Konzentration den Wert 1 und bei perfekter Gleichverteilung den Wert 0 annimmt. In Teilen wird zu Darstellungszwecken auch das Maß 1- Herfindahl-Index verwendet, um einen Indikator zu erhalten, der bei stärkerer Streuung höher ist. Berechnet wird die Streuung auf Basis der Verteilung der entsprechenden Patentanmeldungen über IPC 4-Steller-Klassen.

Streuung der Schlüsseltechnologien über Sektoren

Eine Analyse der Streuung von Schlüsseltechnologiepatenten über Sektoren/WZ-Klassen zielt darauf ab, zu dokumentieren, ob Erfindungen im Bereich einer Schlüsseltechnologie überwiegen von einer spezifischen, dedizierten Industrie entwickelt werden oder ob sie bereits in der Breite aus den Entwicklungstätigkeiten verschiedenster Sektoren hervorgehen. Dies ist v.a. daher von Bedeutung, da sich die mit Blick auf Schlüsseltechnologien oft zitierte "breite Nutzung" im Regelfall nicht nur ausschließlich einem Kauf entsprechender Technologien, sondern auch aus ihrer integralen Einbeziehung in eigene Entwicklungsaktivitäten ergibt. Vor allem, wenn eine Technologie breit in die Entwicklungsaktivitäten verschiedener Sektoren eingebettet ist, kann von einem genuinen Schlüsseltechnologiecharakter im Sinne einer "general purpose technology" gesprochen werden. Zentral ist bei der Einordnung dieser Betrachtung allerdings, dass sie eben nicht pauschal die Breite der Nutzung bestimmter Technologien an sich, sondern nur die aktuellen Ausgangspunkte ihrer Entwicklung in verschiedenen Industriesektoren abbildet.

Die Zuweisung von Patenten zu bestimmten Sektoren, die in Patentdatenbanken nicht an sich vorliegt, erfolgt über einen Match der in EPO PATSTAT geführten Anmeldernamen mit Informationen aus der BvD ORBIS Unternehmensdatenbank. Auf Grundlage dieses groß angelegten, auf Levensthein Ähnlichkeit basierenden, Matches lässt sich jedem Patent die NACE-Klasse des jeweils anmeldenden Unternehmens zuordnen. Hierbei wird, auf Grundlage verschiedener, detaillierter Prüfverfahren, für aus analytischen Gründen nicht zielführende NACE-Klassifizierungen (z.B. von Holdings oder Rechteverwaltungsgesellschaften) korrigiert. Diese werden sowohl fallbasiert als auch systematisch durch andere Klassen ersetzt, die die Verortung des Hauptunternehmens in geeigneter Weise wiedergeben. Dies geschieht unter anderem durch die Aggregation unterschiedlicher rechtlicher Entitäten eines Unternehmens auf Seiten der ORBIS Datenbank sowie der Aggregation verschiedener Schreibweisen auf Seiten der EPO PATSTAT Datenbank ("Leuven-Register").

Als Messgröße für Streuung wird der normalisierte Herfindahl-Index verwendet, der bei perfekter Konzentration den Wert 1 und bei perfekter Gleichverteilung den Wert 0 annimmt. In Teilen wird

zu Darstellungszwecken auch das Maß 1- Herfindahl-Index verwendet, um einen Indikator zu erhalten, der bei stärkerer Streuung höher ist. Berechnet wird die Streuung auf Basis der Verteilung der entsprechenden Patentanmeldungen über WZ 4-Steller-Klassen.

Handelsdaten/Analysen von Exporten und Importen

Theoretische Motivation

Die Relevanz von Exporten für intra-sektorale Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit von nationalen Industrien ist sowohl theoretisch (Melitz, 2003) und spätestens seit dem Aufstieg Chinas, Südkoreas und anderer ostasiatischer Staaten und deren exportgeführten Wachstumsstrategien (export-led growth) auch vielfach empirisch belegt²² (Jie Yang, 2008; Shan and Sun, 1998; Siliverstovs and Herzer, 2006). Im Rahmen dieser Studie können die Exportmarktanteile der Länder eine Indikation über die internationale Wettbewerbsfähigkeit und Produktivität der lokalen Fertigungsindustrie in den jeweiligen Technologiebereichen und Schlüsseltechnologien geben.

Ein weiterer Grund für die Relevanz von Exporten in Schlüsseltechnologien ist deren Zusammenhang mit wirtschaftlicher Diversifikation. Forschungen aus dem Feld der ökonomischen Komplexität zeigen einen klaren Zusammenhang zwischen Exportdiversifikation und Wirtschaftswachstum (Hausmann et al., 2014). Um das Maß an Exportdiversifizierung sowie die relative Häufigkeit der exportierten Güter zu messen, wurde hierfür von der Forschergruppe um den Harvard-Ökonomen Ricardo Hausmann der sog. *Economic Complexity Index* (ECI) entwickelt. Der ECI ist ein Maß für die Komplexität einer Volkswirtschaft basierend auf der Diversität seiner Exporte und der Ubiquität (Häufigkeit) der exportierten Güter (für Details zur Berechnung siehe Methodenanhang). Der ECI korreliert wiederum stark mit Wirtschaftswachstum (Hausmann et al., 2014).

Neueste Erkenntnisse aus der Wirtschaftsgeographie legen nahe, dass technologische und produktive Kapazitäten in Schlüsseltechnologien (KET) in besonderem Maße zur wirtschaftlichen Diversifikation beitragen (Balland et al., 2019) und auch positiv mit Wirtschaftswachstum assoziiert sind (Evangelista et al., 2018). Zudem bestätigen Studien auch den Verbindungscharakter der Schlüsseltechnologien: Während ökonomische Diversifikation meist in ähnlichen und sich angrenzenden Wirtschaftssektoren passiert (Hidalgo et al., 2007), erleichtern Schlüsseltechnologien auch die Entstehung neuer ökonomischer Aktivitäten in entfernteren Wirtschaftssektoren (Montresor and Quatraro, 2017).

Aufgrund des Mangels an themenspezifischen Daten zum Dienstleistungshandel beschränken sich die Analysen dieses Berichts auf den Güterhandel. Hierfür wurden die Daten der UN Comtrade

²² Viele Studien finden eine klare Assoziation zwischen beiden Faktoren, aber aufgrund von Endogenitäten sind die Ergebnisse nicht immer von kausaler Natur. Eine Studie des IWF (Jie Yang 2008) findet für 37 von 71 Episoden eine kausale Beziehung von Exporten auf ökonomischen Output.

Datenbank verwendet, die vom französischen Forschungsinstitut CEPII auf Grundlage eines Abgleichs der von Exporteuren und Importeuren berichteten Daten bereinigt werden (Gaulier and Zignago, 2010).

Operationalisierung

Die Handelsdaten wurden den dreizehn hier betrachteten Technologien auf Grundlage eines Embeddedness-Ansatzes zugeordnet, d.h. es wurden jene sechsstelligen HS-Güterklassen (HS 2007) ausgewählt, die für mit den jeweiligen Technologien in Verbindung stehende Produkte von besonderer Relevanz sind. Die Definitionen lehnen sich dabei mehrheitlich an die für das Advanced Technologies for Industry bzw. KETs Observatory entwickelten und in diesem Rahmen seit einigen Jahren etablierten Definitionen an (EU Commission, 2020). Für die Definition der Technologien im Bereich Bio- und Lebenswissenschaften wurden die Patentcodes gemäß einer Konkordanz-Tabelle zwischen HS- und IPC-Codes zugeordnet und anschließend manuell um inhaltliche, offenkundig nicht oder nur anteilig relevante Bereiche bereinigt. Da verschiedene Güter insbesondere im digitalen Bereich kaum eindeutig einer einzelnen Technologie zuzuordnen ist, lassen sich in vielen Bereichen keine eindeutigen Abgrenzungen treffen und HS-Codes werden mehrfach zugeordnet (z.B. setzen Anwendungen in den Bereichen Künstliche Intelligenz und Big Data hardwareseitig auf in hohem Maße identischen Infrastrukturen auf).

Indikatoren

Für Abbildung 20 wurden die Daten des Economic Complexity-Index des Center for International Development (CID) der Harvard Universität verwendet (Hausmann et al., 2014). Der Economic Complexity-Index ist eine Metrik, die die Diversität und Ubiquität der Exporte eines Landes widerspiegelt. Hierzu werden zunächst die komparativen Vorteile eines Landes in einer bestimmten HS-Produktklasse berechnet, gemäß der ursprünglichen Formel (Balassa, 1965) : für Produkt p und Land c :

$$RCA_{cp} = \frac{X_{cp}}{\sum_c X_{cp}} / \frac{\sum_p X_{cp}}{\sum_{c,p} X_{cp}}$$

Anschließend wird für alle Produkt-Land-Kombinationen eine Matrix gebildet, indem eine Kombination M mit einer $RCA \geq 1$ den Wert 1 erhält und eine Kombination mit $RCA < 1$ den Wert 0. Daraufhin werden die durchschnittliche Diversität (wie viele Produkte exportiert Land C mit einer $RCA > 1$) und die durchschnittliche Ubiquität (wie viele Länder exportieren Produkt p mit einer $RCA > 1$) errechnet.

$$Diversity = k_{c,0} = \sum_p M_{cp}$$

$$Ubiquity = k_{p,0} = \sum_c M_{cp}$$

Schlussendlich wird folgende Matrix gebildet:

$$\widetilde{M}_{cc'} = \sum_p \frac{M_{cp} M_{c'p}}{k_{c,0} k_{p,0}}$$

Der ECI ist schließlich der zweitgrößte Eigenwert des Eigenvektor \vec{K} der Matrix $\sim M_{cc'}$ und wird durch die Subtraktion des Durchschnitts $\langle \vec{K} \rangle$ und die Division durch die Standardabweichung normalisiert:

$$ECI = \frac{\vec{K} - \langle \vec{K} \rangle}{\text{stdev}(\vec{K})}$$

Hirschman-Herfindahl-Index:

Für die Analysen zur Marktkonzentration im Handel wird der sog. "Hirschman-Herfindahl-Index (HHI)" verwendet (Hirschman, 1964). Der HHI ist die Summe aller quadrierten Marktanteile s_i der Marktteilnehmer i .

$$H = \sum_{i=1}^N s_i^2$$

Bei maximaler Konzentration (Monopol) beträgt der HHI somit den Wert $100^2 = 10.000$.

Aussagekraft und Limitationen von Handelsdatenanalysen

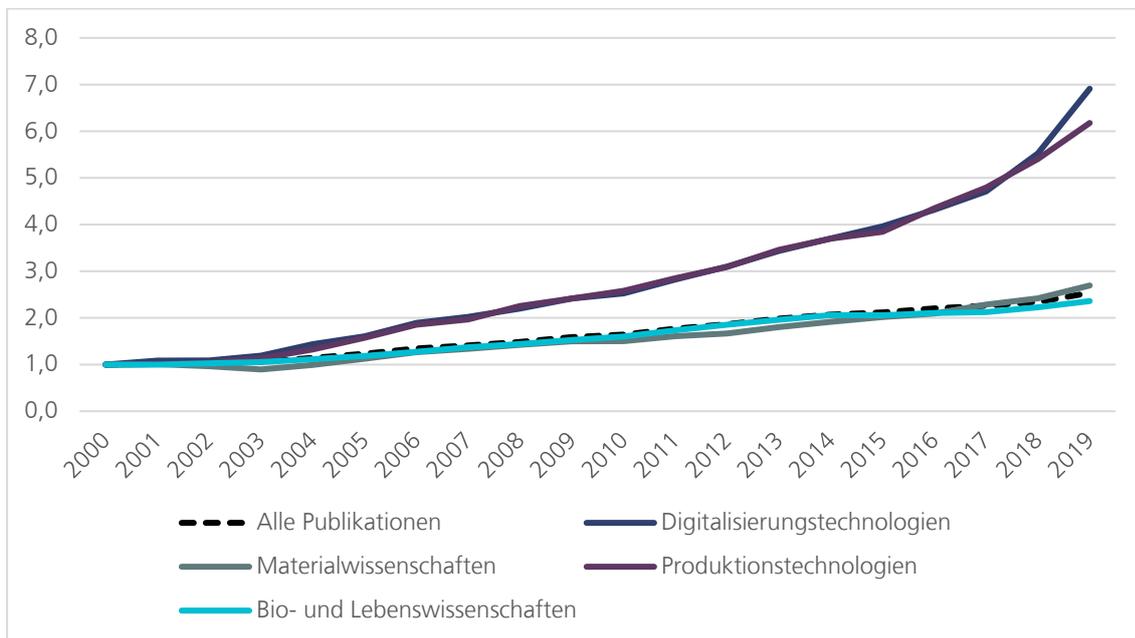
Grundlegend ist anzumerken, dass Handelsdaten schon definatorisch nur einen indirekten Bezug zu technologischen Fragestellungen aufweisen können, da sie nach Gütern, nicht aber nach Technologien differenziert erfasst werden. Zwar lassen sich zwischen diesen beiden Perspektiven teils enge Bezüge herstellen, dennoch wird nicht "mit Technologien gehandelt", sondern diese bestenfalls eingebettet in bestimmte Produkte weitergegeben bzw. aus dem Ausland bezogen. Wie einleitend dargestellt, belegen hohe Exportzahlen direkt lediglich die Wettbewerbsfähigkeit bestimmter Sektoren, nicht aber, ob diese auf FuE-Kompetenzen oder etwa auf Lohnkostenvorteilen beruht. Da der globale Handel von Unternehmen dominiert wird (Hui, 2020), welche die Endmontage von Hightech-Produktion oft auch aus Kostengründen verlagern, spiegeln Handelsdaten vor allem die Verortung von Produktionskapazitäten wider, nicht aber per se die technologischen Kompetenzen eines Landes.

Zudem ist zu beachten, dass die Daten lediglich den Herkunftsort der exportierten Güter widerspiegeln, konkreter, den Ort ihrer Erfassung am Zoll. Aussagen über die Eignerstruktur der beteiligten Unternehmen bzw. die Frage, welche konkrete Verknüpfung mit nationalen FuE-Kompetenzen besteht, lassen sich auf dieser Grundlage nicht treffen. Aufgrund der ausgeprägten konzerninternen Arbeitsteilung in multinationalen Unternehmen unterscheiden sich Entwicklungs- und Produktionsstandorte teils erheblich.

Hinzu kommen Verzerrungen dort, wo kleinere Länder als Umschlagstandorte fungieren (z.B. Singapur, aber auch die Niederlande) oder in starkem Umfang Re-Exporte stattfinden. Konzeptuell ist daher neben der Betrachtung der Exportzahlen stets auch eine Betrachtung der Handelsbilanzen eines bestimmten Landes erforderlich.

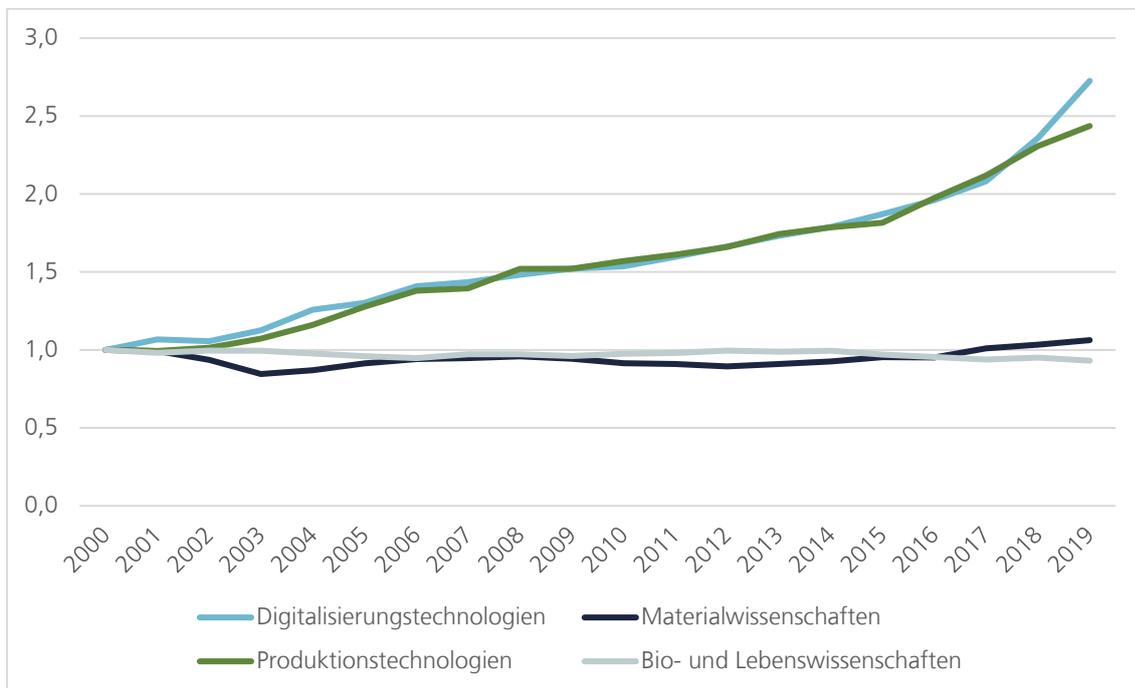
Anhang III - Detaillierte Ergebnisse, Publikations-, Patentanalysen

Abbildung A1: Haupttrends Publikationen (2000=1,00)



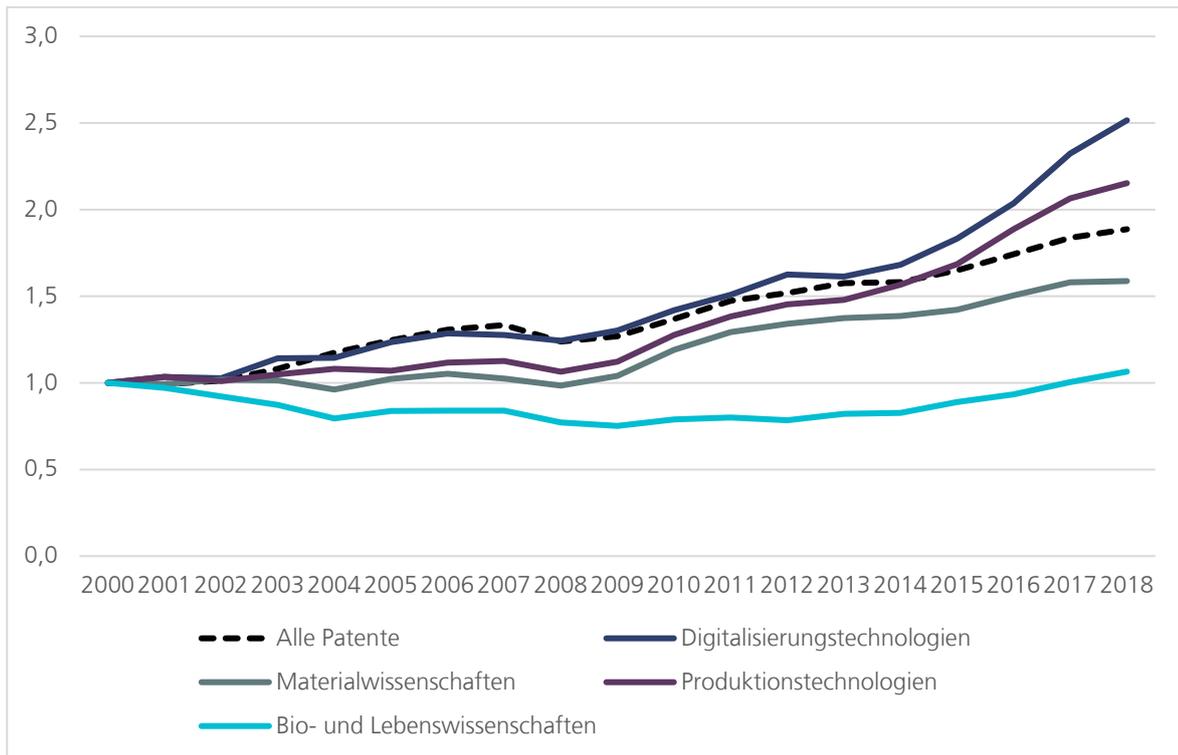
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A2: Haupttrends Publikationen relativ zum Welttrend



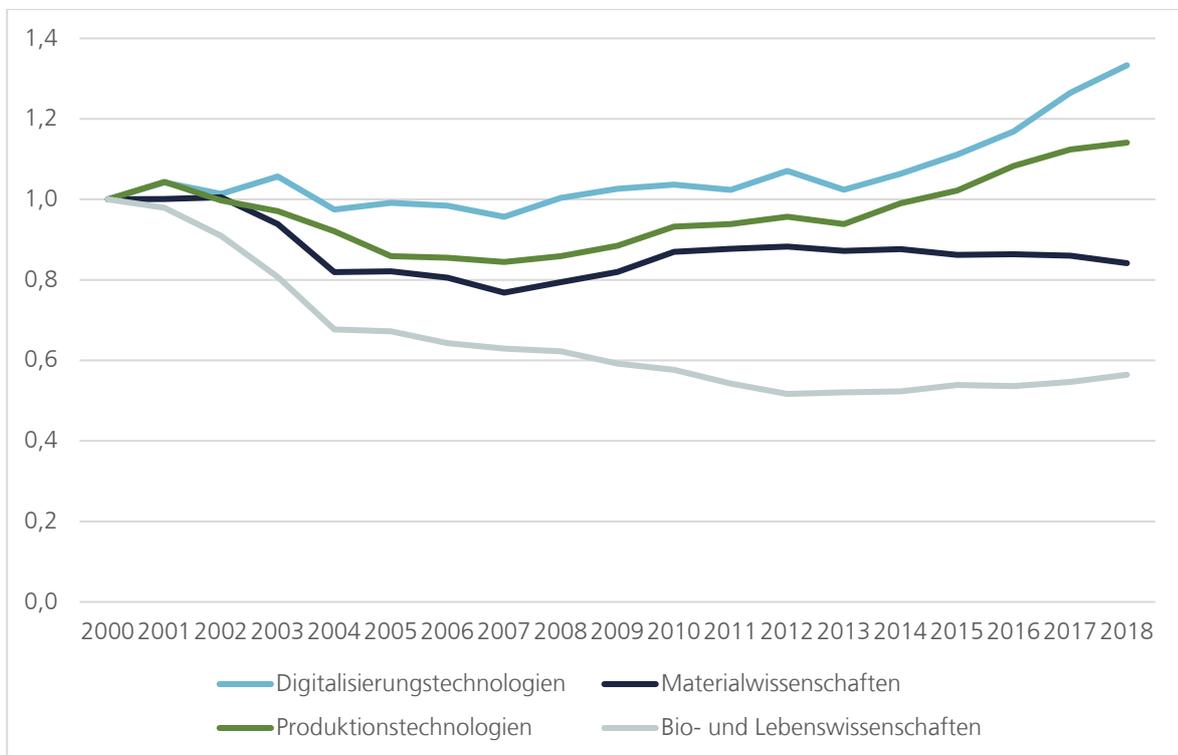
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A3: Haupttrends Patentanmeldungen (2000 = 1,00)



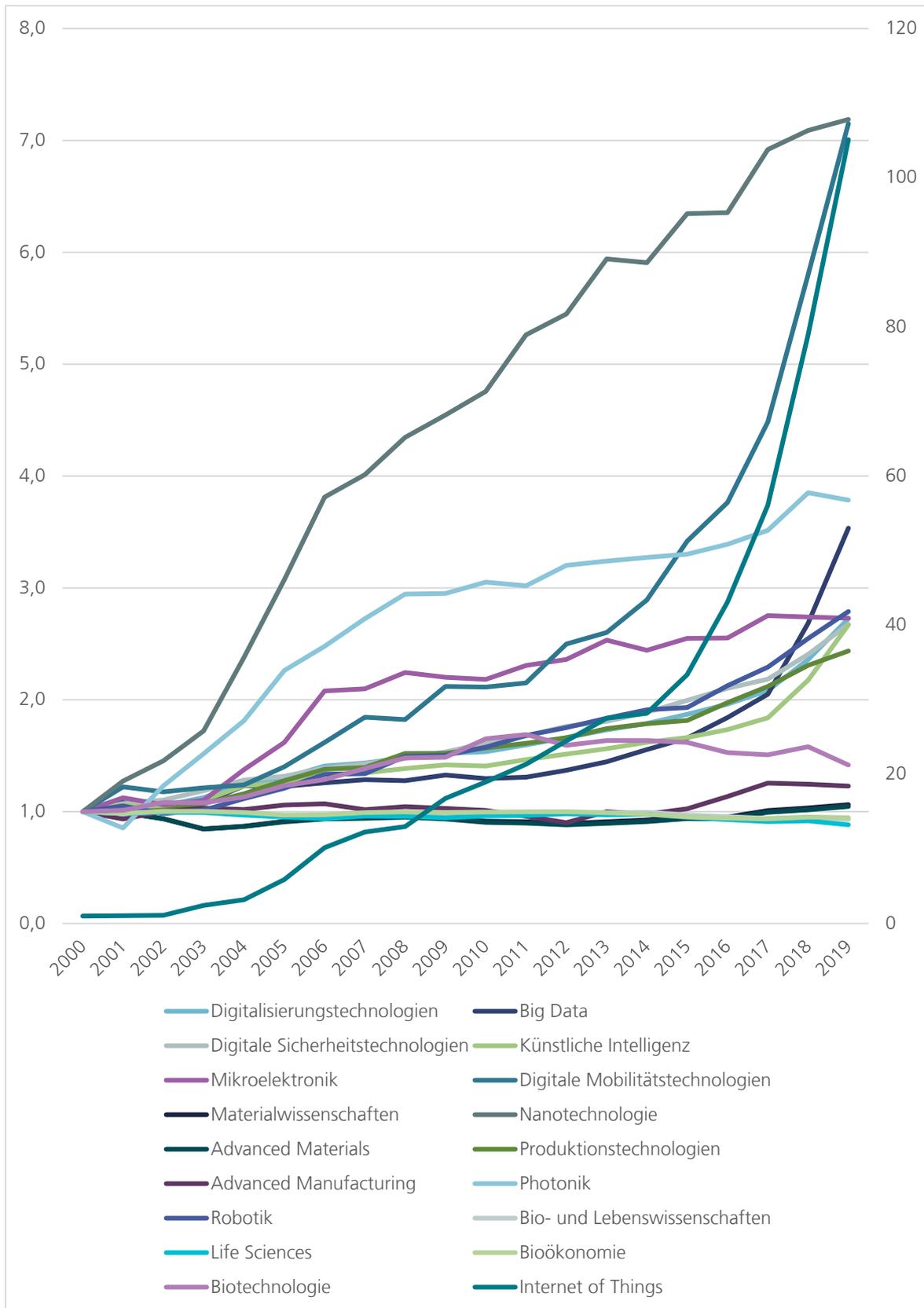
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A4: Haupttrends Patentanmeldungen relativ zum Welttrend



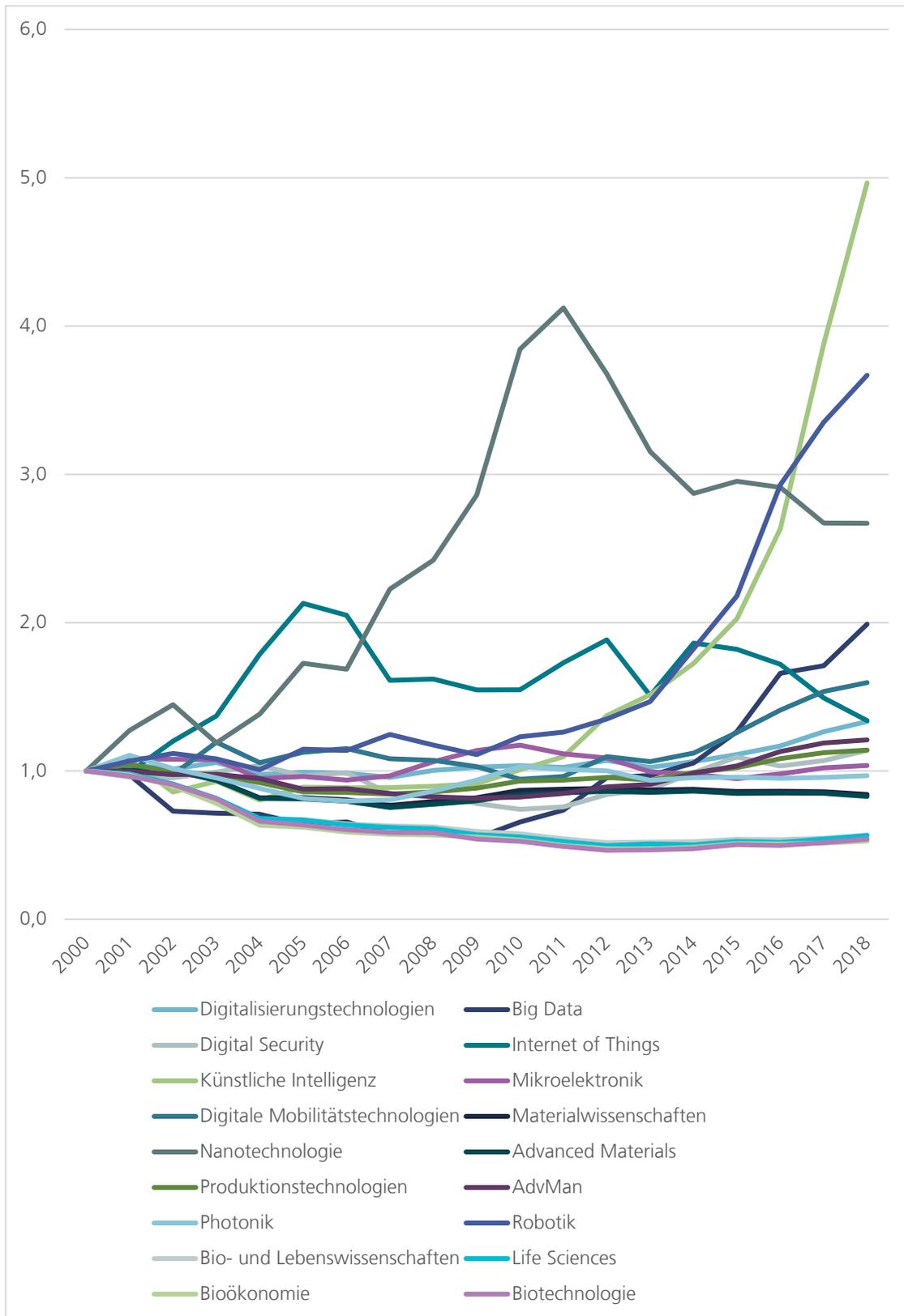
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A5: Detailtrends Publikationen (2000 = 1,00)



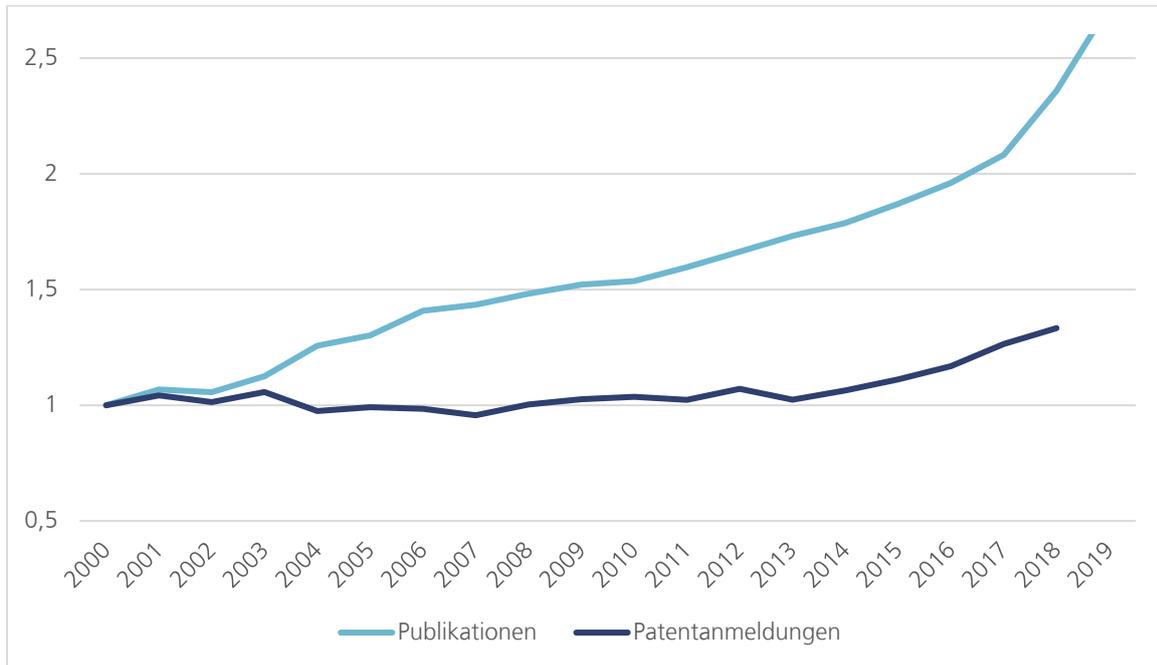
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A6: Detailtrends Patentanmeldungen (2000 = 1,00)



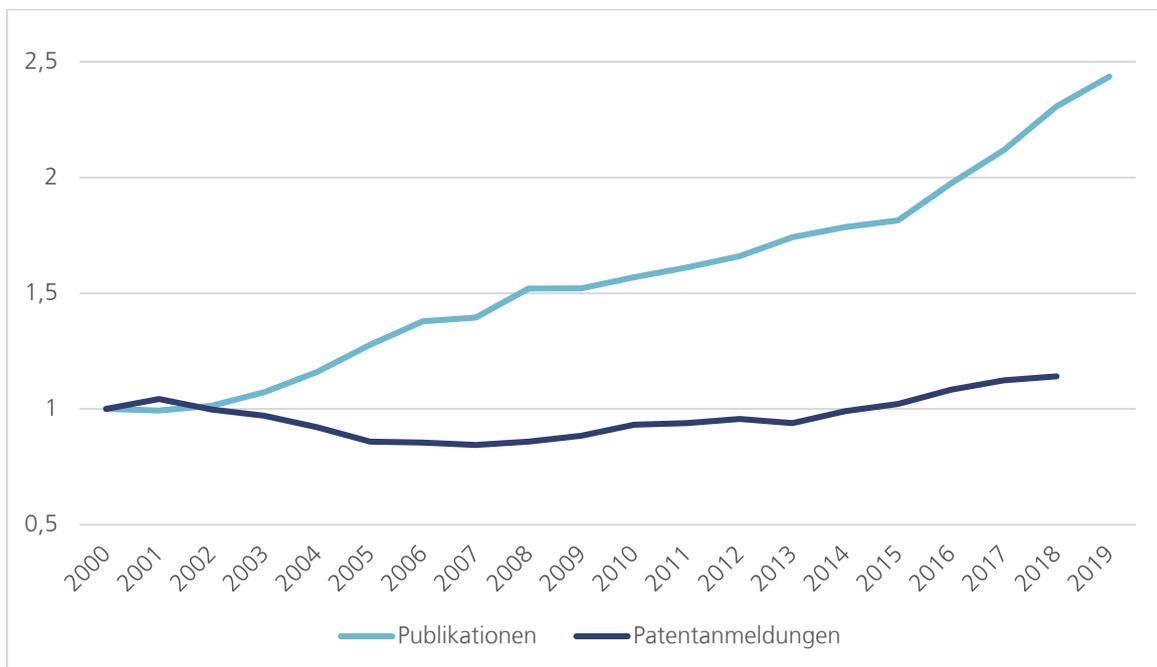
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A7: Entwicklungen relativ zum Welttrend Digitalisierung (2000 = 1,00)



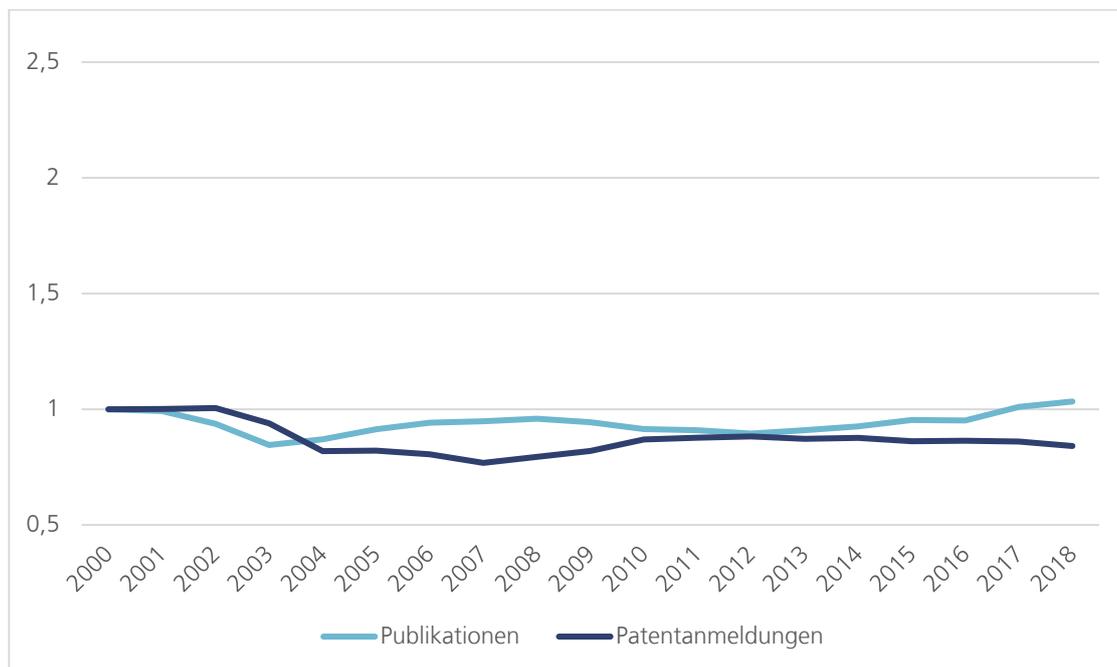
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, Basis: EPO PATSTAT/Elsevier SCOPUS

Abbildung A8: Entwicklungen relativ zum Welttrend Produktionstechnologien (2000 = 1,00)



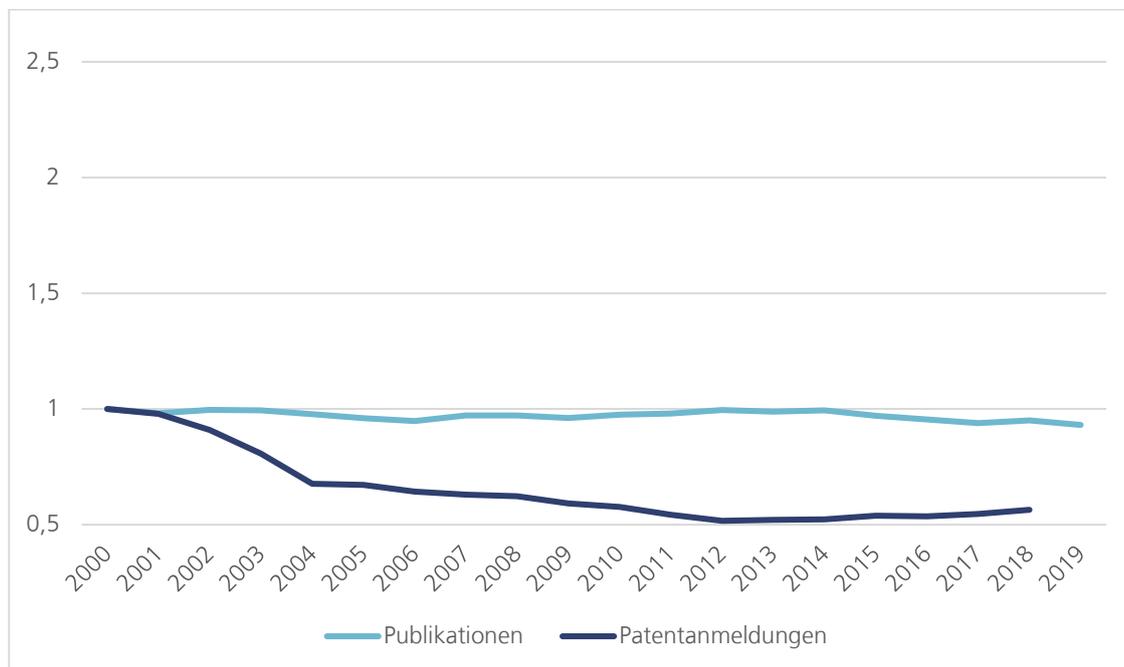
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, Basis: EPO PATSTAT/Elsevier SCOPUS

Abbildung A9: Entwicklungen relativ zum Welttrend Materialwissenschaften (2000 = 1,00)



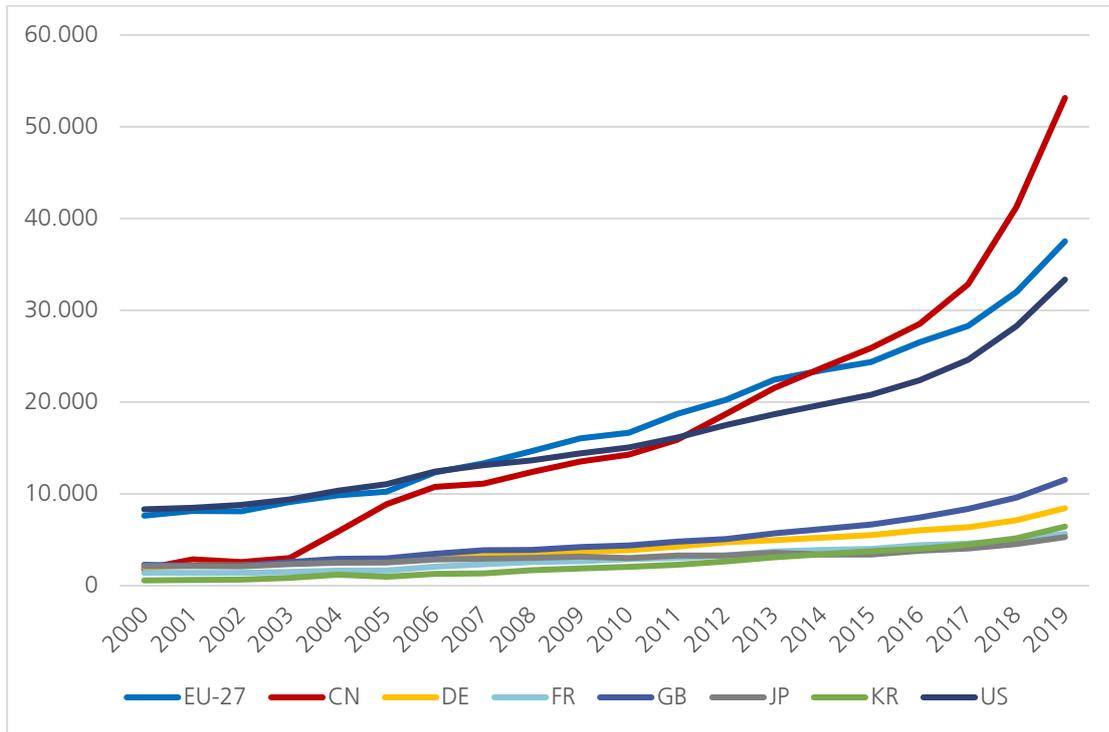
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, Basis: EPO PATSTAT/Elsevier SCOPUS

Abbildung A10: Entwicklungen relativ zum Welttrend Bio- /Lebenswissenschaften (2000 = 1,00)



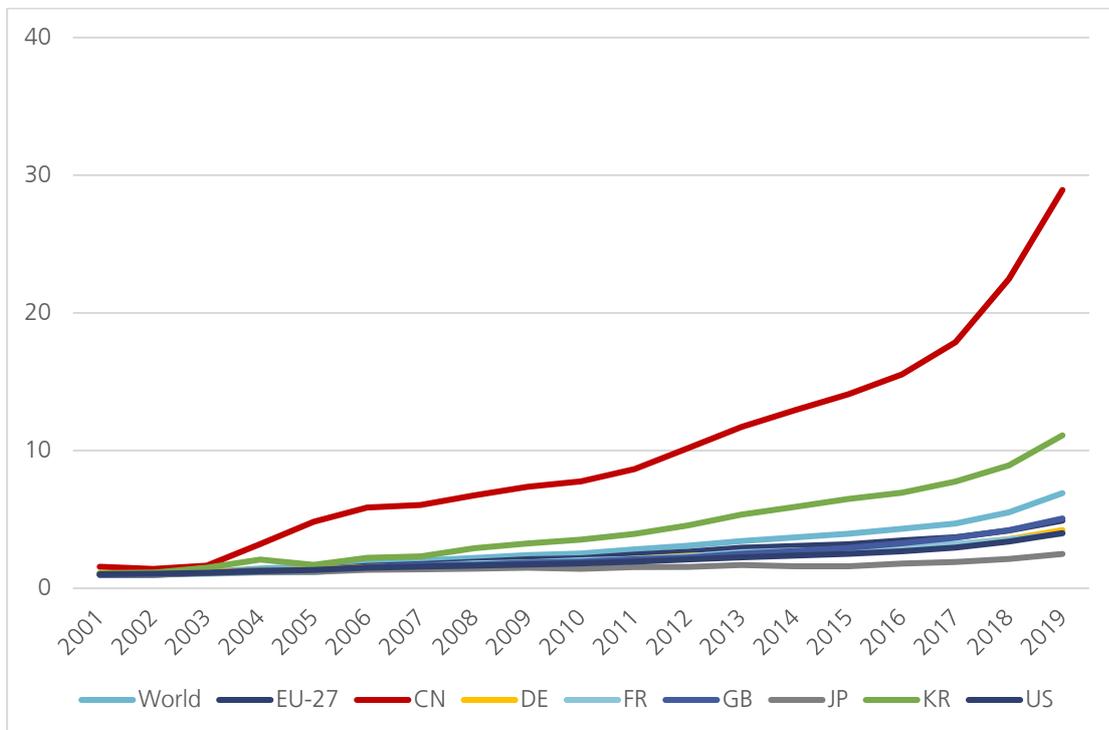
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, Basis: EPO PATSTAT/Elsevier SCOPUS

Abbildung A11: Internationales Publikationsaufkommen Digitalisierungstechnologien



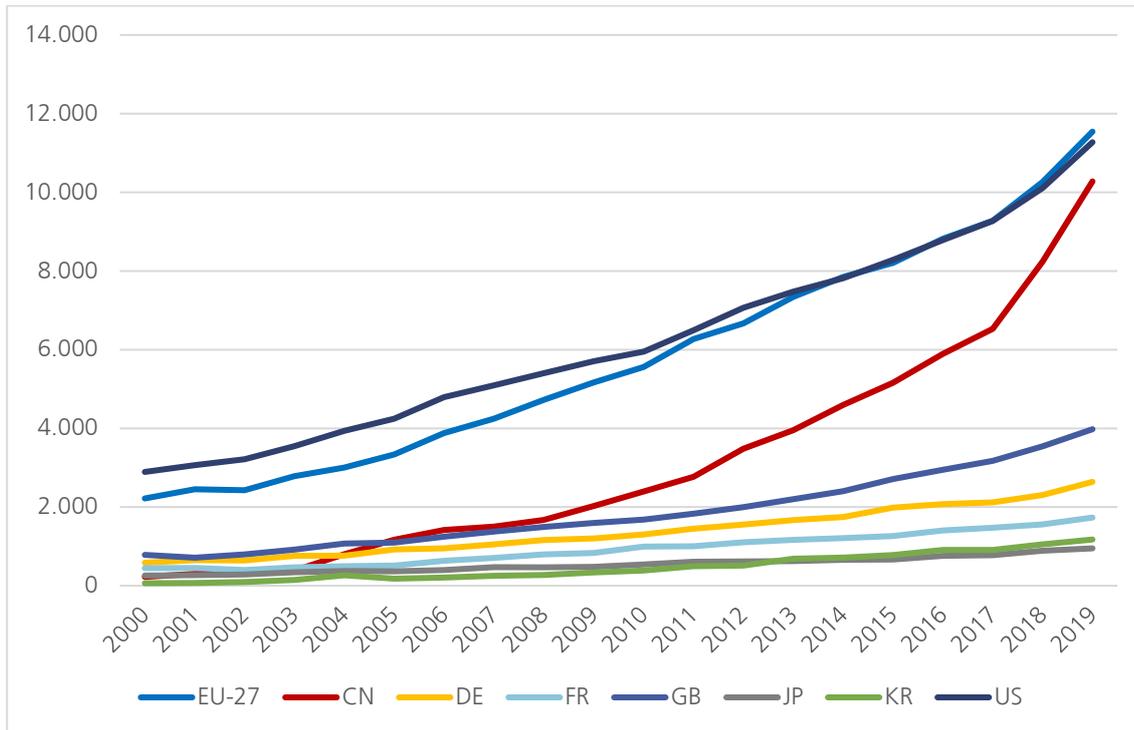
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A12: Internationale Publikationstrends Digitalisierungstechnologien



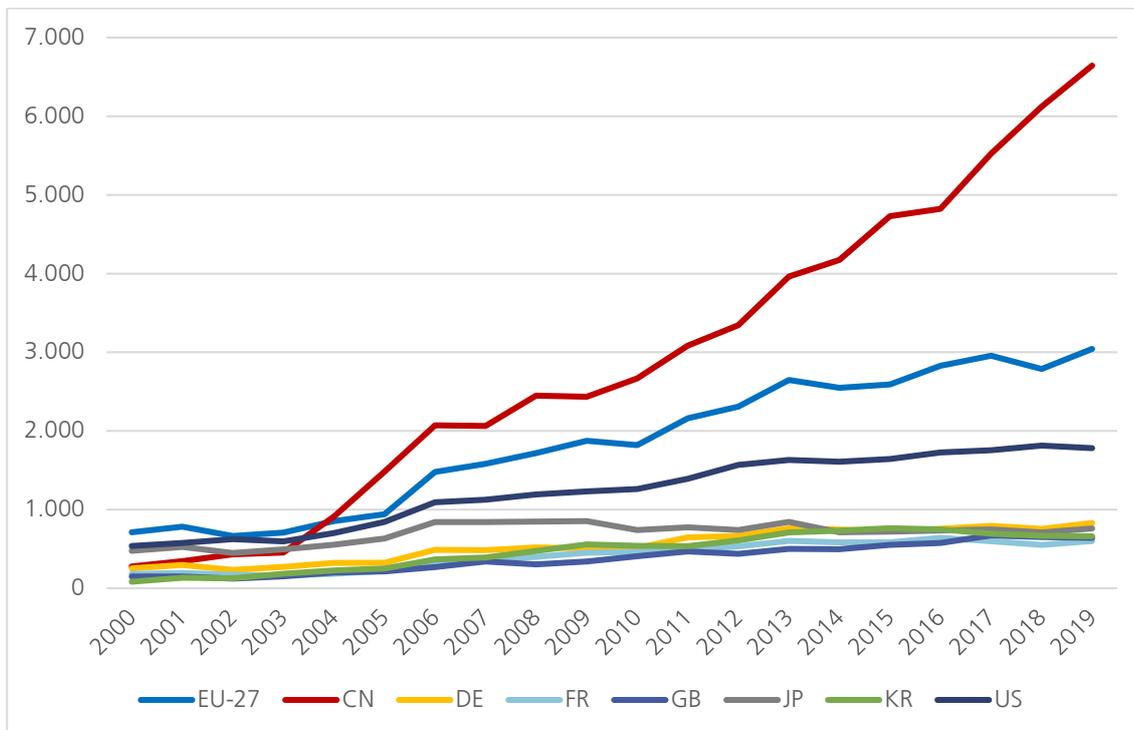
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A13: Internationales Publikationsaufkommen - Digitale Sicherheitstechnologien



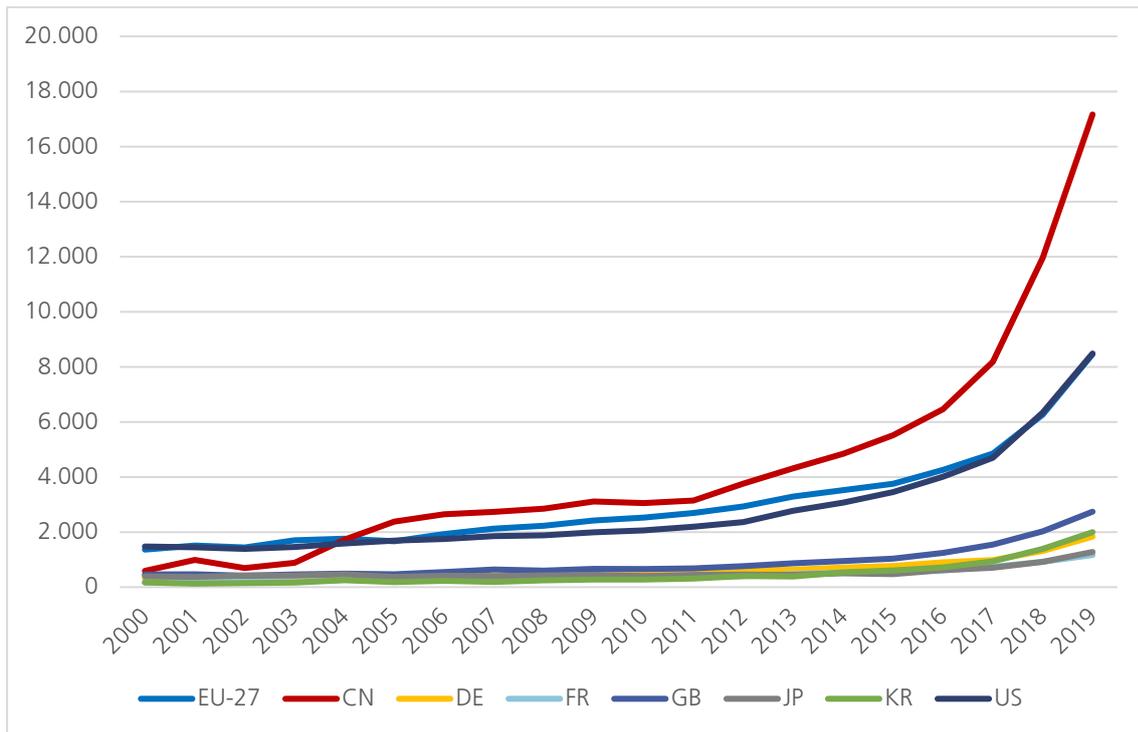
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A14: Internationales Publikationsaufkommen - Mikroelektronik



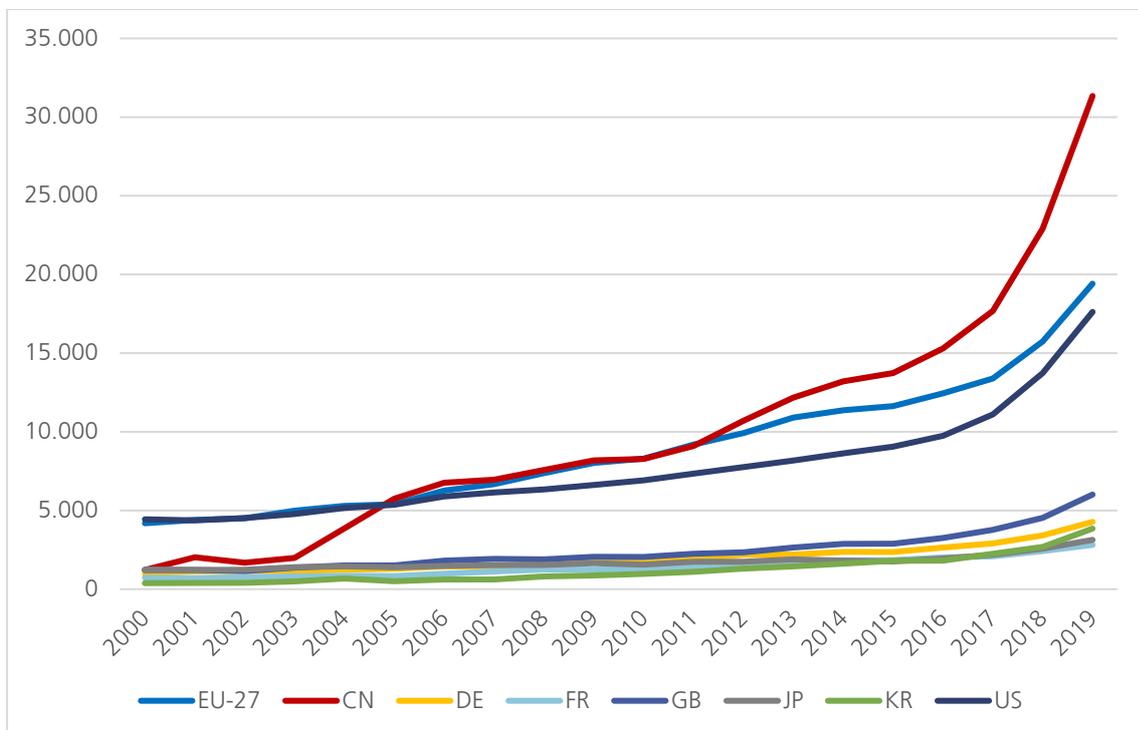
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A15: Internationales Publikationsaufkommen - Big Data



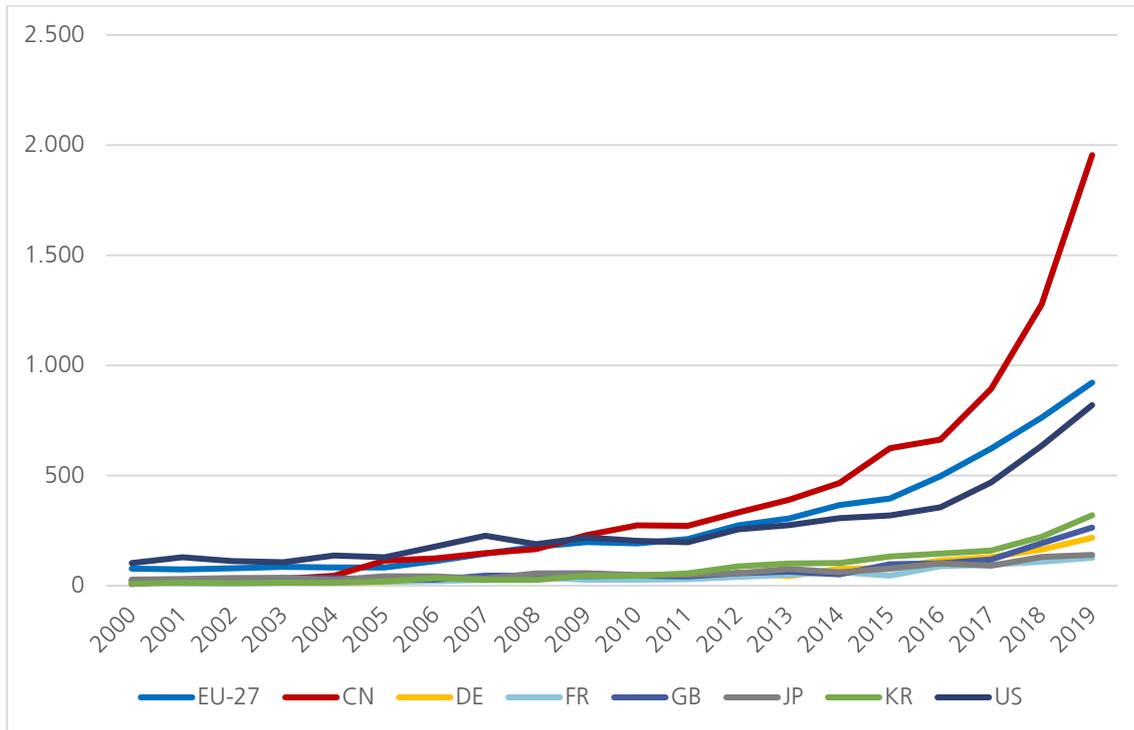
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A16: Internationales Publikationsaufkommen - Künstliche Intelligenz



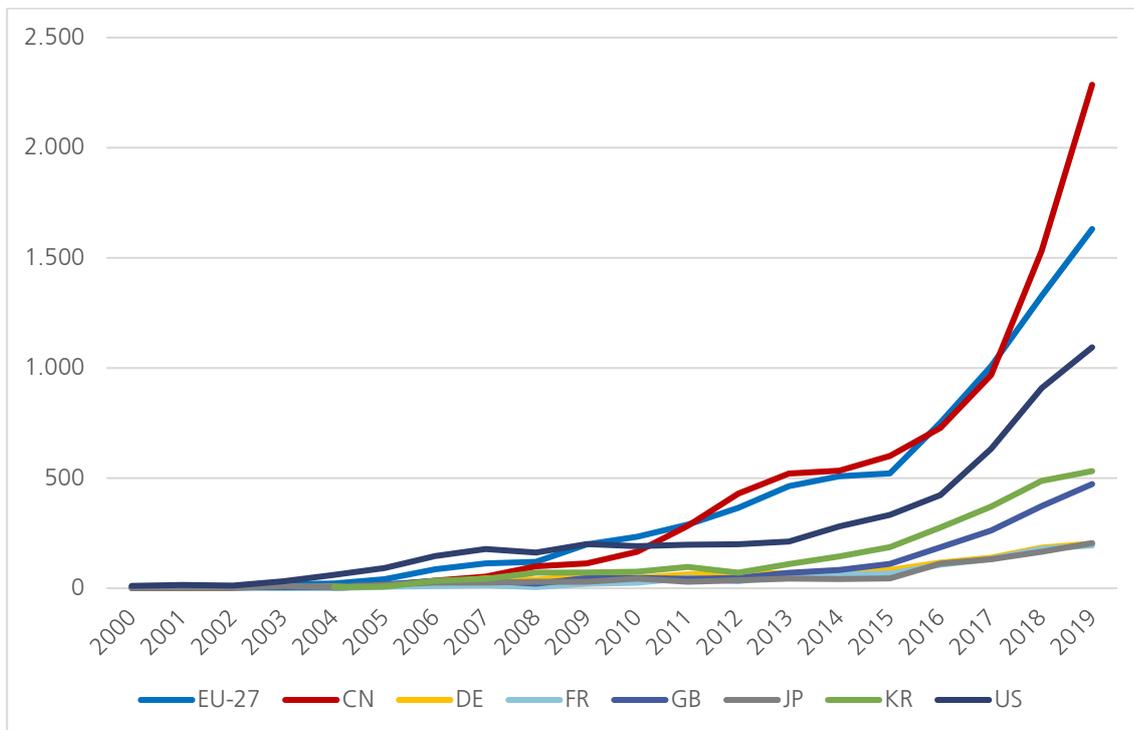
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A17: Internationales Publikationsaufkommen - Digitale Mobilitätstechnologien



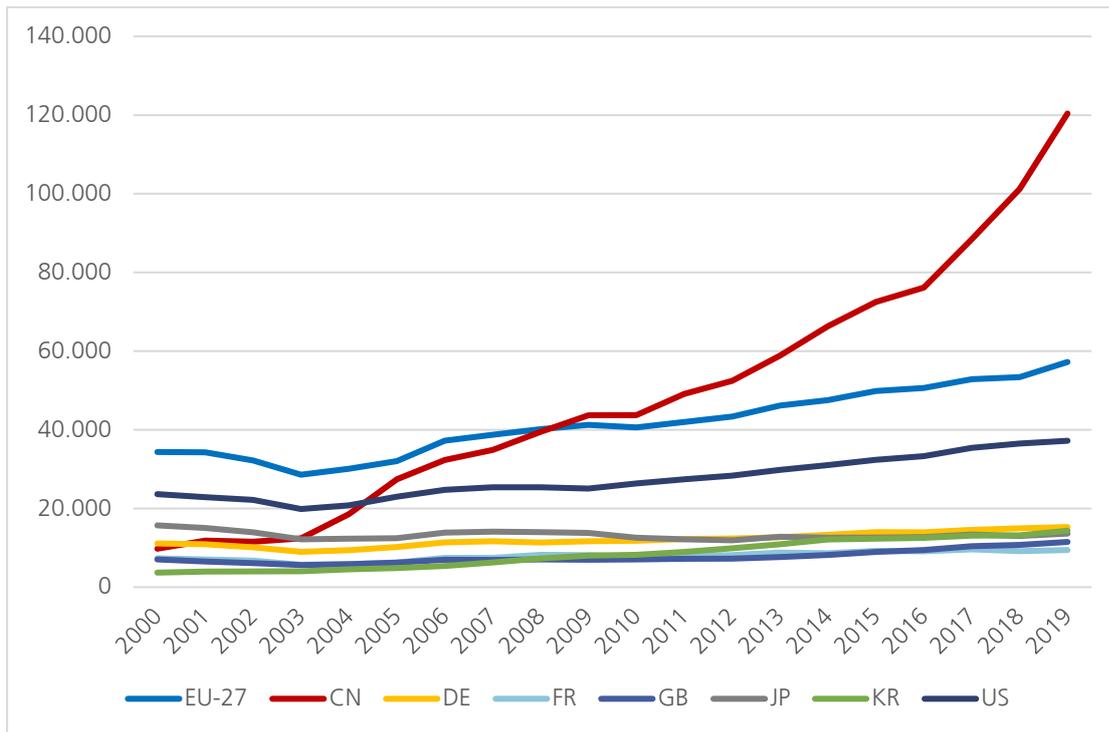
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A18: Internationales Publikationsaufkommen - Internet of Things



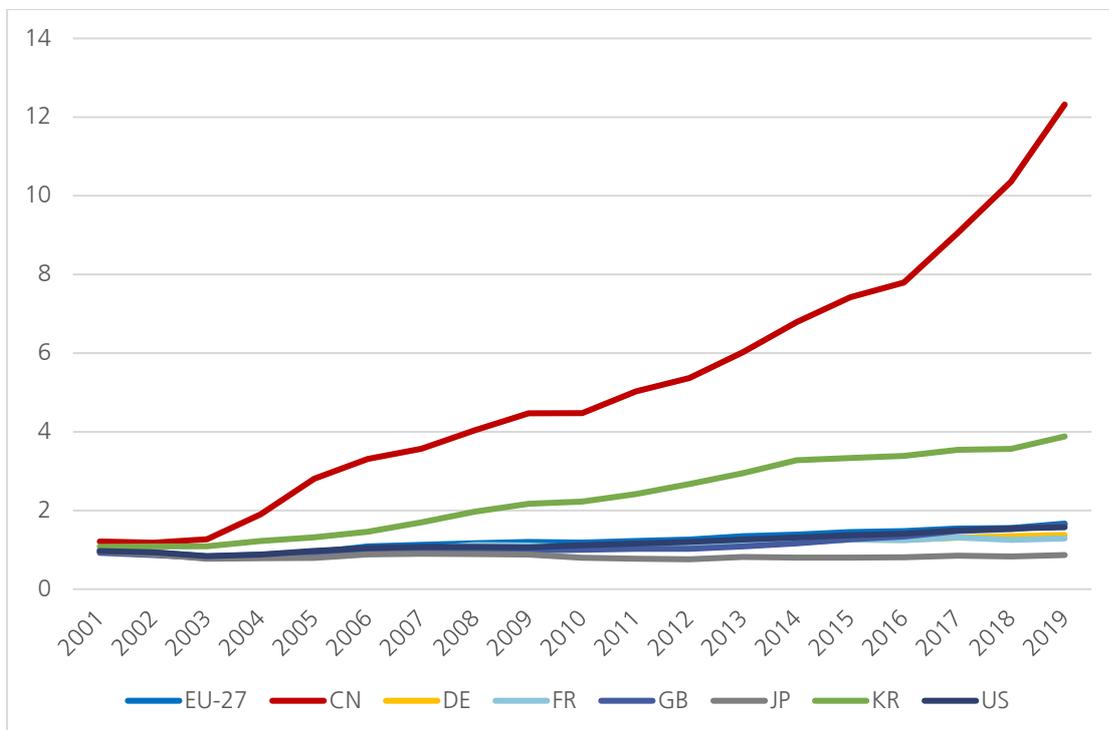
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A19: Internationales Publikationsaufkommen - Materialtechnologien



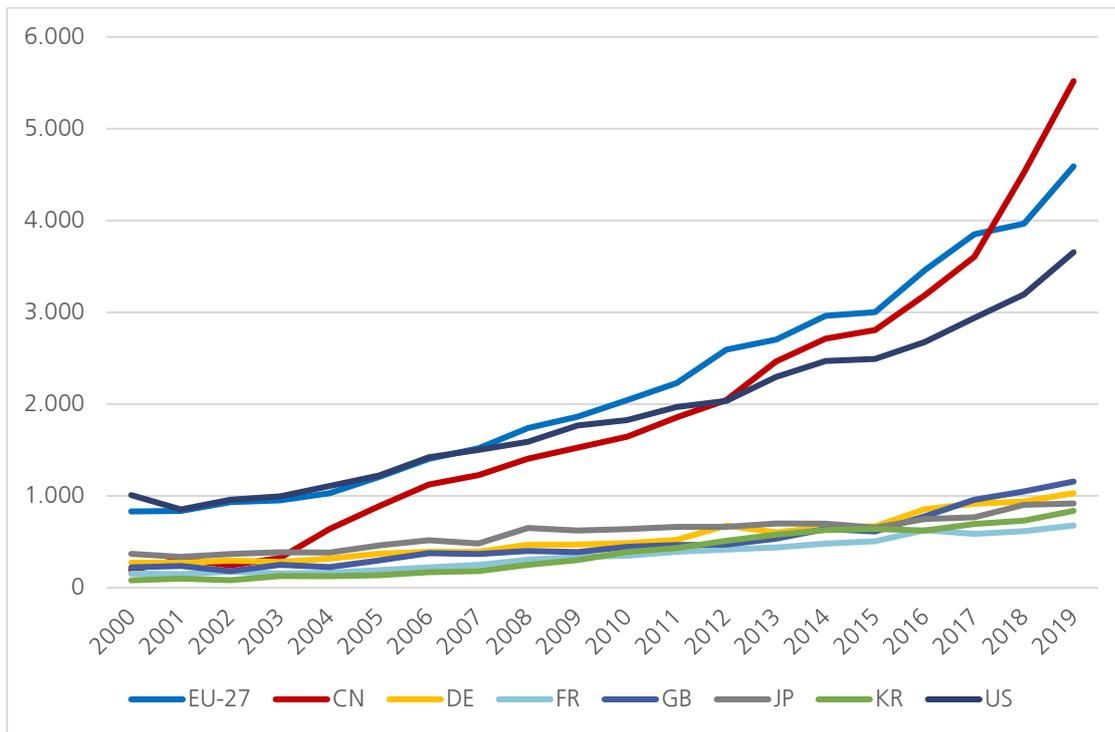
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A20: Internationale Publikationstrends - Materialtechnologien



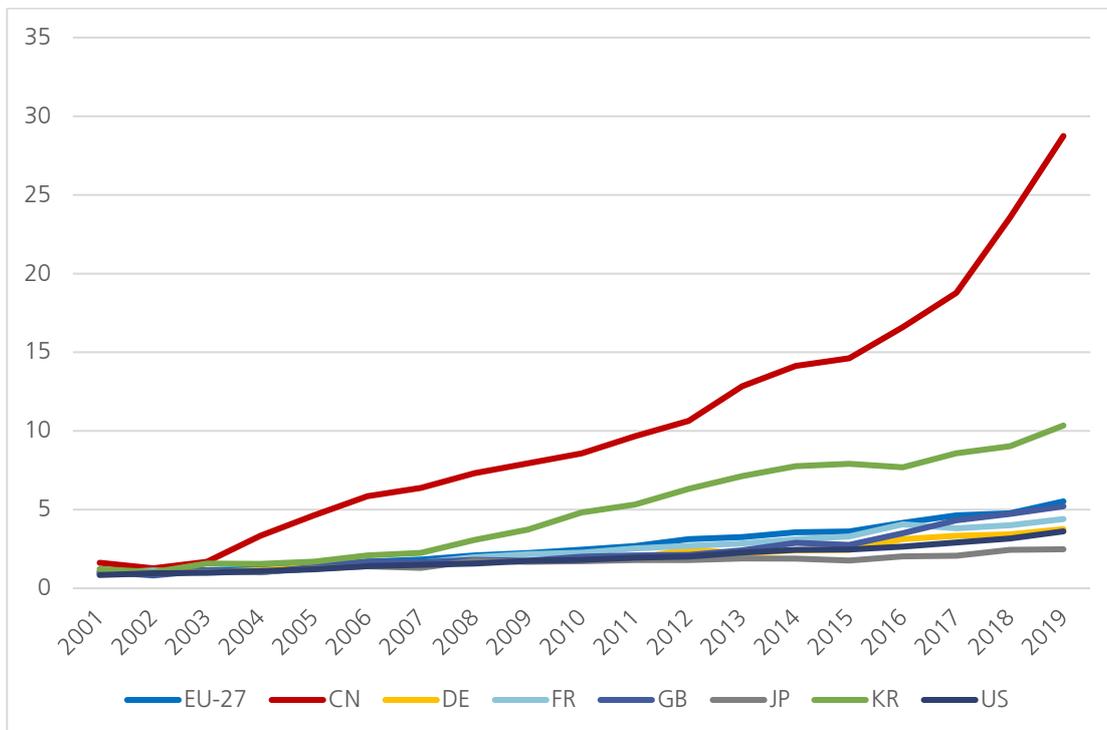
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A21: Internationales Publikationsaufkommen - Produktionstechnologien



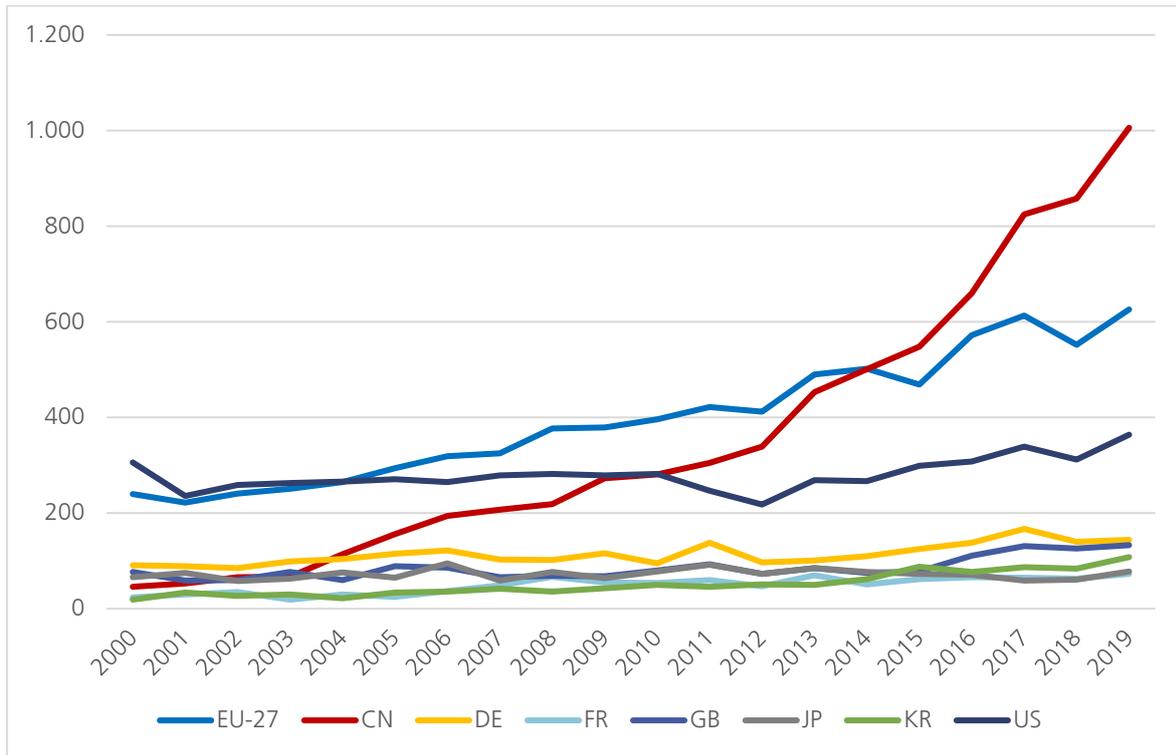
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A22: Internationale Publikationstrends - Produktionstechnologien



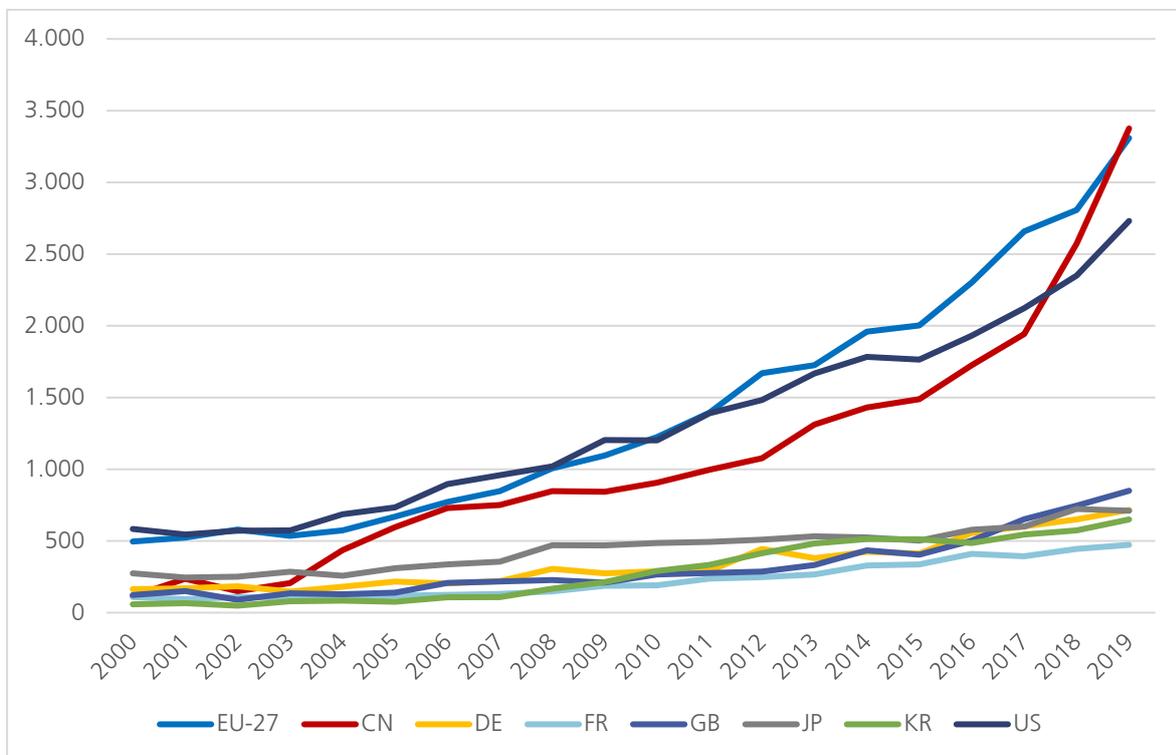
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A23: Internationales Publikationsaufkommen - Advanced Manufacturing



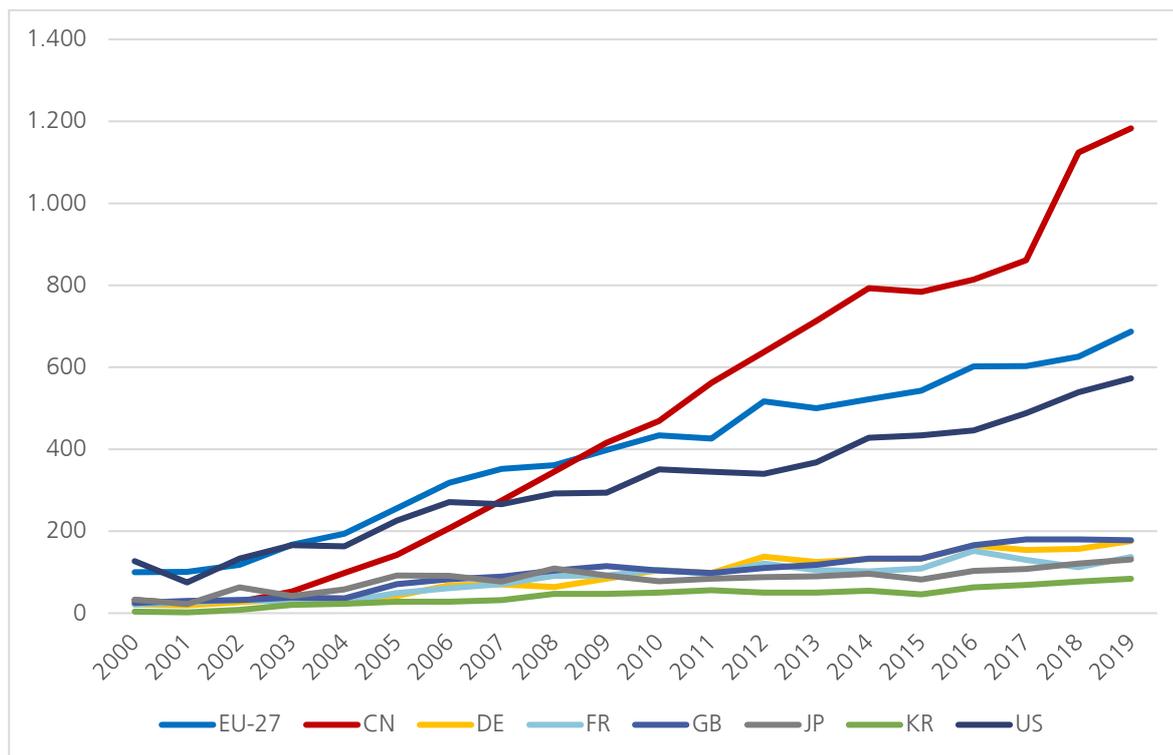
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A24: Internationales Publikationsaufkommen - Robotik



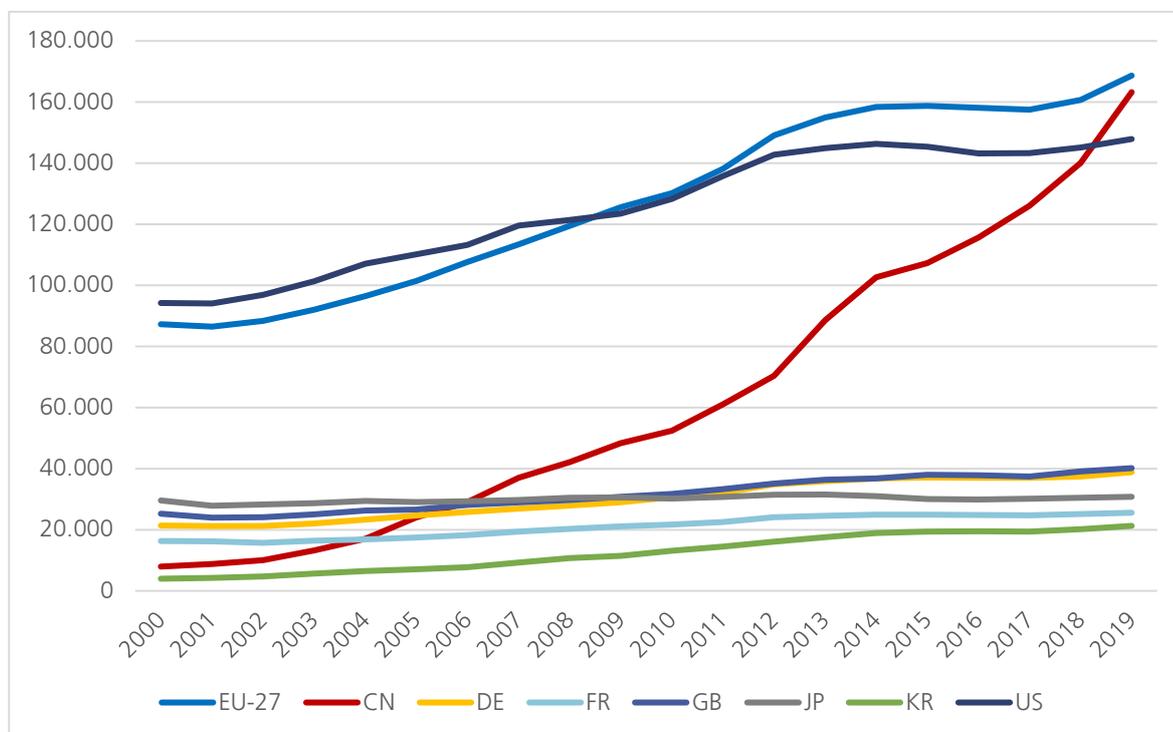
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A25: Internationales Publikationsaufkommen - Photonik



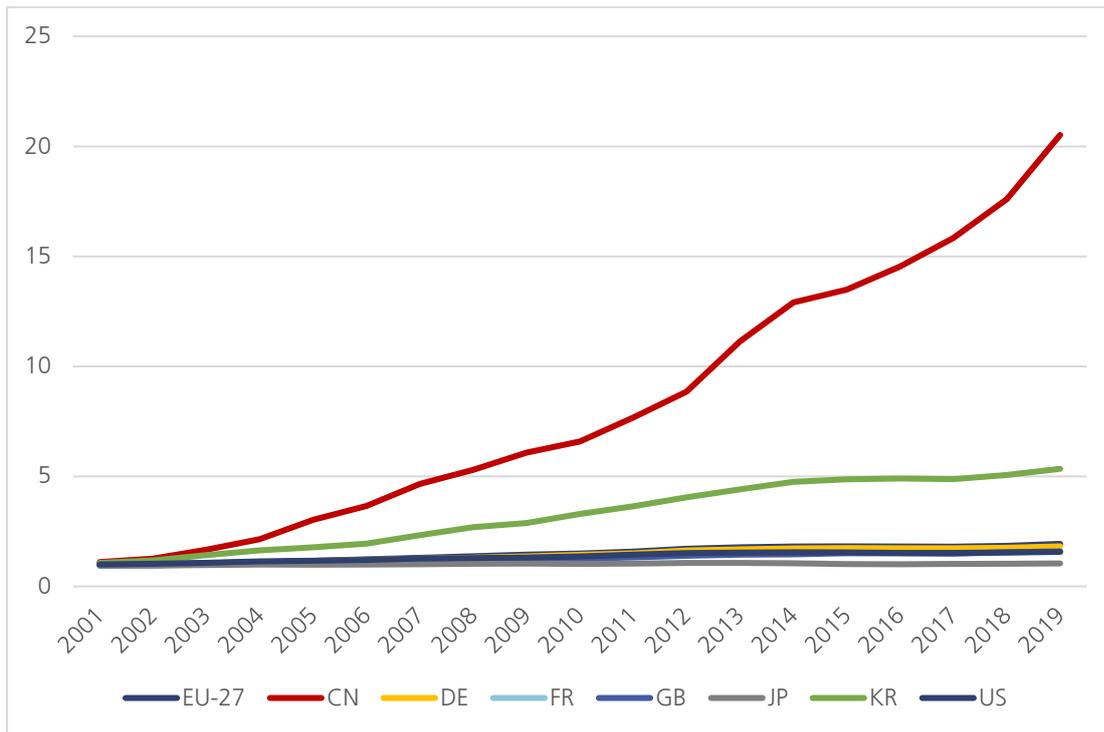
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A26: Internationales Publikationsaufkommen - Bio-/Lebenswissenschaften



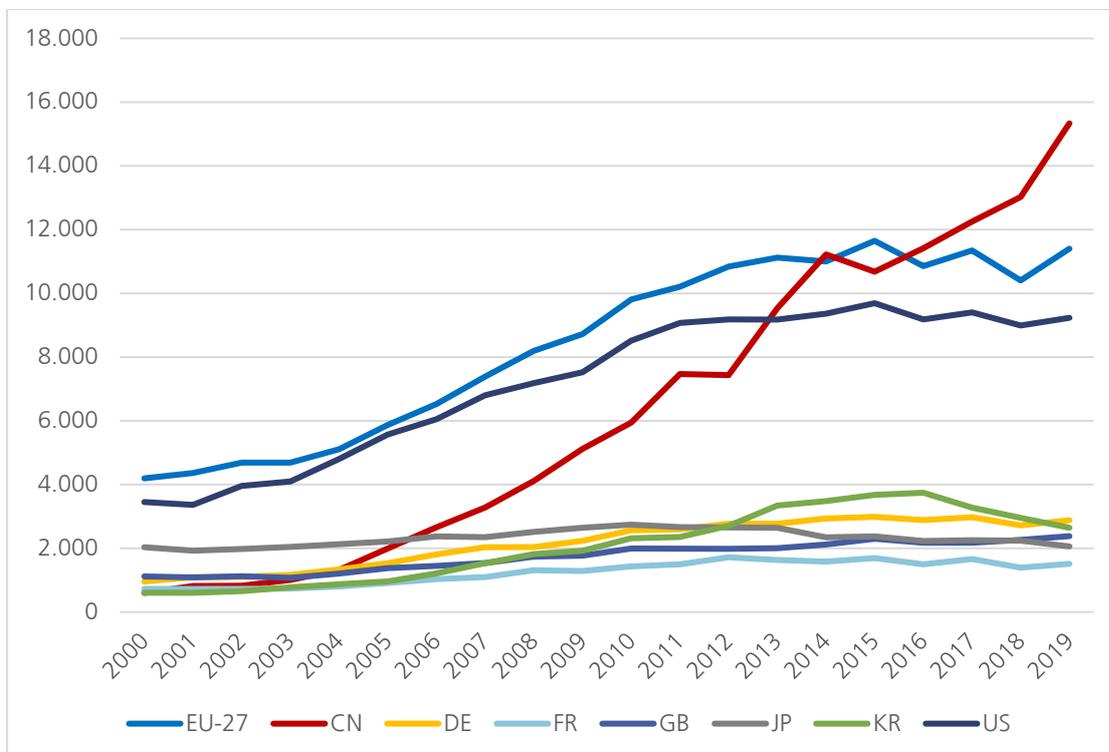
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A27: Internationale Publikationstrends - Bio-/Lebenswissenschaften



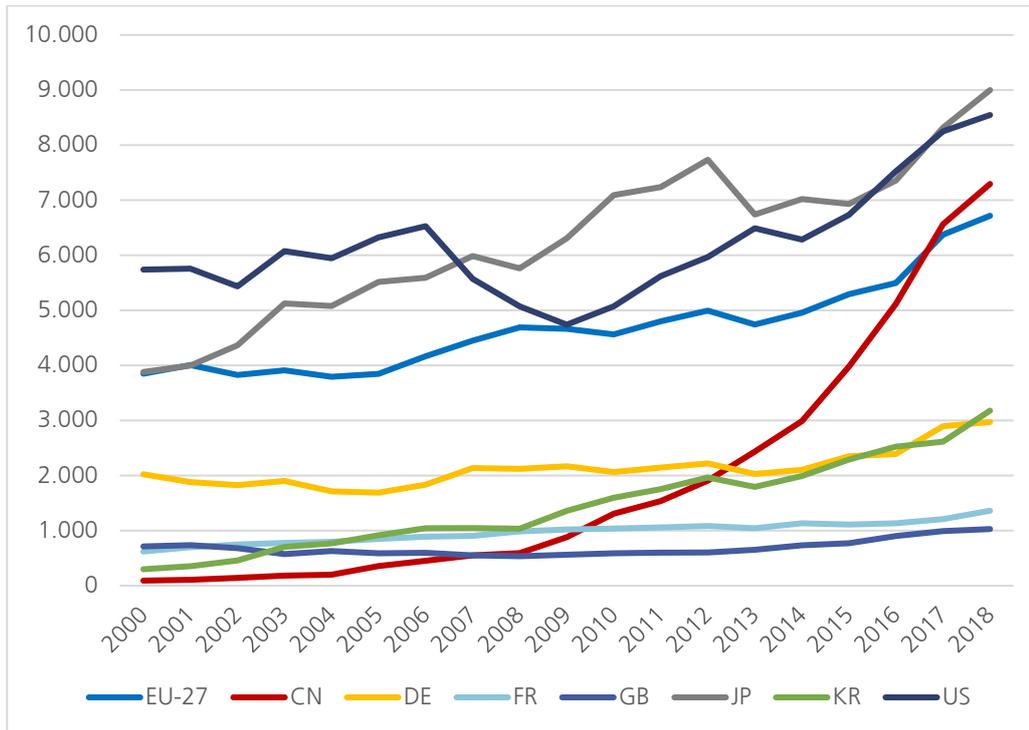
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A28: Internationales Publikationsaufkommen - Biotechnologie



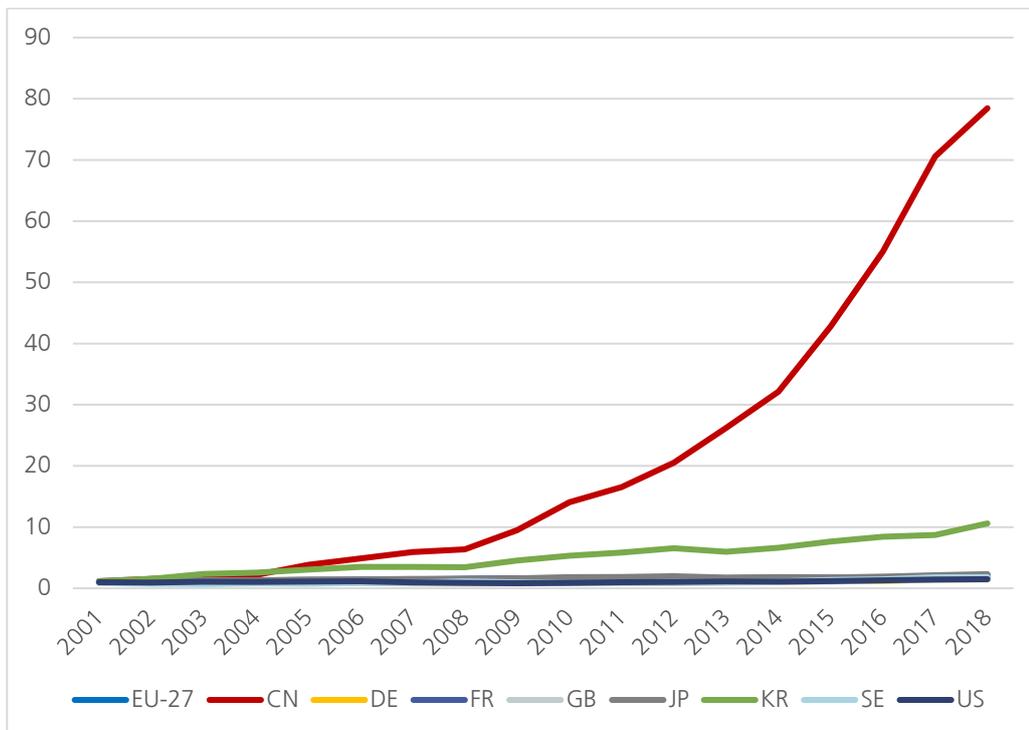
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A29: Internationales Patentaufkommen - Digitalisierungstechnologien



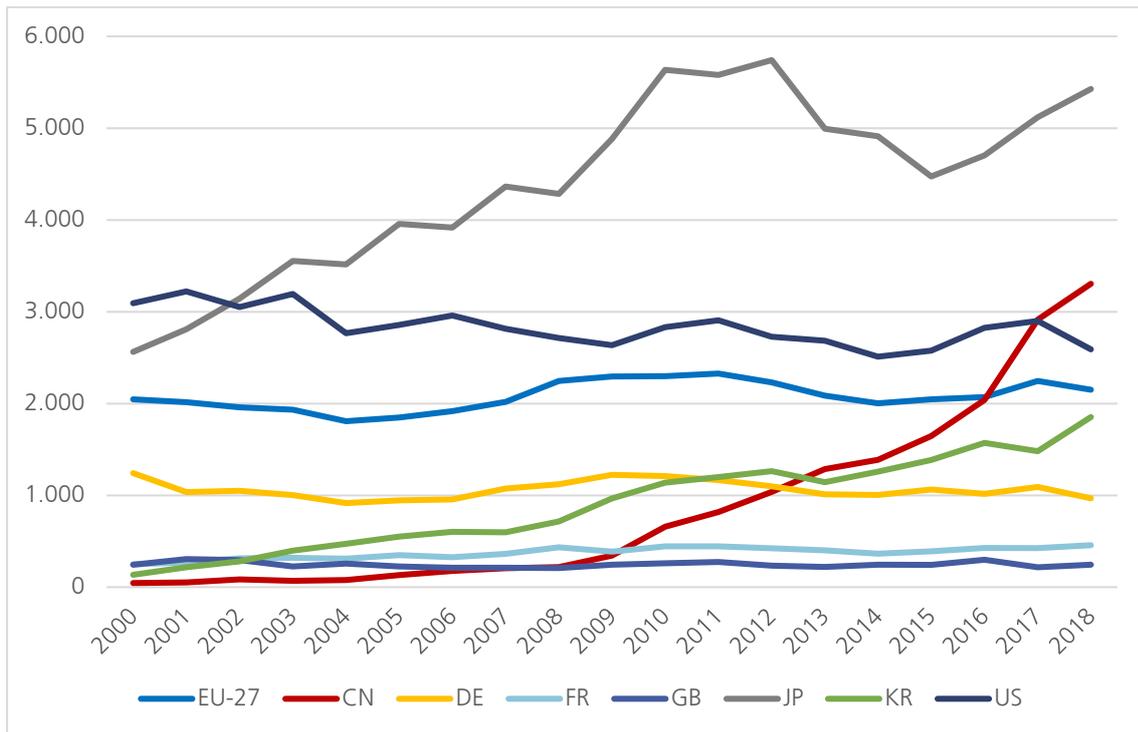
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A30: Internationale Trends bei Patentanmeldungen - Digitalisierungstechnologien



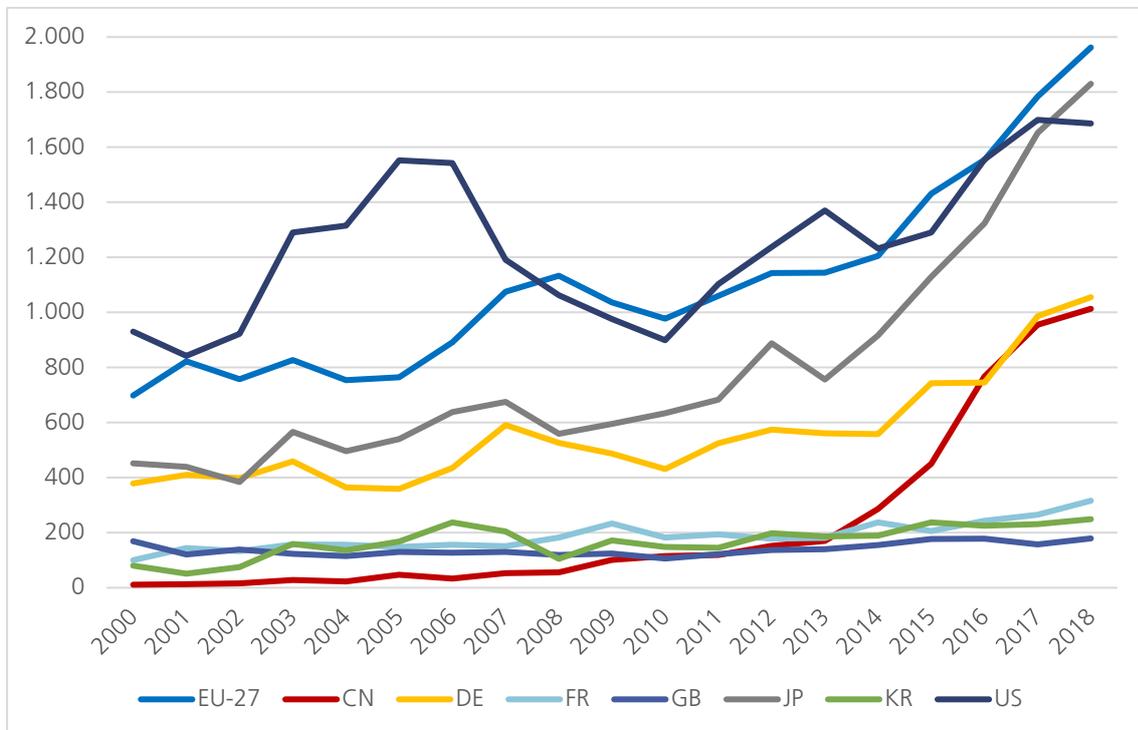
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A31: Internationales Patentaufkommen - Mikroelektronik



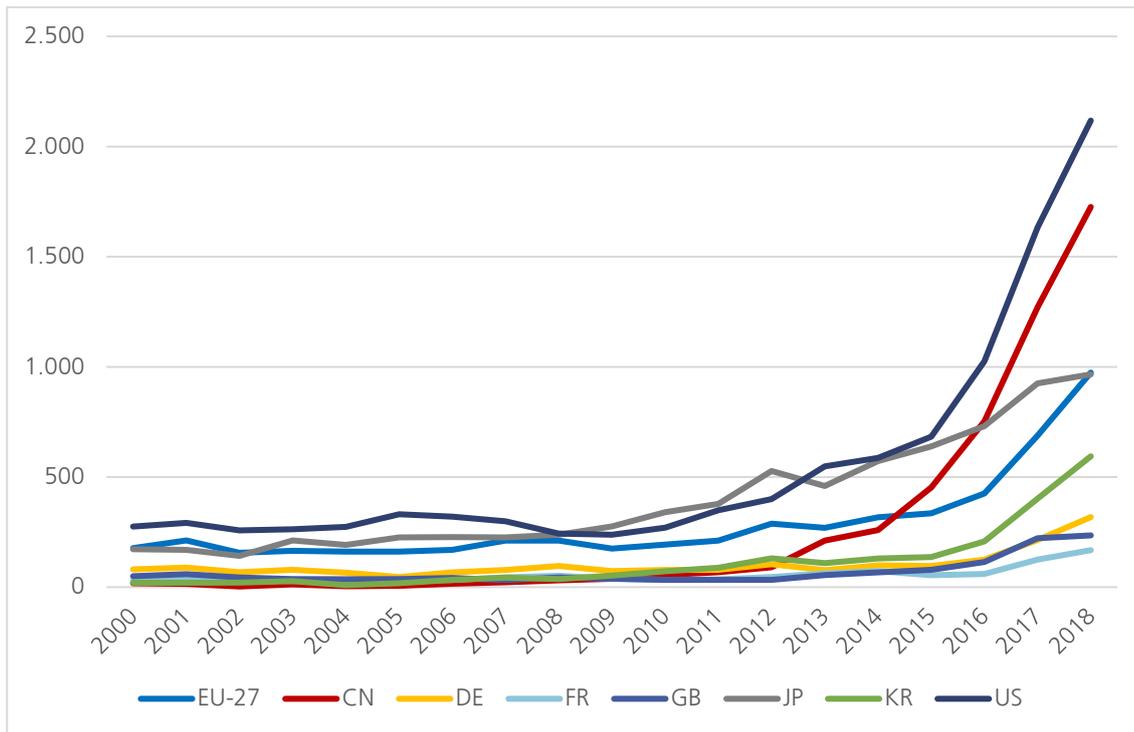
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A32: Internationales Patentaufkommen - Digitale Mobilitätstechnologien



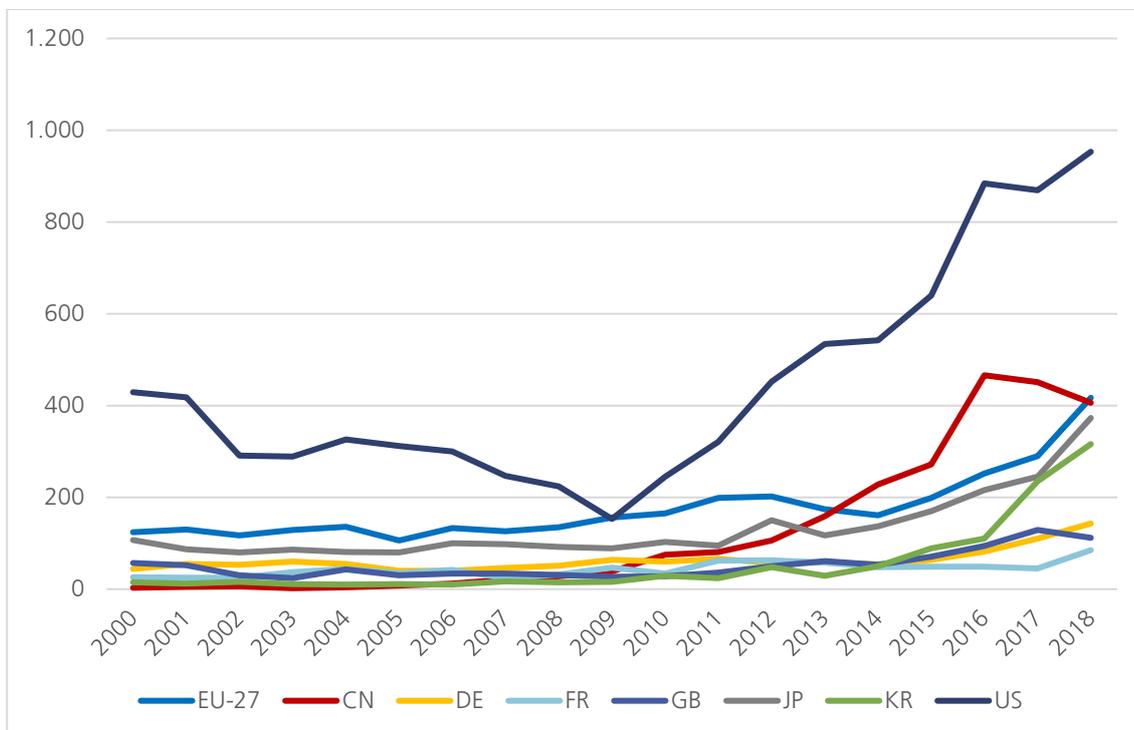
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A33: Internationales Patentaufkommen - Künstliche Intelligenz



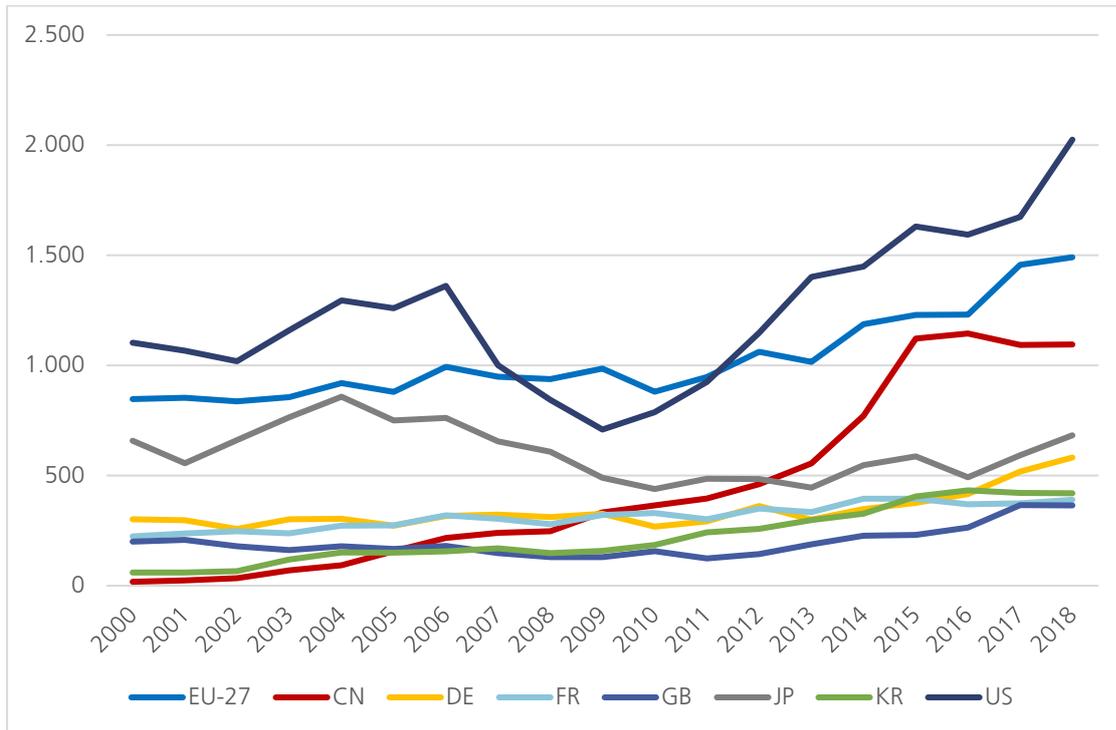
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A34: Internationales Patentaufkommen - Big Data



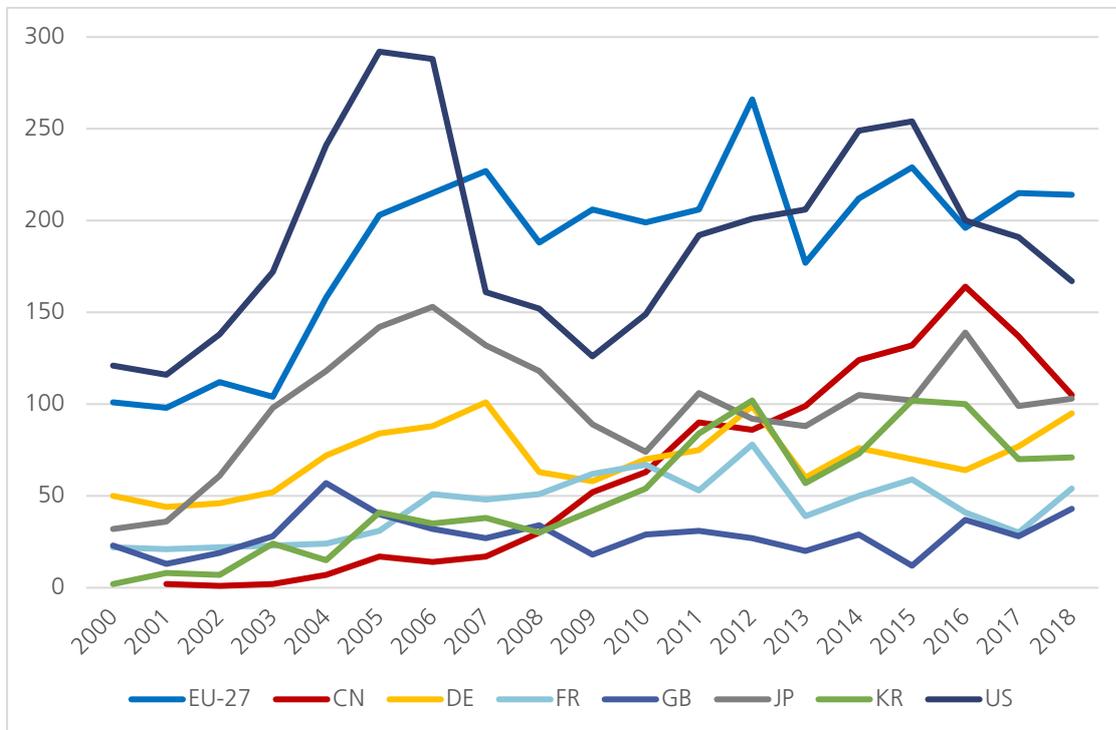
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A35: Internationales Patentaufkommen - Digitale Sicherheitstechnologien



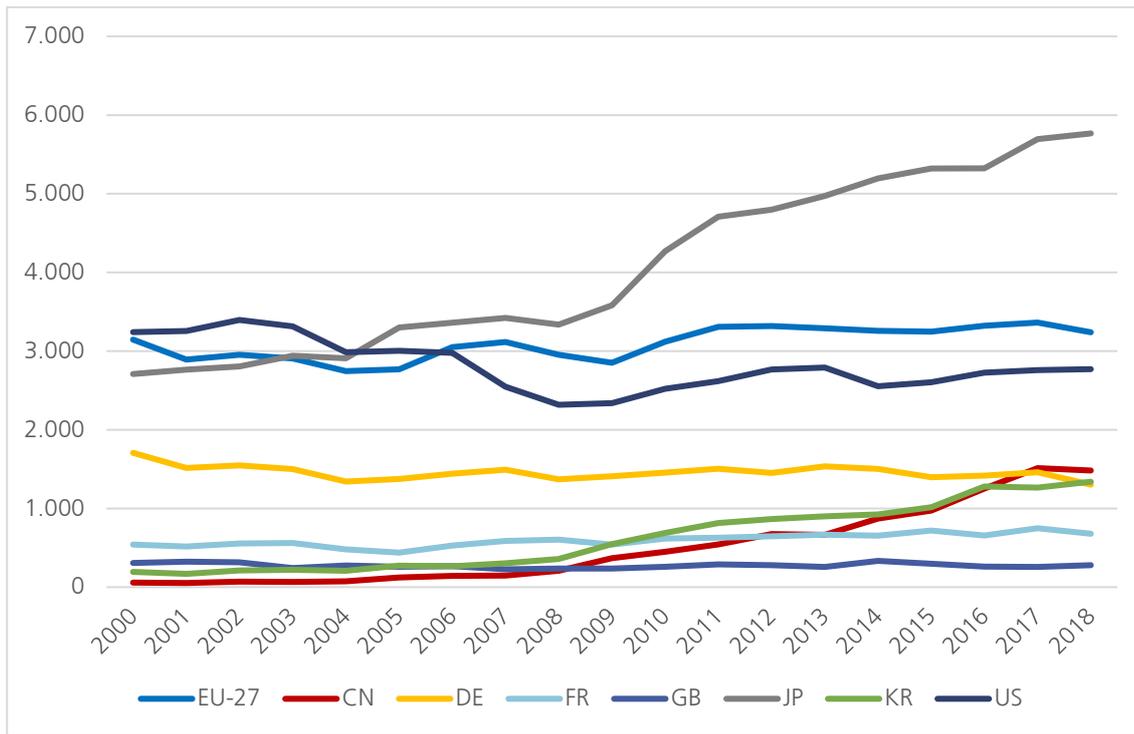
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A36: Internationales Patentaufkommen - Internet of Things



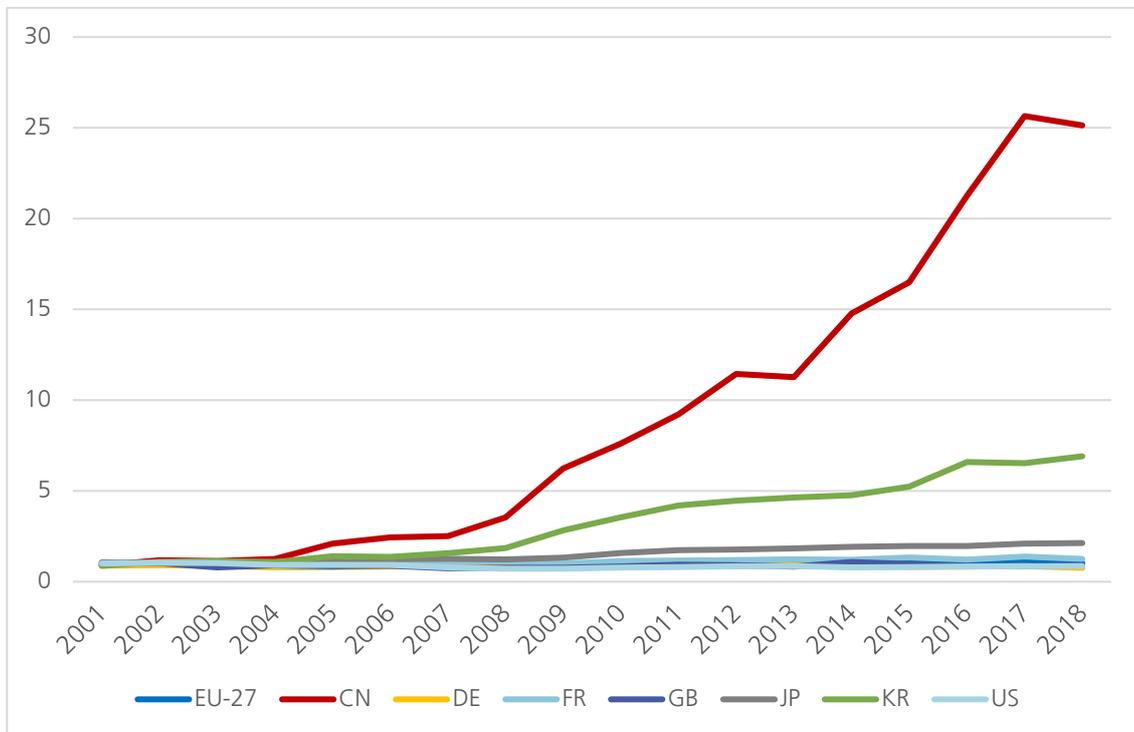
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A37: Internationales Patentaufkommen - Materialtechnologien



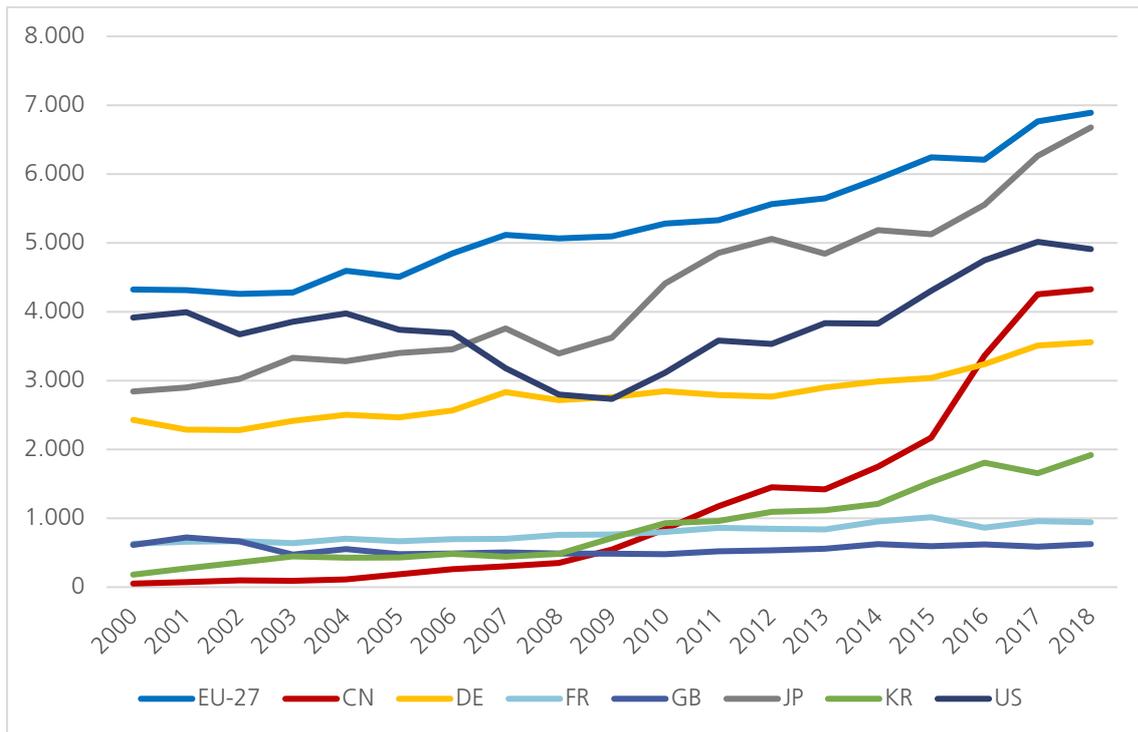
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A38: Internationale Trends bei Patentanmeldungen - Materialtechnologien



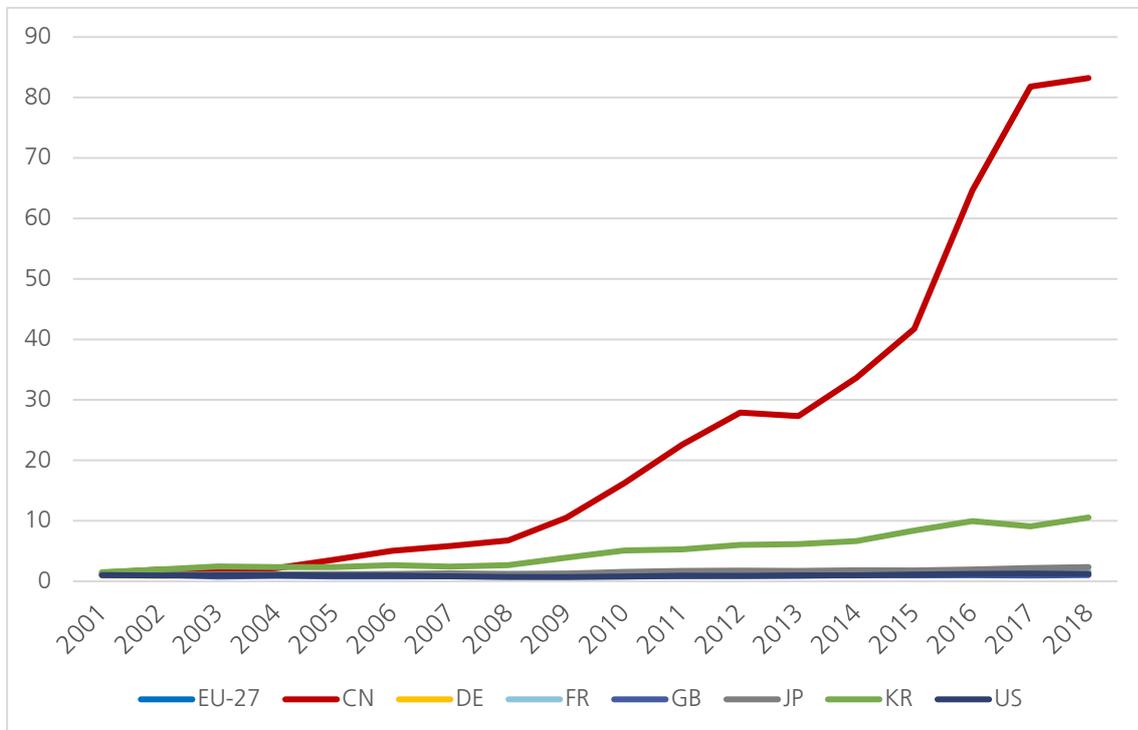
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A39: Internationales Patentaufkommen - Produktionstechnologien



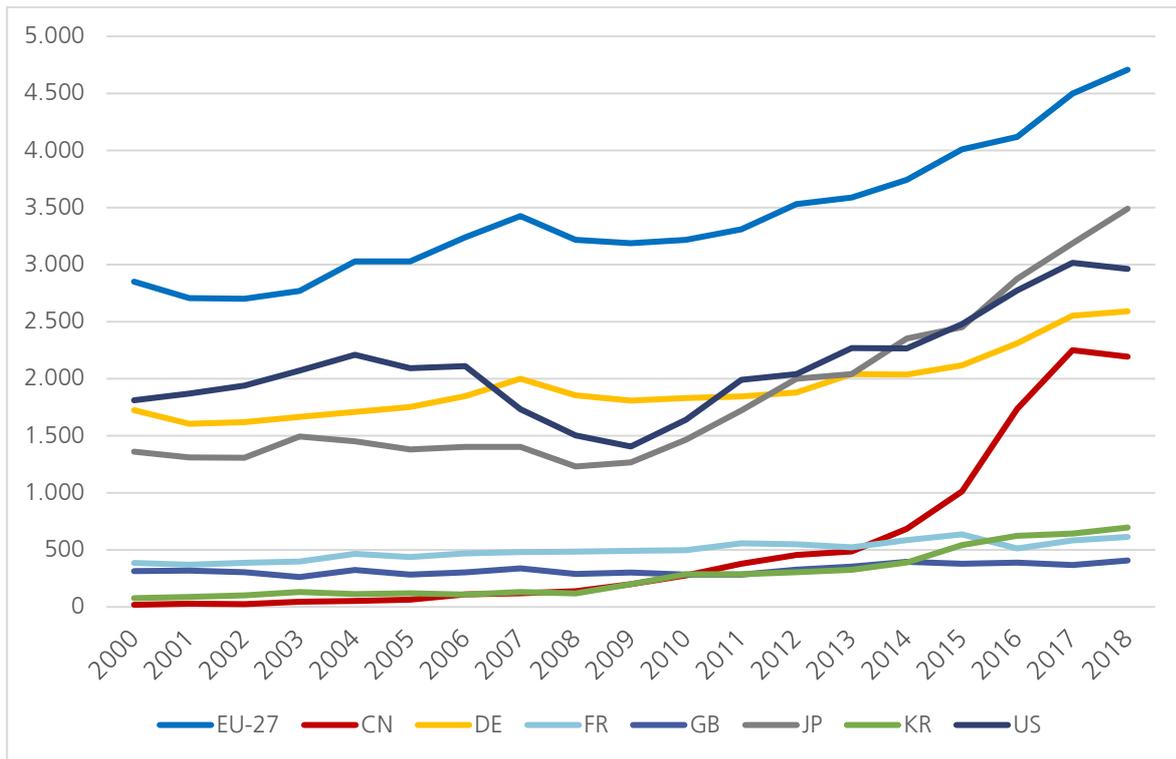
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A40: Internationale Trends bei Patentanmeldungen - Produktionstechnologien



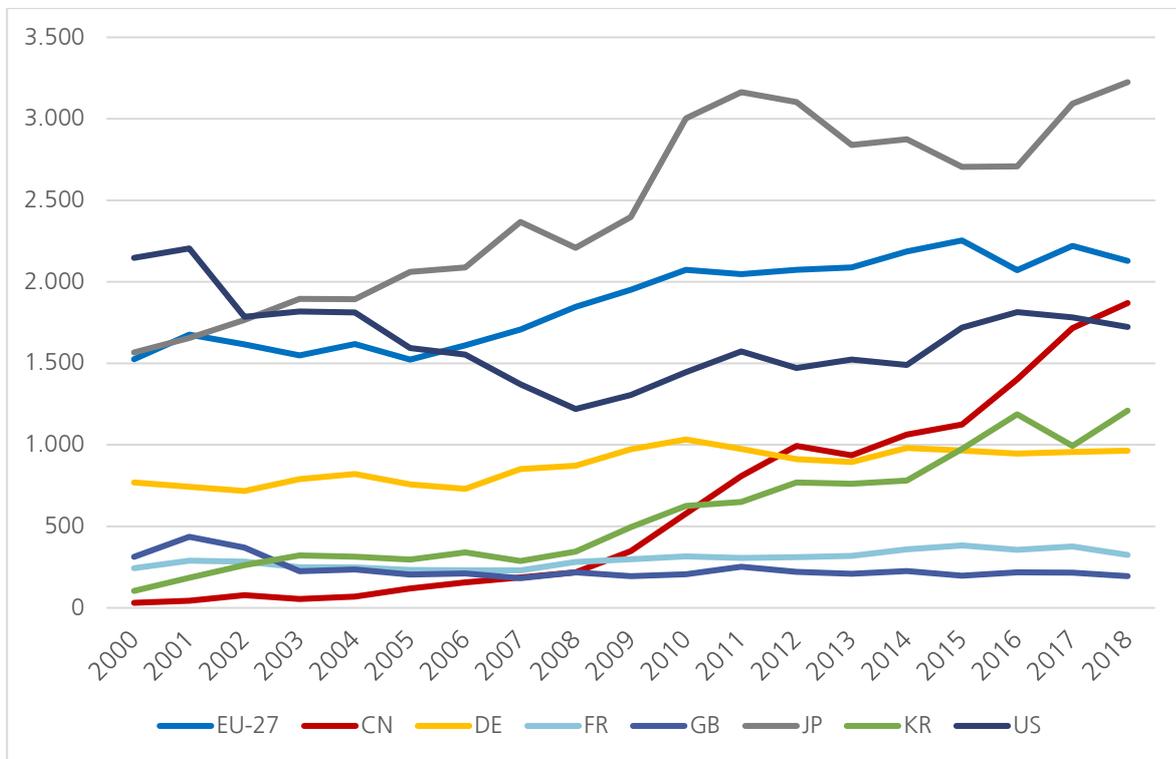
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A41: Internationales Patentaufkommen - Advanced Manufacturing



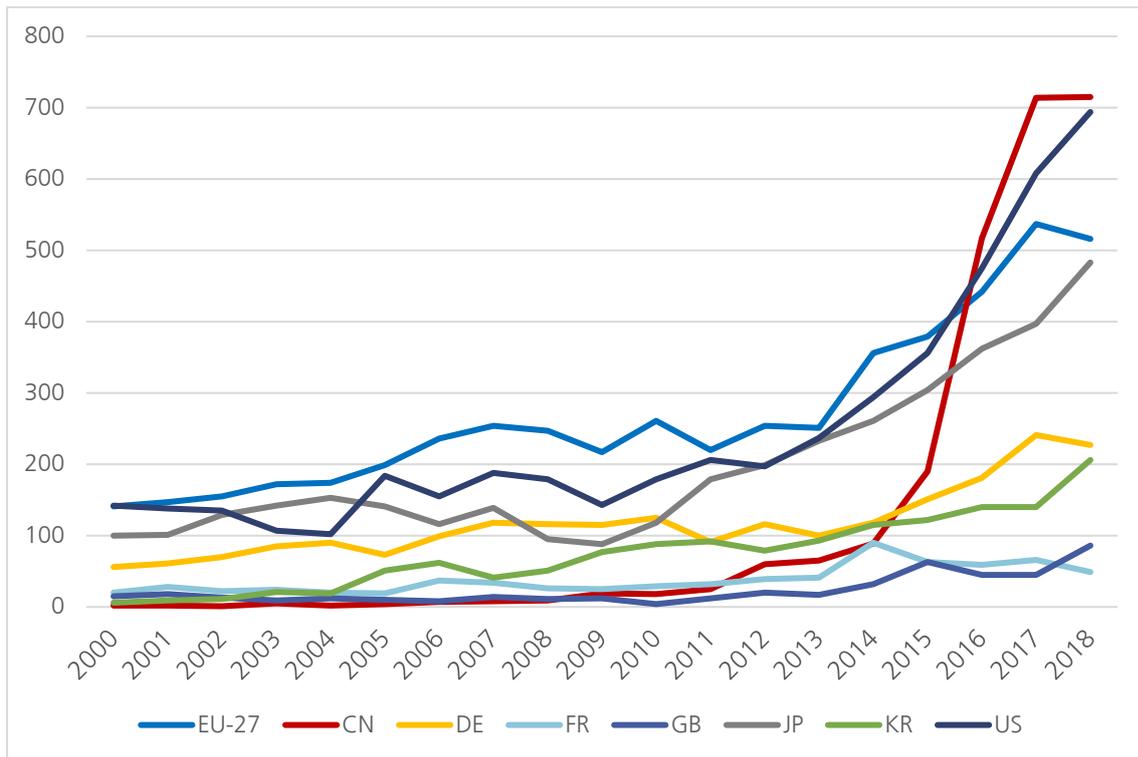
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A42: Internationales Patentaufkommen - Photonik



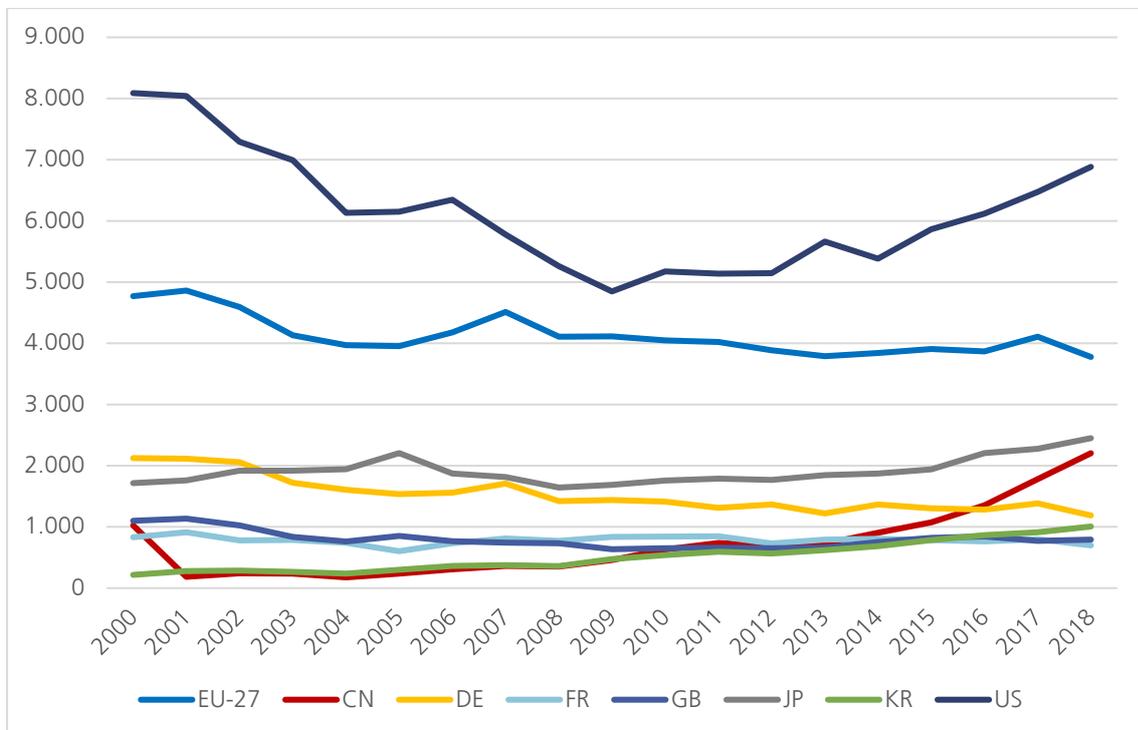
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A43: Internationales Patentaufkommen - Robotik



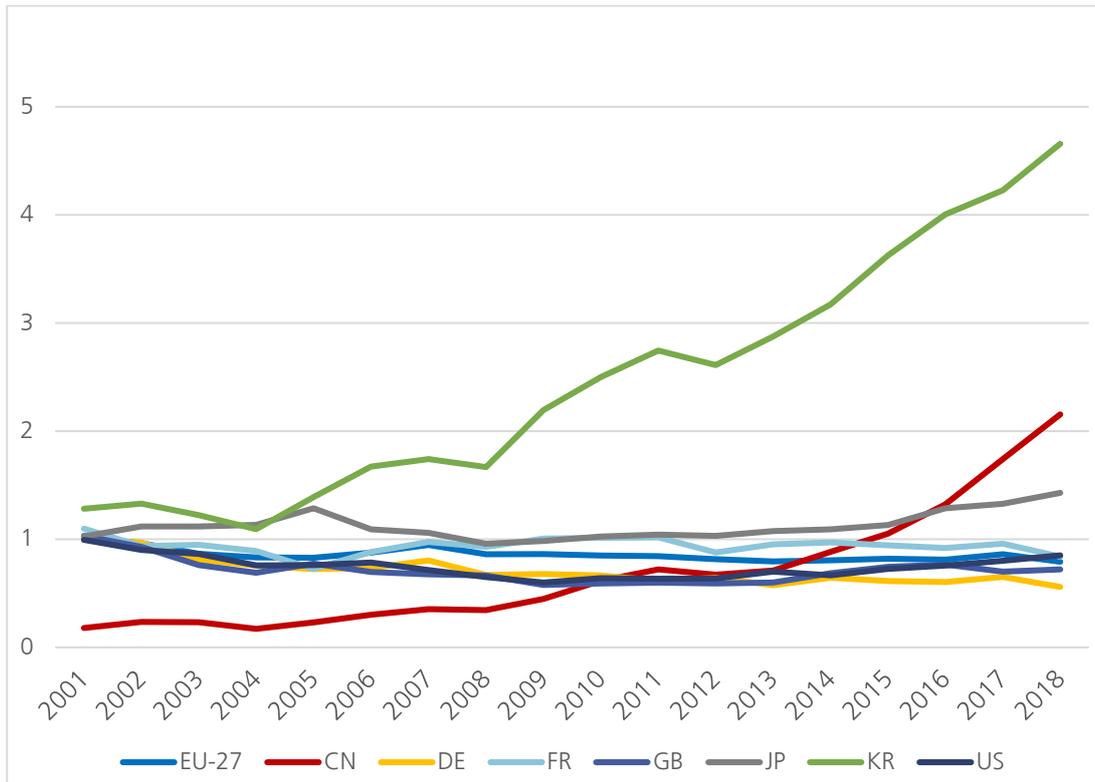
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A44: Internationales Patentaufkommen - Bio-/Lebenswissenschaften



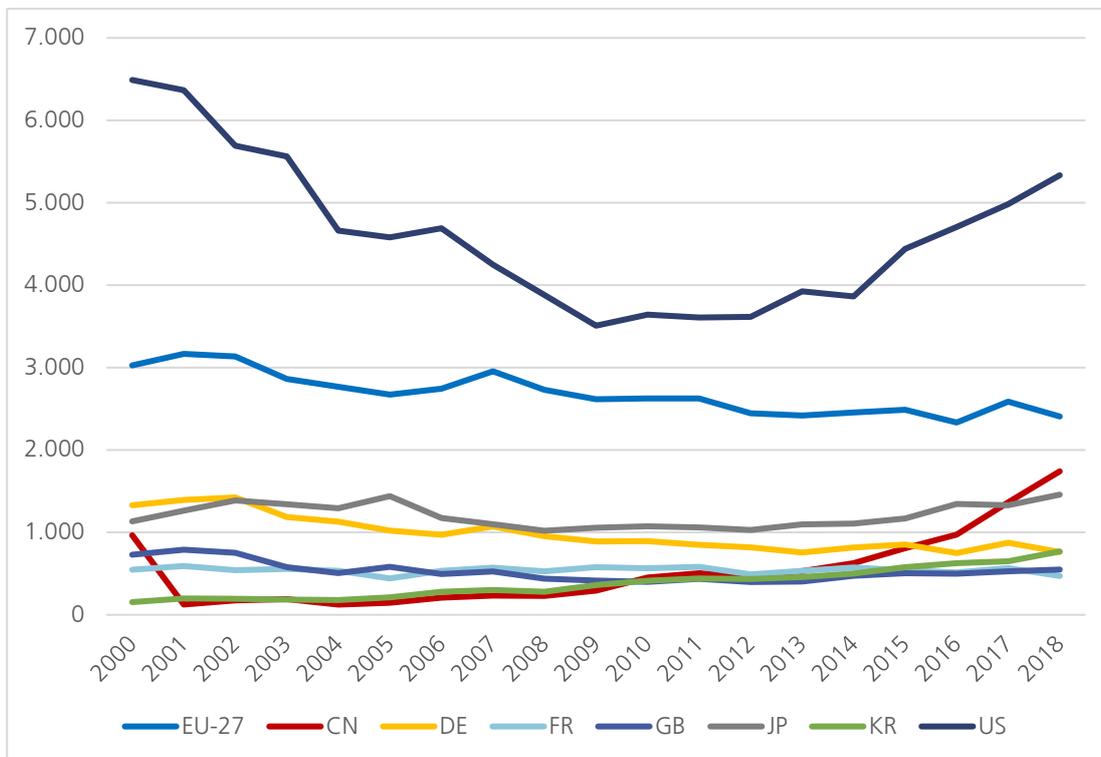
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A45: Internationale Trends bei Patentanmeldungen - Bio-/Lebenswissenschaften



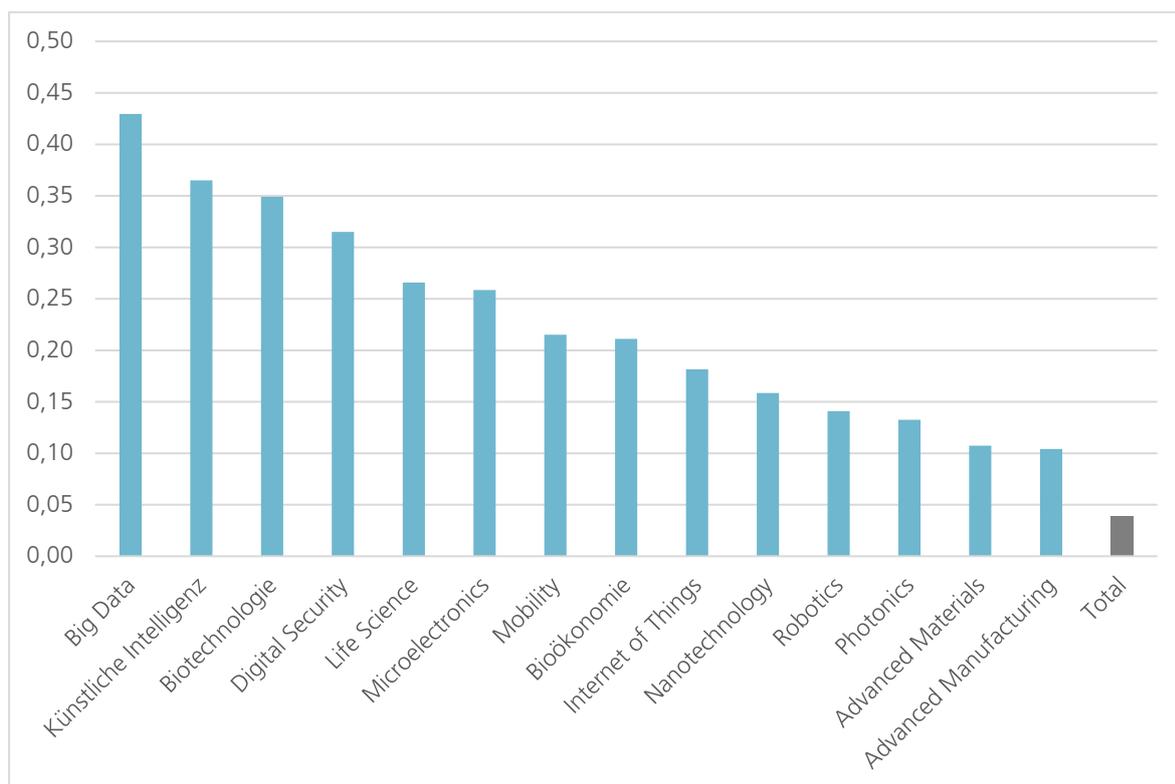
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A46: Internationales Patentaufkommen - Biotechnologie



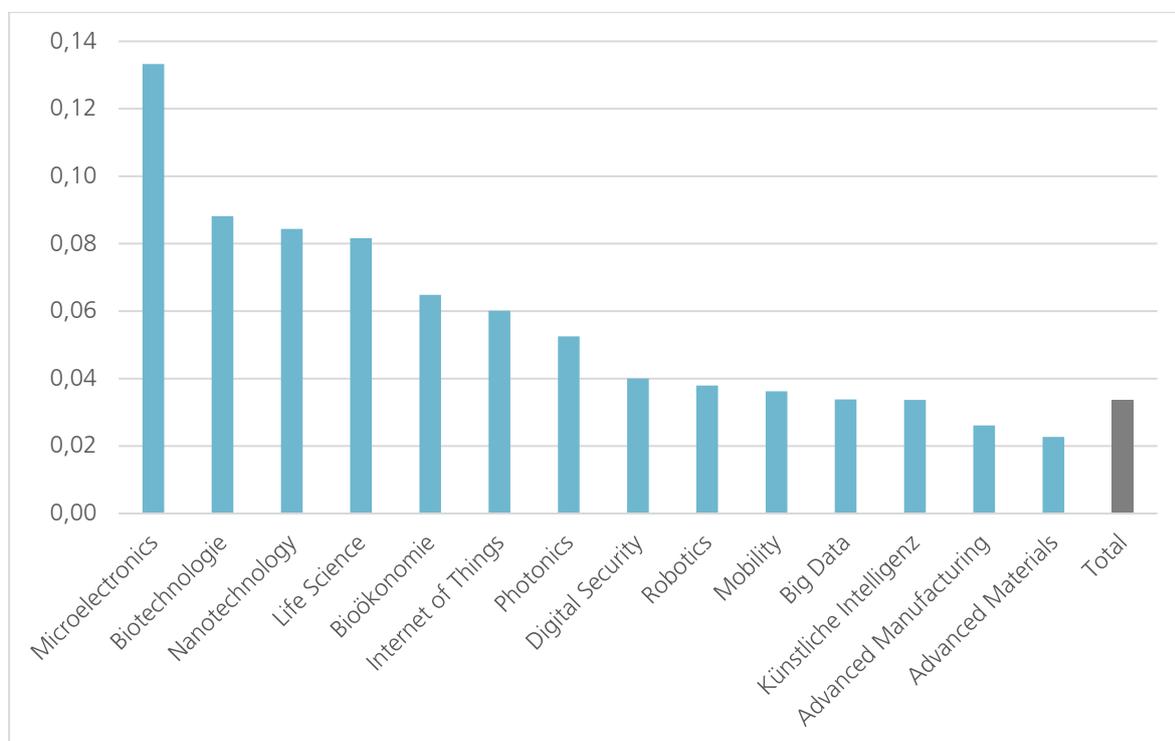
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A47: Streuung über IPC-Klassen (4-Steller) - Herfindahl-Hirschman-Index



Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A48: Streuung über WZ-Klassen (4-Steller) - Herfindahl-Hirschman-Index



Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A49: Entwicklung des HHI Konzentrationsindex über Wirtschaftszweige (Trend: 2000 = 1)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Künstliche Intelligenz	1,00	1,17	0,91	0,89	0,84	0,77	0,71	0,66	0,67	0,71	0,69	0,63	0,71	0,76	0,68	0,75	0,74	0,68	0,68
Digitale Sicherheitstechnologien	1,00	0,95	0,96	0,98	0,90	0,94	0,99	0,95	0,95	1,14	1,22	1,20	0,92	0,89	0,90	0,96	0,78	0,64	0,69
Big Data	1,00	1,00	1,24	1,49	1,26	1,26	1,26	1,24	1,13	1,04	0,98	0,98	1,04	1,12	1,16	1,06	1,07	1,04	0,98
Internet of Things	1,00	1,60	1,38	1,26	1,25	1,35	1,47	1,35	1,20	1,39	1,88	1,94	1,91	1,82	1,40	1,44	1,82	1,32	1,67
Digitale Mobilitätstechnologien	1,00	1,00	1,11	0,98	0,86	1,09	1,05	1,06	1,00	1,05	0,96	0,96	0,87	0,85	0,82	0,80	0,73	0,83	0,82
Mikro- und Nanoelektronik	1,00	0,90	0,99	0,95	0,87	0,96	0,87	0,81	0,68	0,65	0,62	0,65	0,67	0,75	0,85	1,00	1,21	1,33	1,32
Nanotechnologie	1,00	1,07	0,70	0,88	0,68	1,04	1,10	0,94	1,15	1,14	0,89	0,85	0,76	0,98	1,06	1,22	0,87	1,00	1,07
Neue Materialien	1,00	0,98	0,96	0,99	1,00	1,09	1,02	1,00	0,99	0,96	0,96	0,93	0,91	0,91	0,85	0,80	0,84	0,84	0,90
Adv. Manufacturing	1,00	0,93	0,92	0,95	0,97	0,94	0,90	0,96	0,90	0,85	0,79	0,83	0,77	0,77	0,76	0,77	0,79	0,86	0,89
Photonik	1,00	1,08	1,18	1,09	1,10	1,17	1,05	1,07	1,02	1,13	1,22	1,24	1,16	1,10	1,09	1,14	1,10	1,22	1,40
Robotik	1,00	1,11	0,99	1,02	1,10	1,03	0,97	0,83	0,90	0,74	0,68	0,94	0,86	0,86	0,87	0,80	0,90	0,69	0,80
Lebenswissenschaften	1,00	0,93	0,90	0,88	0,92	0,90	0,83	0,81	0,75	0,72	0,73	0,70	0,65	0,64	0,65	0,69	0,69	0,67	0,78
Bioökonomie	1,00	0,92	0,89	0,86	0,88	0,84	0,79	0,73	0,70	0,67	0,68	0,63	0,62	0,61	0,63	0,69	0,66	0,68	0,78
Biotechnologie	1,00	0,93	0,88	0,85	0,88	0,85	0,78	0,75	0,71	0,70	0,73	0,67	0,65	0,66	0,67	0,70	0,70	0,69	0,79
Total	1,00	1,17	0,91	0,89	0,84	0,77	0,71	0,66	0,67	0,71	0,69	0,63	0,71	0,76	0,68	0,75	0,74	0,68	0,68

Notiz: Grün => Verbreiterung, Rot => Konzentration

Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

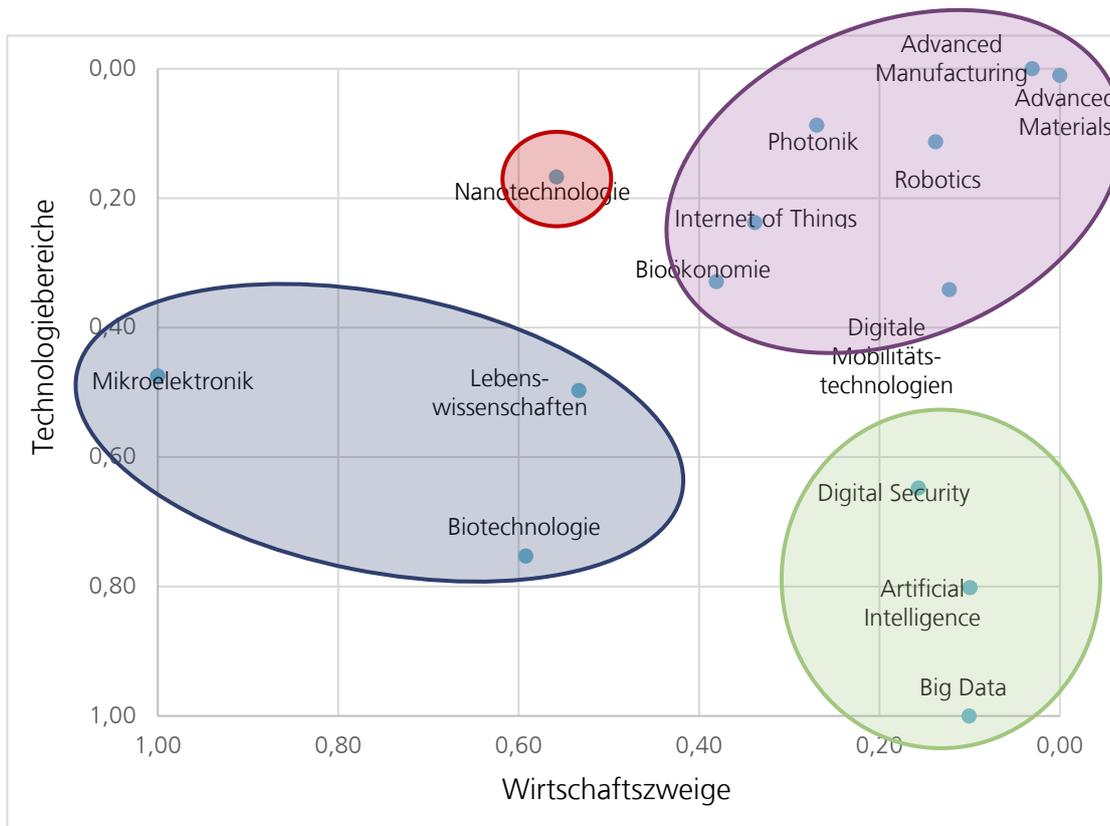
Abbildung A50: Entwicklung des HHI Konzentrationsindexes über IPC-Klassen (Trend: 2000 = 1)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Künstliche Intelligenz	1,00	0,99	1,05	1,11	1,23	1,27	1,27	1,20	1,15	1,22	1,13	1,07	1,03	1,11	1,07	1,07	1,11	1,17	1,29
Digitale Sicherheitstechnologien	1,00	1,05	1,08	1,15	1,13	1,26	1,32	1,43	1,51	1,48	1,53	1,57	1,63	1,71	1,68	1,64	1,57	1,63	1,65
Big Data	1,00	1,15	1,22	1,30	1,49	1,85	1,74	1,80	1,78	1,75	1,61	1,61	1,64	1,75	1,56	1,65	1,60	1,54	1,52
Internet of Things	1,00	0,98	0,99	1,03	0,98	1,16	1,16	1,29	1,25	1,21	1,18	1,21	1,27	1,32	1,22	1,15	1,12	1,02	1,05
Digitale Mobilitätstechnologien	1,00	1,06	1,03	0,94	1,02	1,18	1,16	1,35	1,42	1,44	1,42	1,36	1,30	1,35	1,33	1,23	1,29	1,32	1,35
Mikro- und Nanoelektronik	1,00	0,98	0,99	1,02	1,15	1,47	1,42	1,54	1,58	1,56	1,53	1,51	1,46	1,47	1,43	1,38	1,37	1,39	1,42
Nanotechnologie	1,00	0,96	1,01	1,17	1,18	1,39	1,59	1,62	1,83	1,82	1,54	1,46	1,55	1,52	1,47	1,43	1,38	1,35	1,44
Neue Materialien	1,00	0,99	1,00	1,02	1,08	1,20	1,17	1,17	1,17	1,14	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,13	1,15	1,14	1,15
Adv. Manufacturing	1,00	1,00	1,00	1,03	1,10	1,22	1,20	1,30	1,30	1,22	1,19	1,20	1,21	1,22	1,18	1,17	1,18	1,23	1,24
Photonik	1,00	0,99	0,90	0,85	0,88	0,96	0,97	0,99	1,03	1,03	1,05	1,07	1,05	0,98	0,93	0,90	0,89	0,87	0,87
Robotik	1,00	1,01	0,92	1,06	1,30	1,15	1,15	1,30	1,22	1,24	1,43	1,38	1,37	1,30	1,27	1,42	1,31	1,32	1,35
Lebenswissenschaften	1,00	0,94	0,96	0,97	0,97	1,04	1,05	1,13	1,17	1,14	1,09	1,09	1,09	1,07	1,11	1,09	1,08	1,09	1,15
Bioökonomie	1,00	0,94	0,96	1,00	0,97	1,02	1,01	1,05	1,08	1,05	1,01	0,99	1,00	1,03	1,02	1,05	1,02	1,07	1,12
Biotechnologie	1,00	0,94	0,96	0,97	1,00	1,10	1,11	1,24	1,25	1,26	1,21	1,23	1,24	1,27	1,24	1,19	1,17	1,20	1,25
Total	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,03	1,03	1,02	1,02	1,03	1,04	1,06	1,08	1,09	1,08	1,09	1,09	1,08	1,10

Notiz: Grün => Verbreiterung, Rot => Konzentration

Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

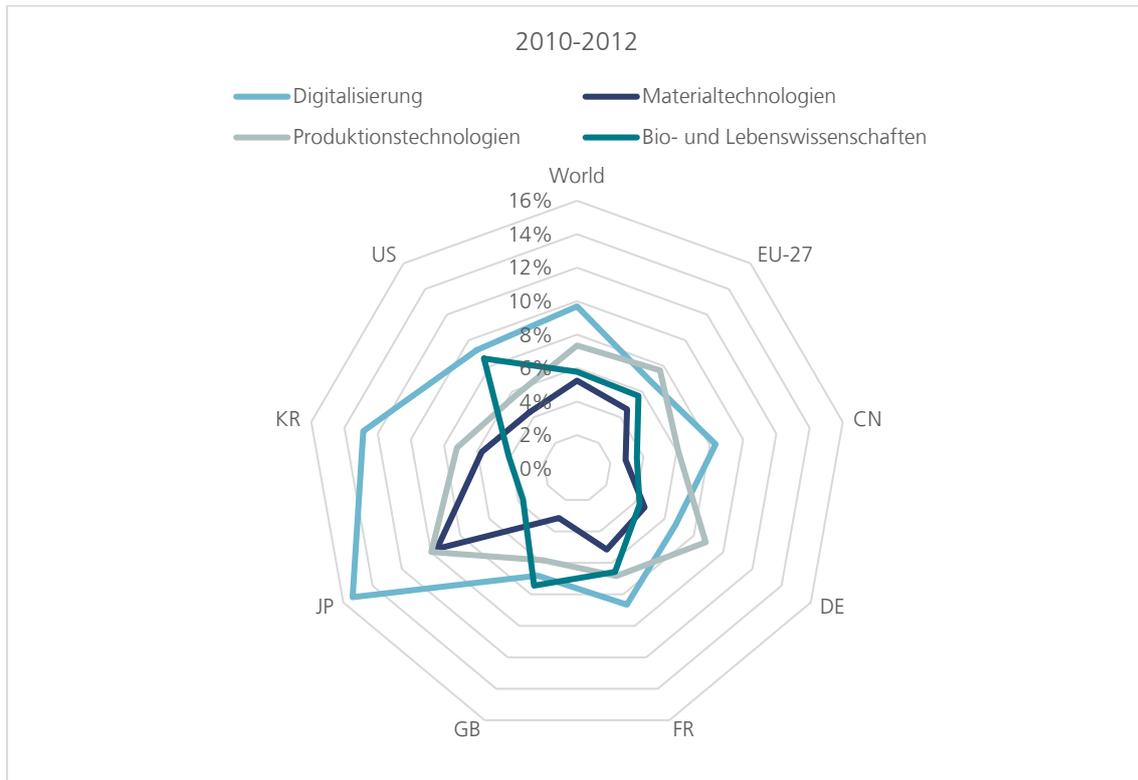
Abbildung A51: Matrixdarstellung der Streuung von Schlüsseltechnologien



Notiz: Herfindahl-Hirschman-Index normalisiert zwischen 0 = niedrigster Wert und 1 = höchster Wert um klarere Darstellung zu erreichen

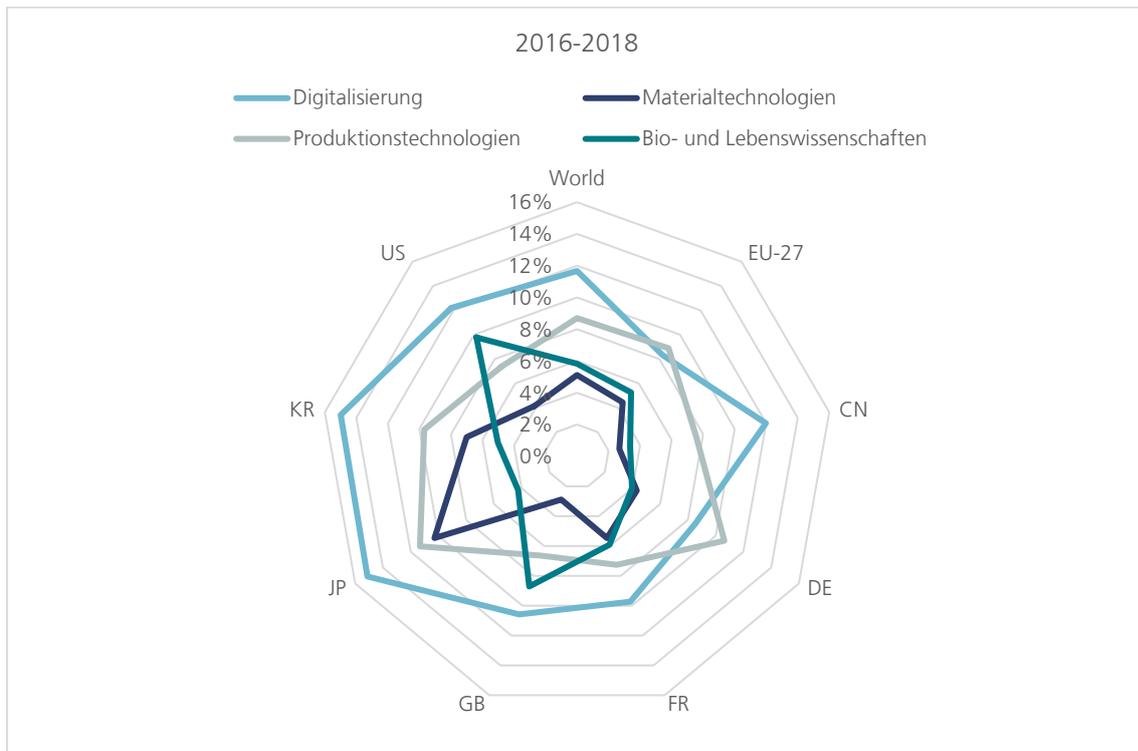
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A52: Anteil der Technologiebereiche am Gesamtaufkommen; Publikationen 2010-2012



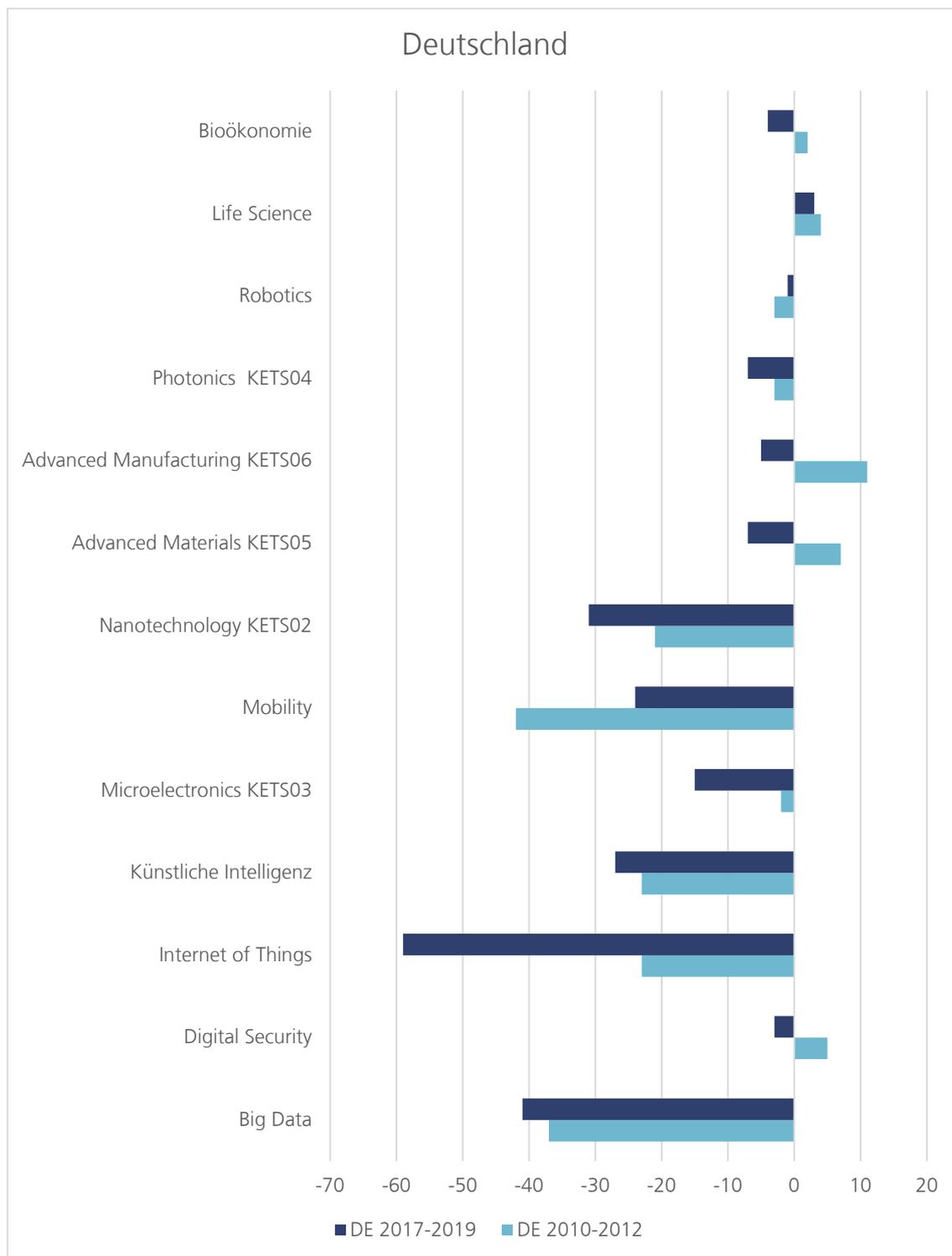
Quelle: Elsevier SCOPUS; Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A53: Anteil der Technologiebereiche am Gesamtaufkommen; Publikationen 2016-2018



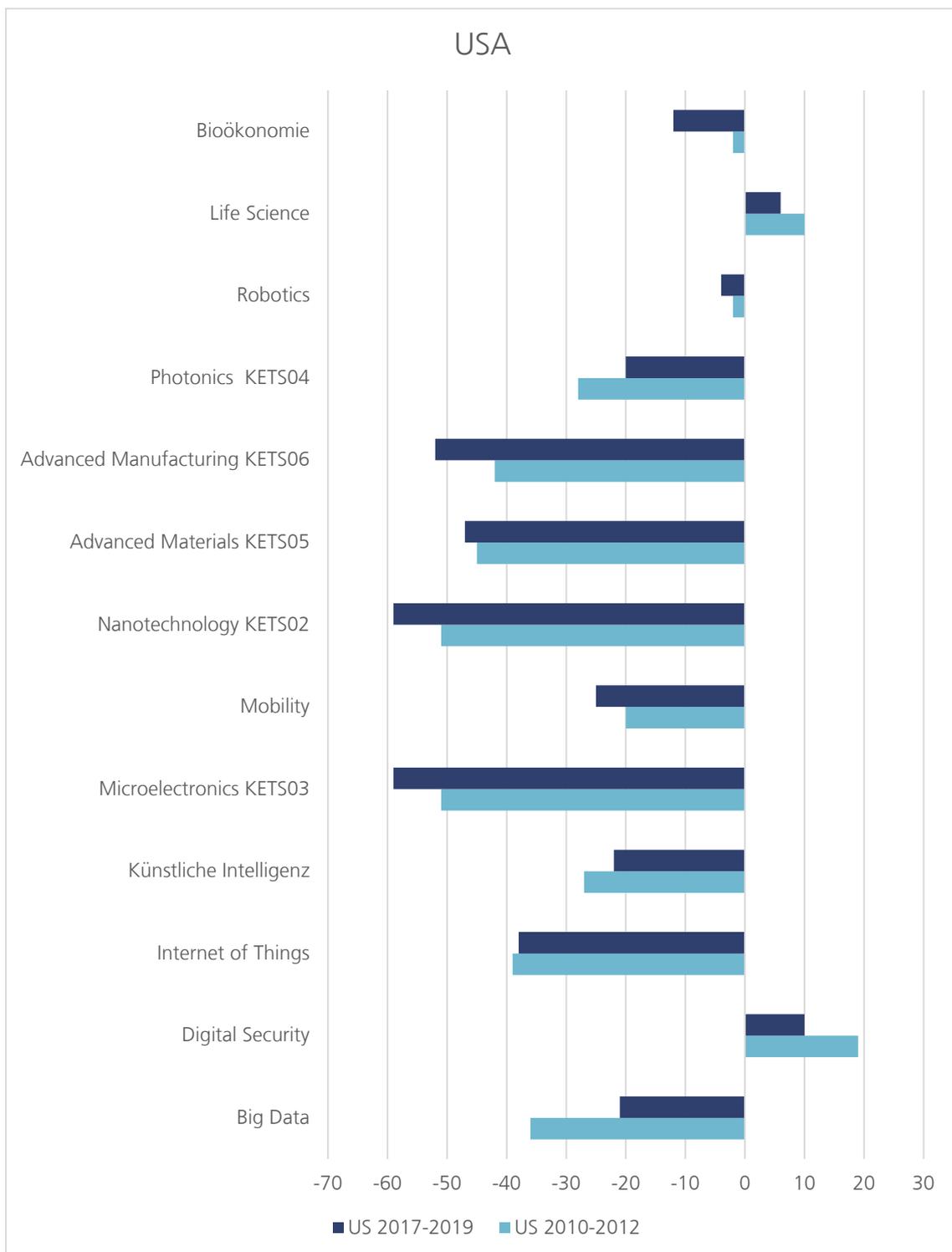
Quelle: Elsevier SCOPUS; Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A54: Publikationen - RLA des jeweiligen Landes (Einzeltechnologien)



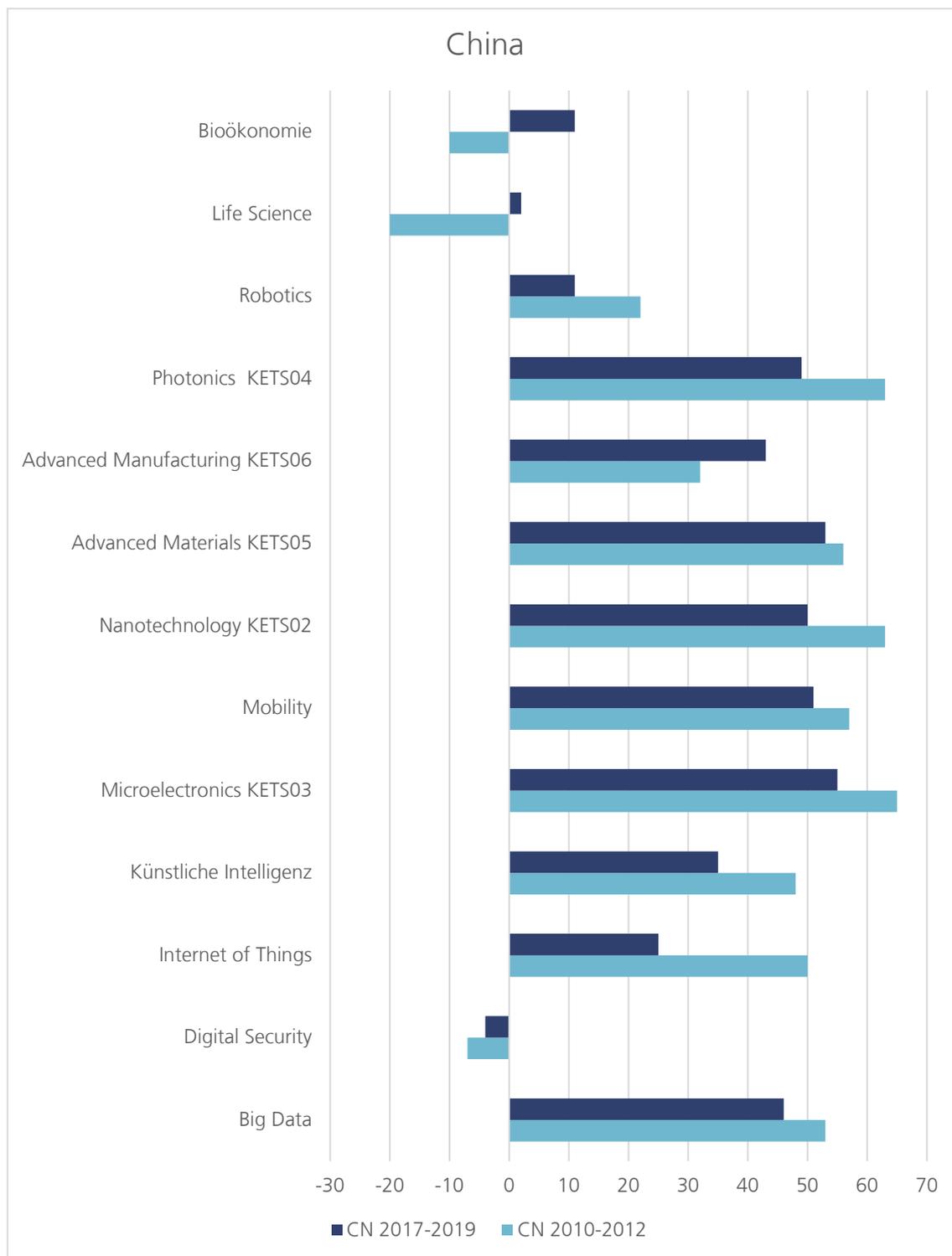
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A55: Publikationen - RLA des jeweiligen Landes (Einzeltechnologien)



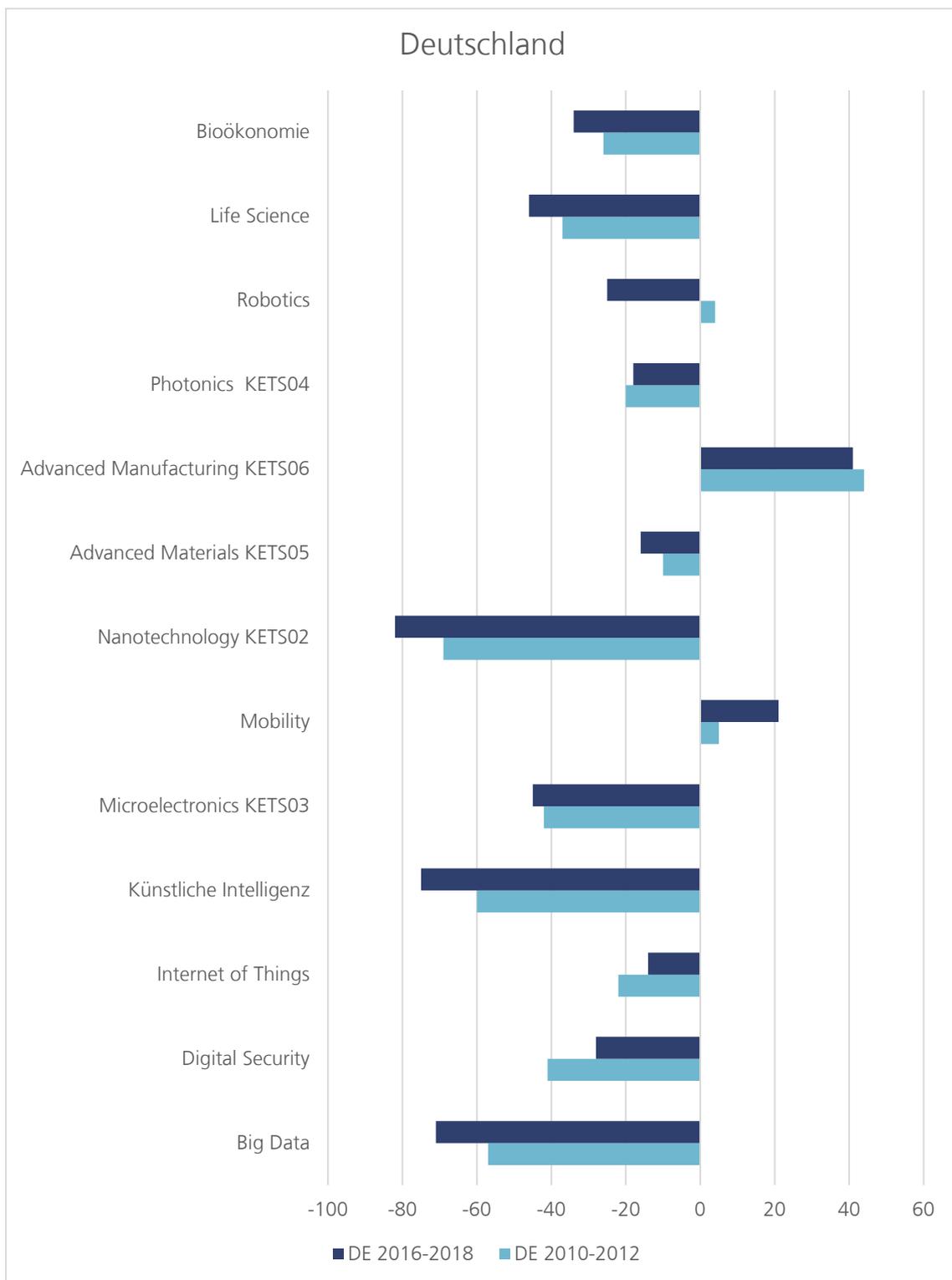
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A56: Publikationen - RLA des jeweiligen Landes (Einzeltechnologien)



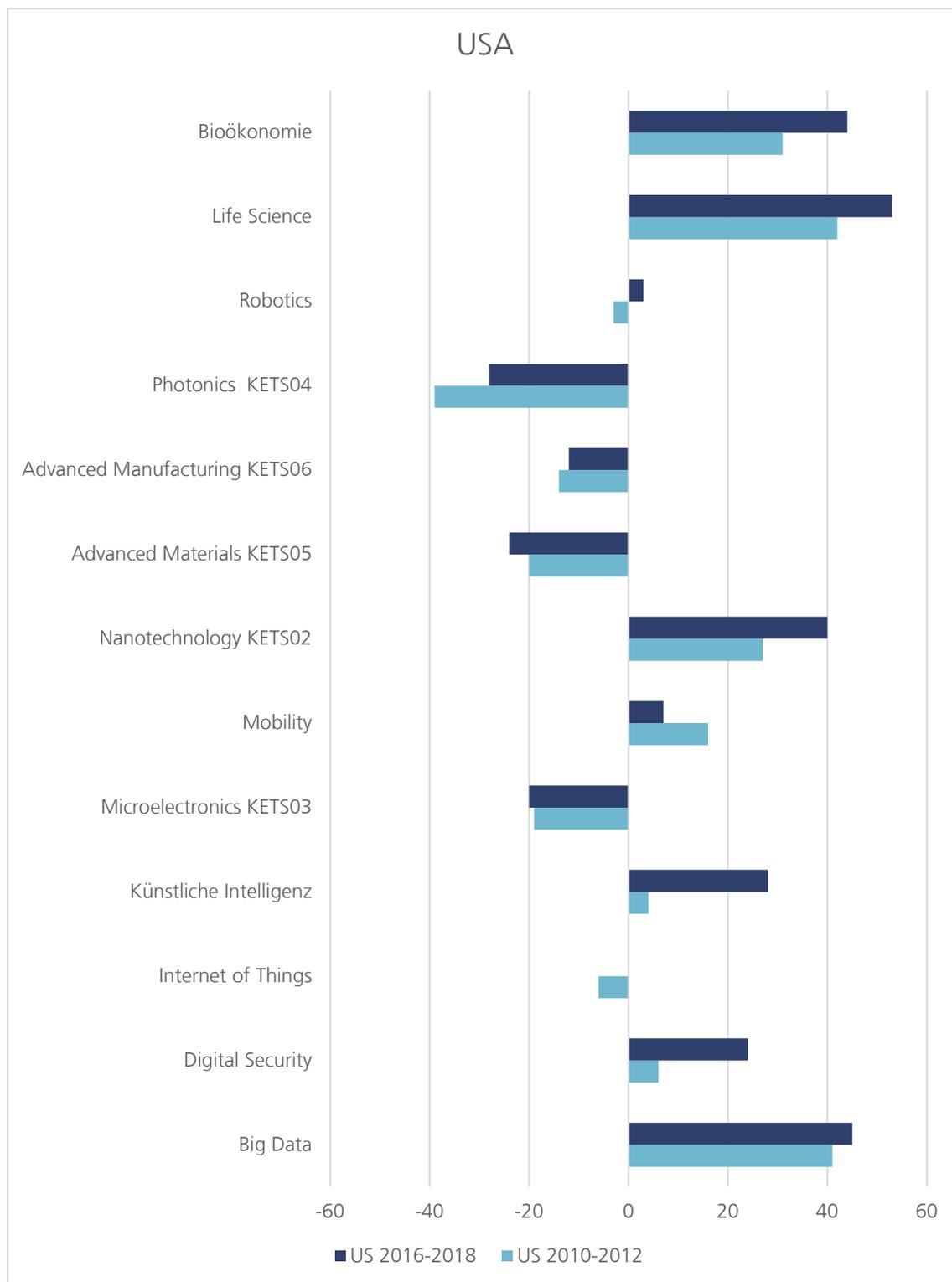
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A57: Patente - RPA des jeweiligen Landes (Einzeltechnologien)



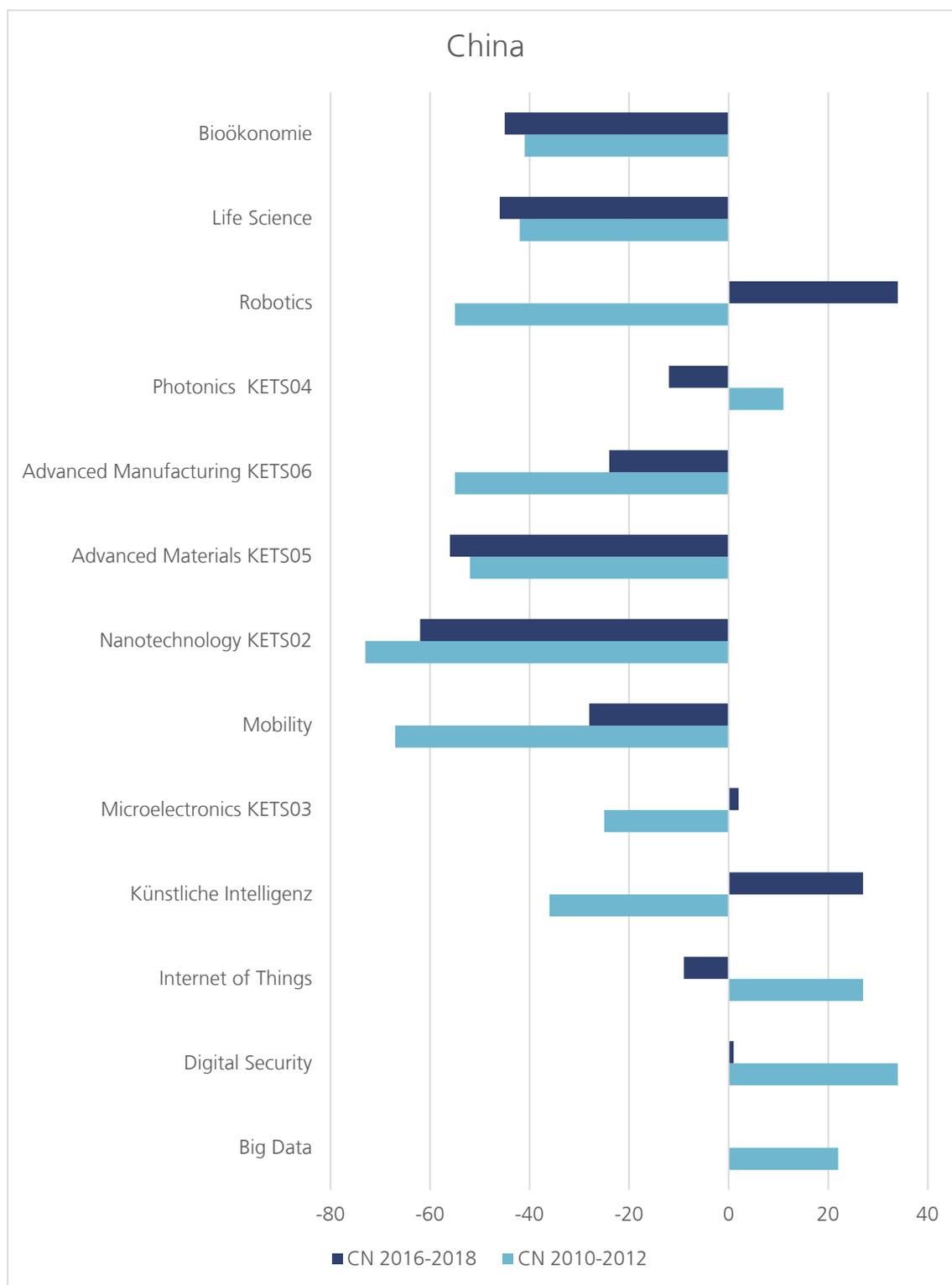
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A58: Patente - RPA des jeweiligen Landes (Einzeltechnologien)



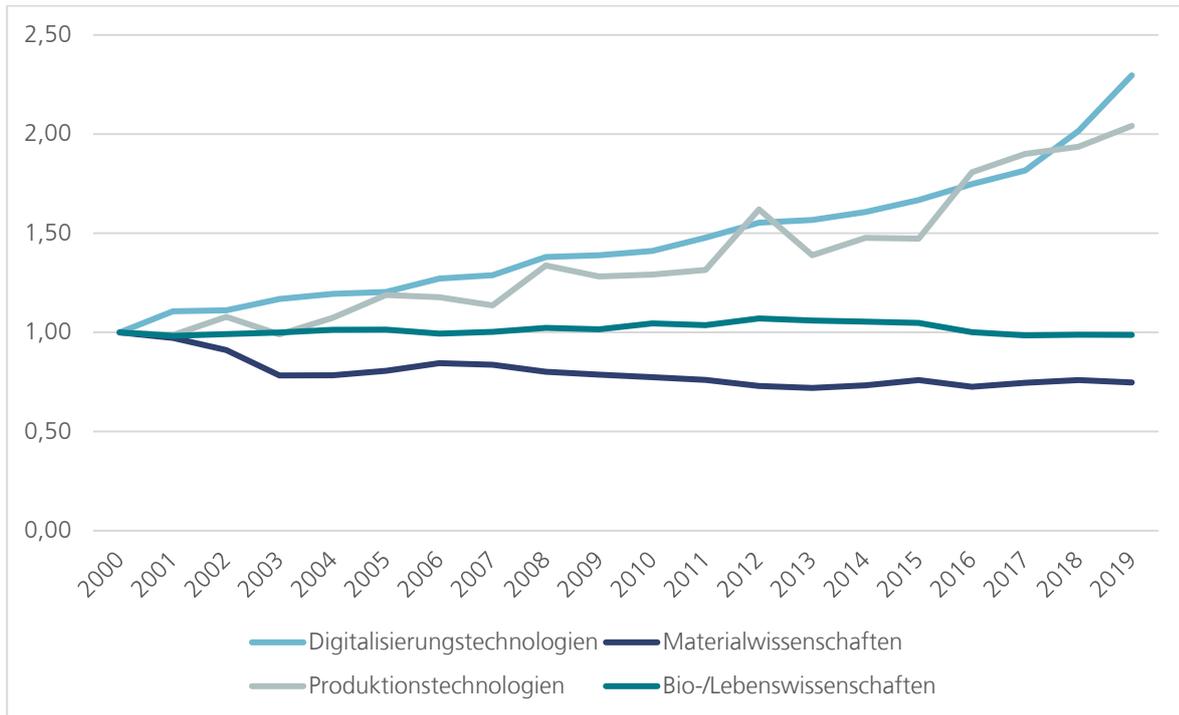
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung A59: Patente - RPA des jeweiligen Landes (Einzeltechnologien)



Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

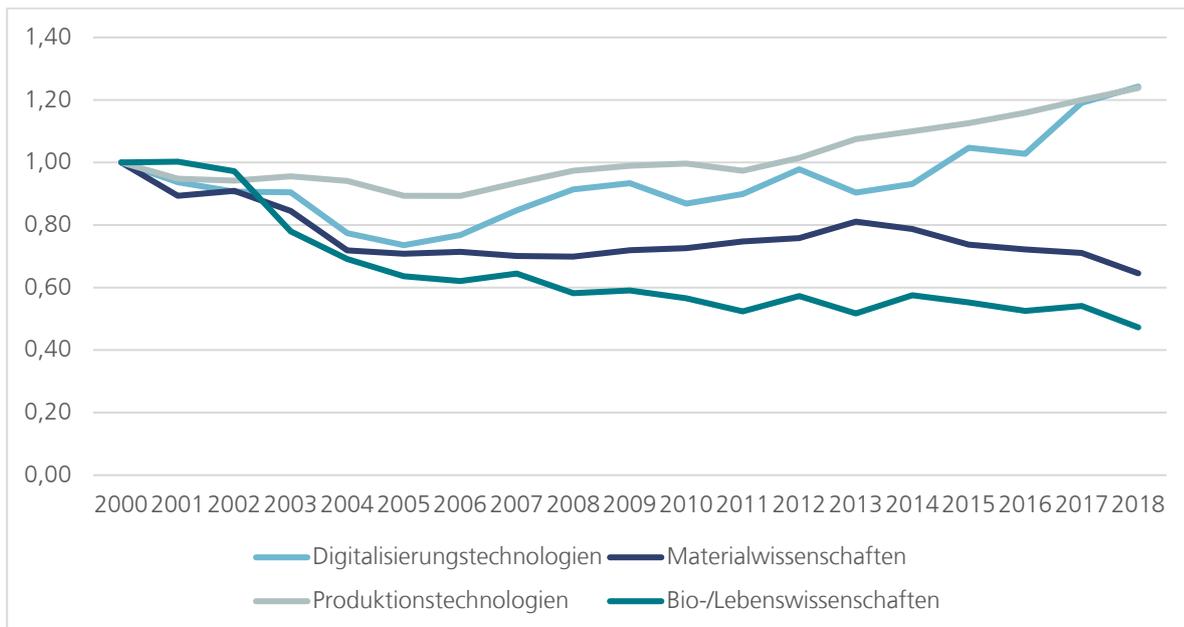
Abbildung A60: Entwicklung der Anteile der vier Schlüsseltechnologiebereiche am Publikationsaufkommen in Deutschland (Trend: 2000=1)



Anmerkung: Aufgrund der definitionsbasiert sehr unterschiedlichen Anteile wurde eine Darstellung von Trends gewählt, die ihrerseits keine absoluten Vergleiche zulässt

Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung A61: Entwicklung der Anteile der vier Schlüsseltechnologiebereichen am Patentaufkommen in Deutschland (Trend: 2000=1)

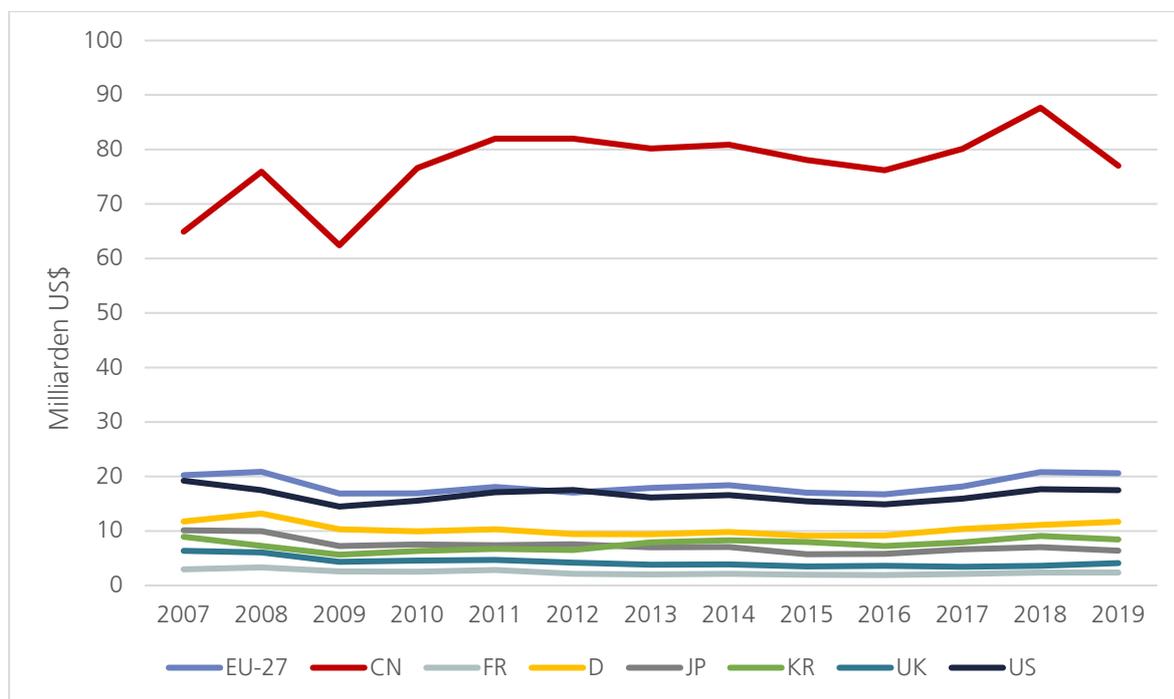


Anmerkung: Aufgrund der definitionsbasiert sehr unterschiedlichen Anteile wurde eine Darstellung von Trends gewählt, die ihrerseits keine absoluten Vergleiche zulässt

Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, auf Basis von EPO PATSTAT

Anhang IV - Detaillierte Ergebnisse, Handelsanalysen

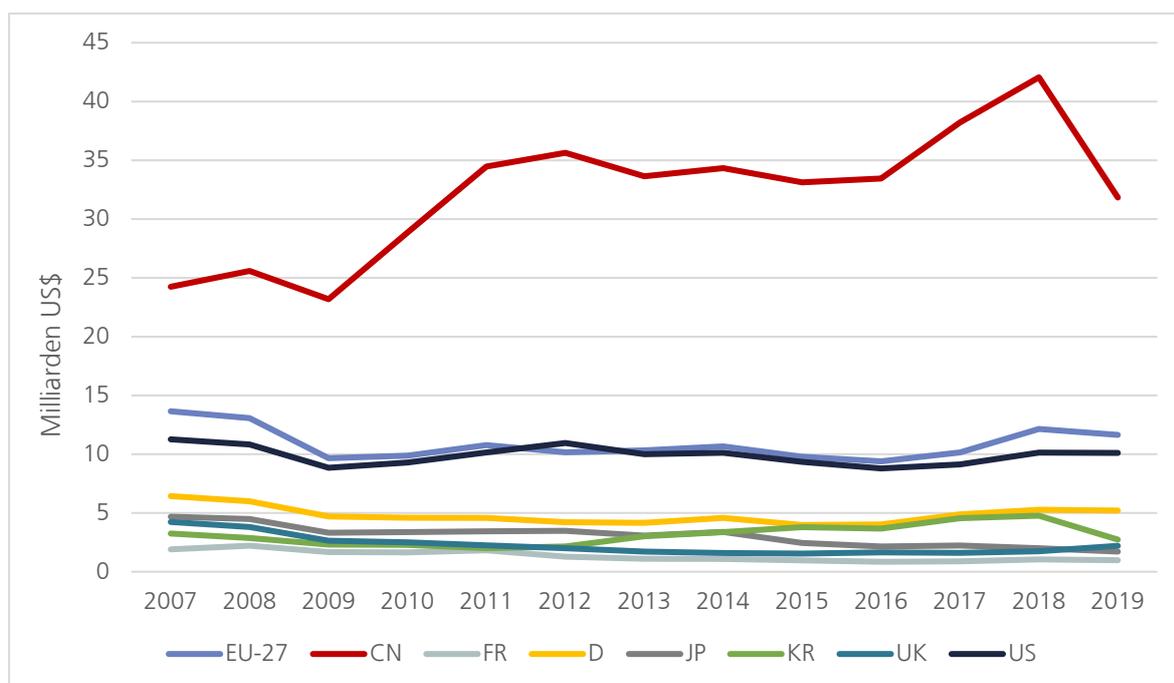
Abbildung A62: Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld künstliche Intelligenz relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

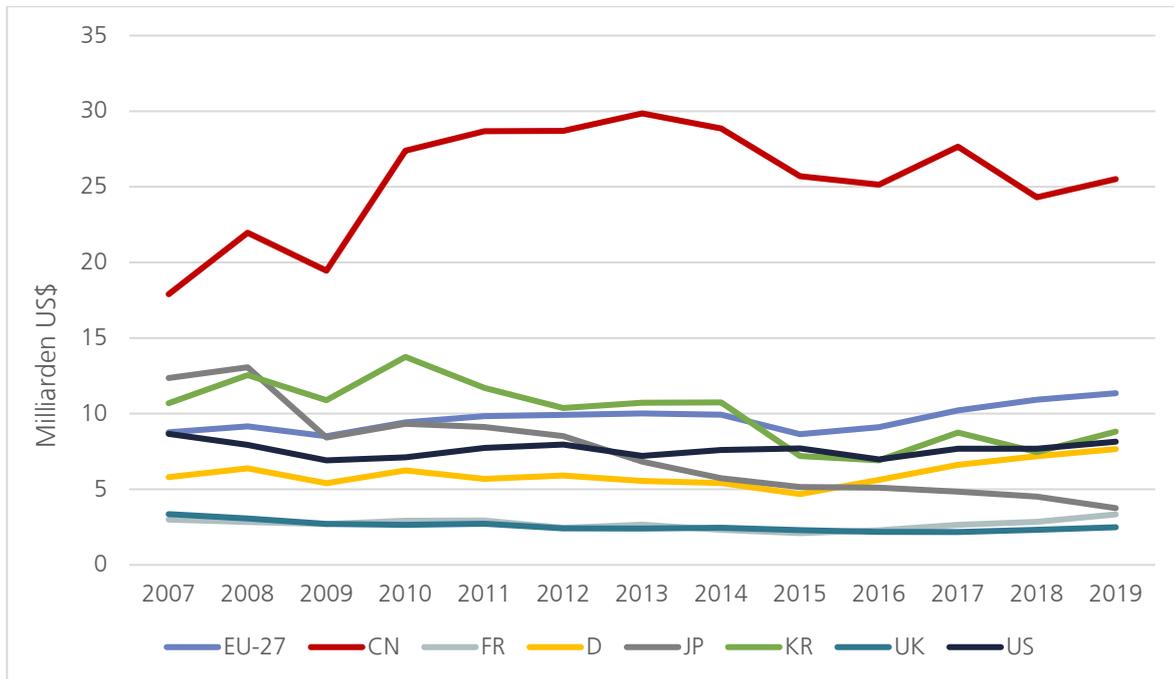
Abbildung A 63: Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Big Data relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

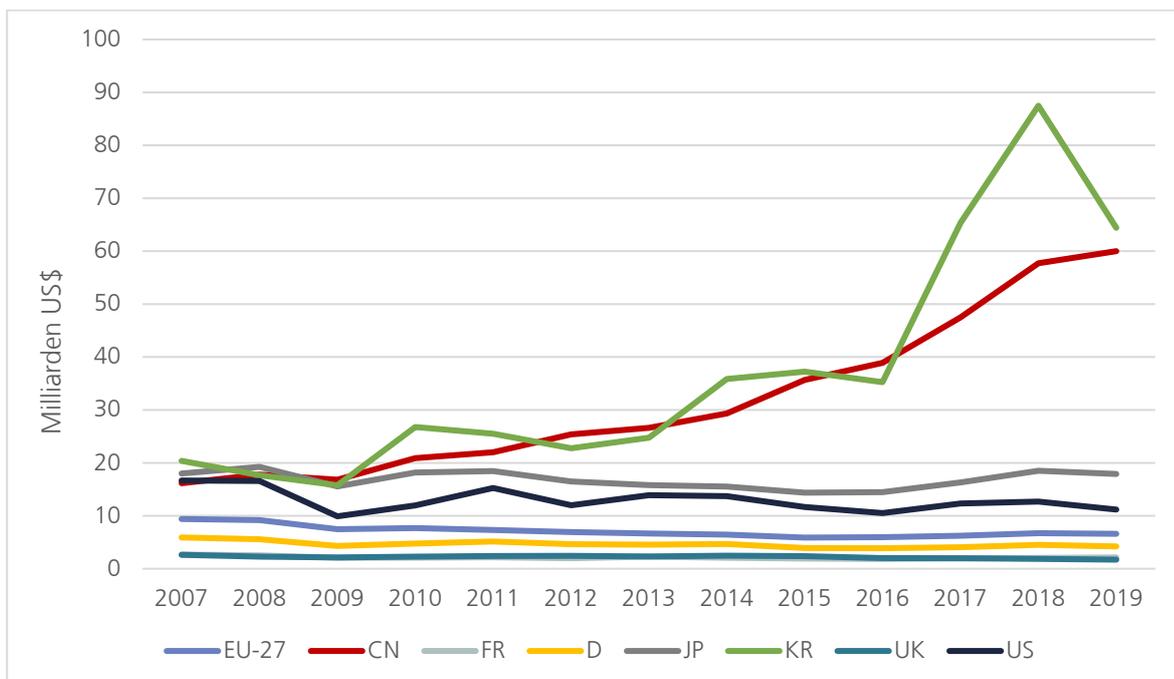
Abbildung A64: Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Digitaler Mobilitätstechnologien relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

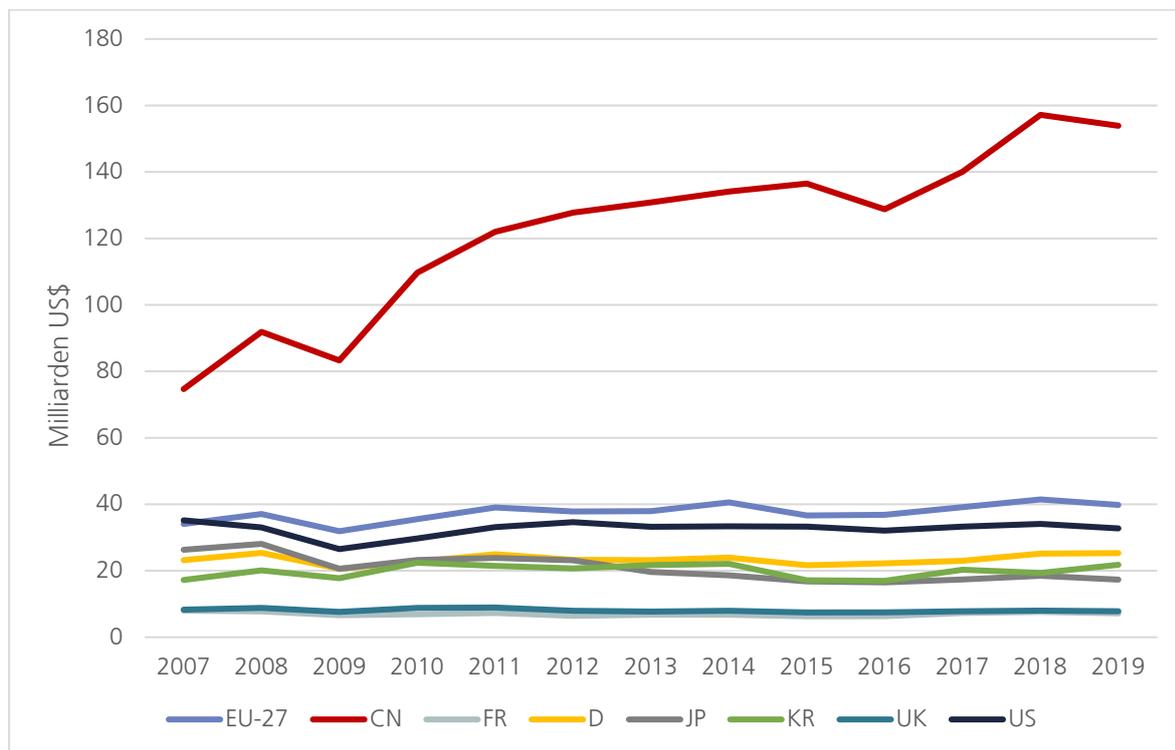
Abbildung A65: Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Digitaler Sicherheitstechnologien relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

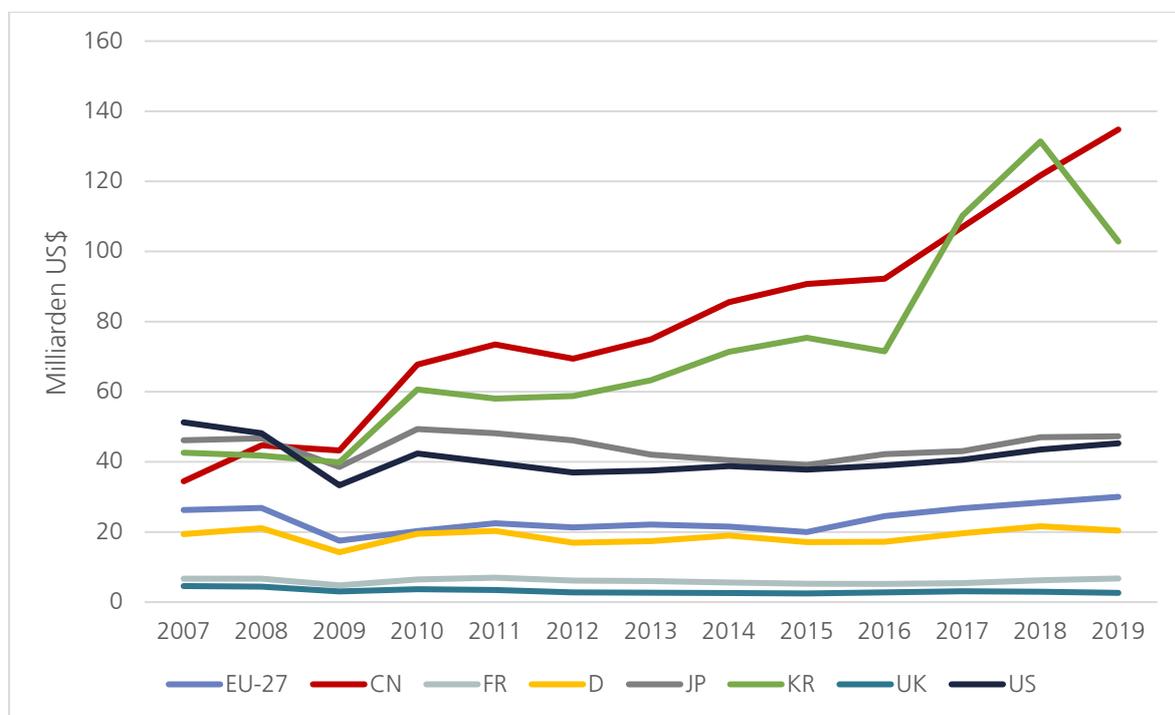
Abbildung A66: Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Internet of Things relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

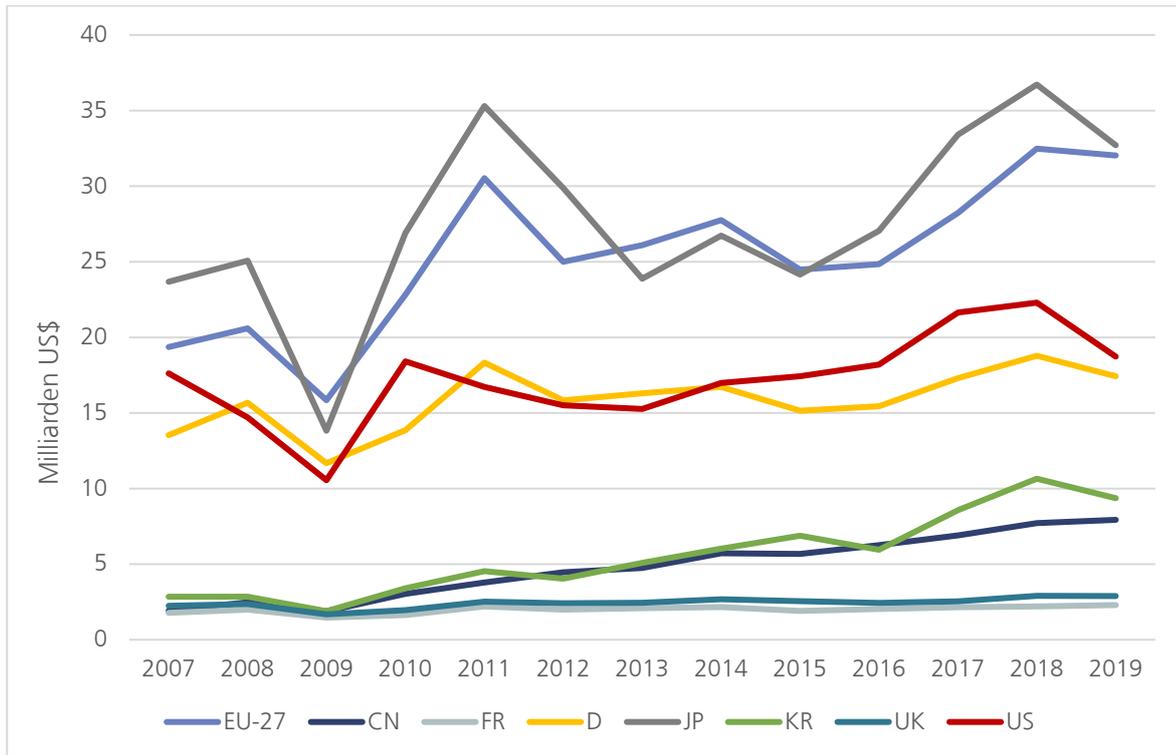
Abbildung A67: Entwicklung des globalen Exportaufkommens in der Mikro- u. Nanoelektronik



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

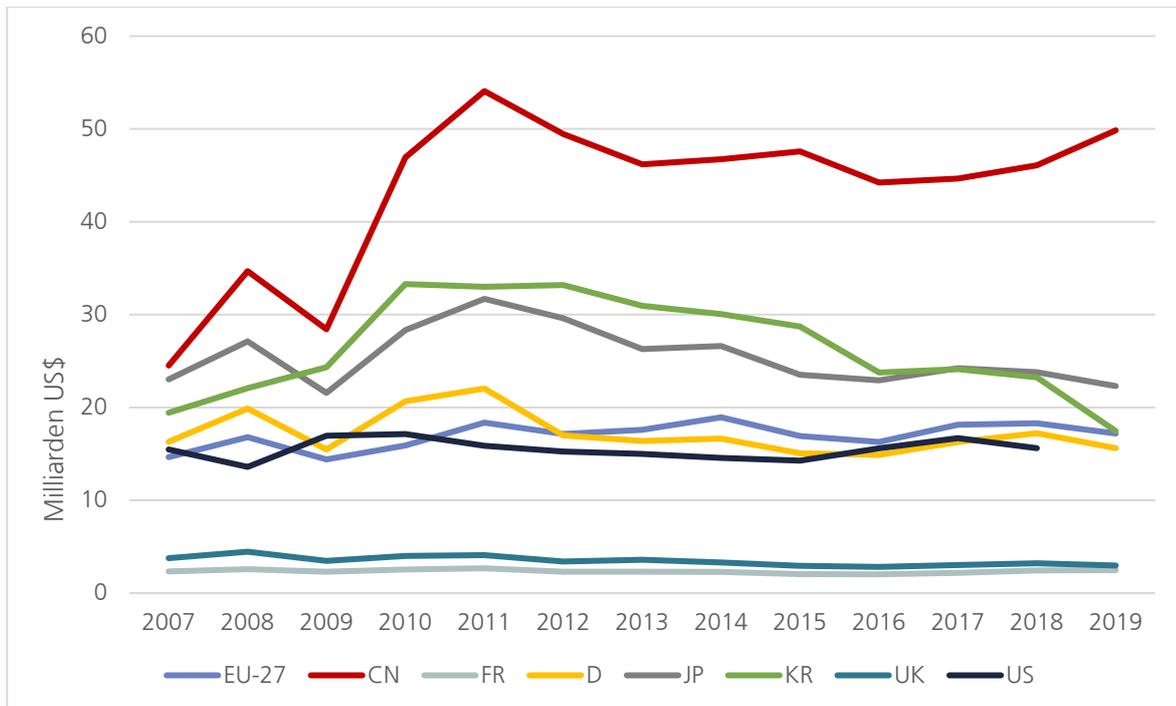
Abbildung A68: Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Advanced Manufacturing relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

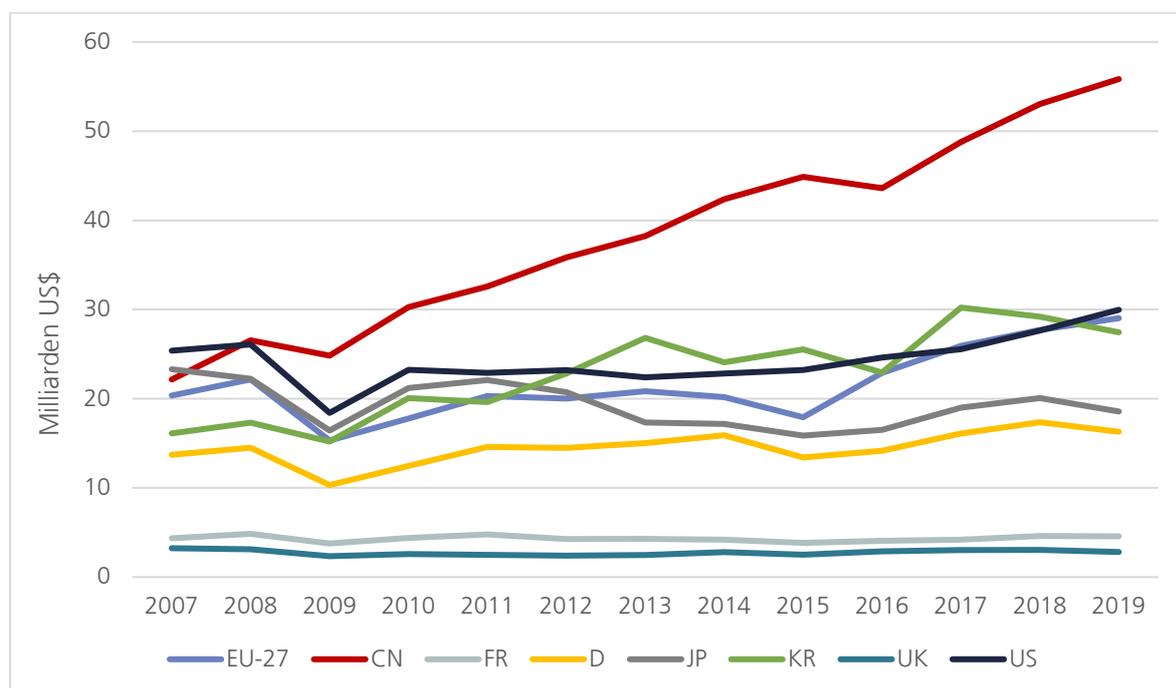
Abbildung A69: Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Photonik relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

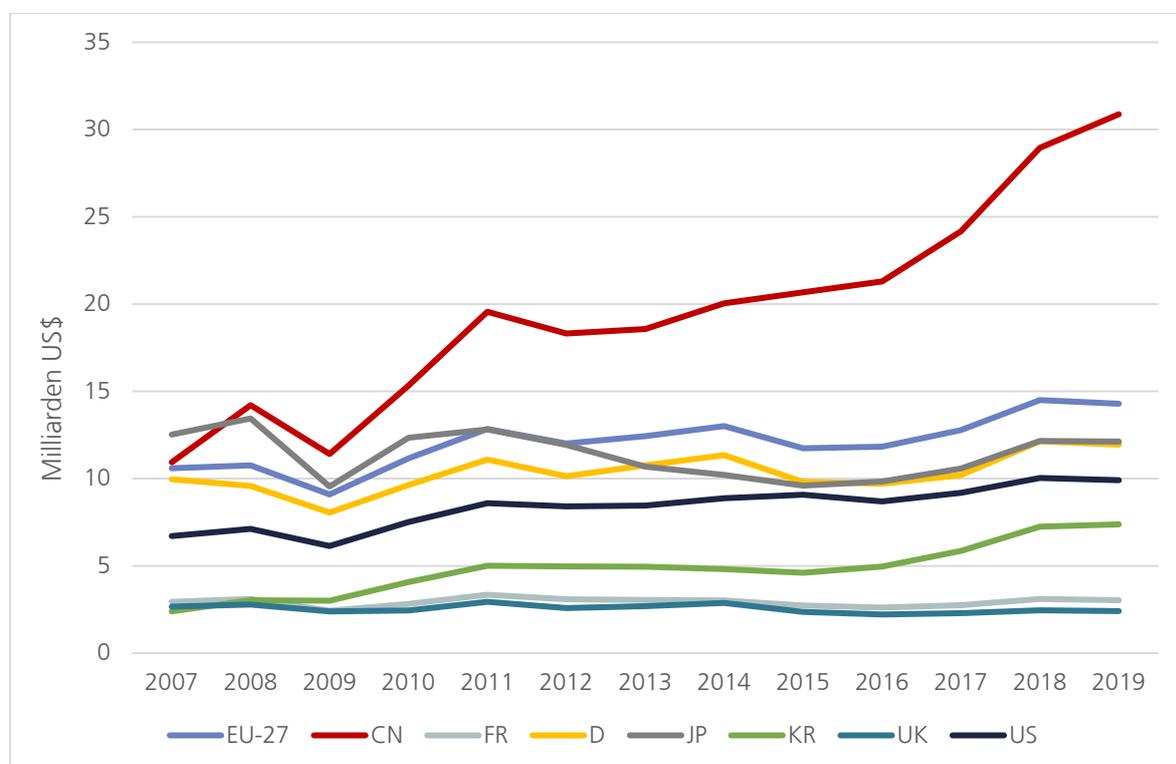
Abbildung A70: Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Robotik relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

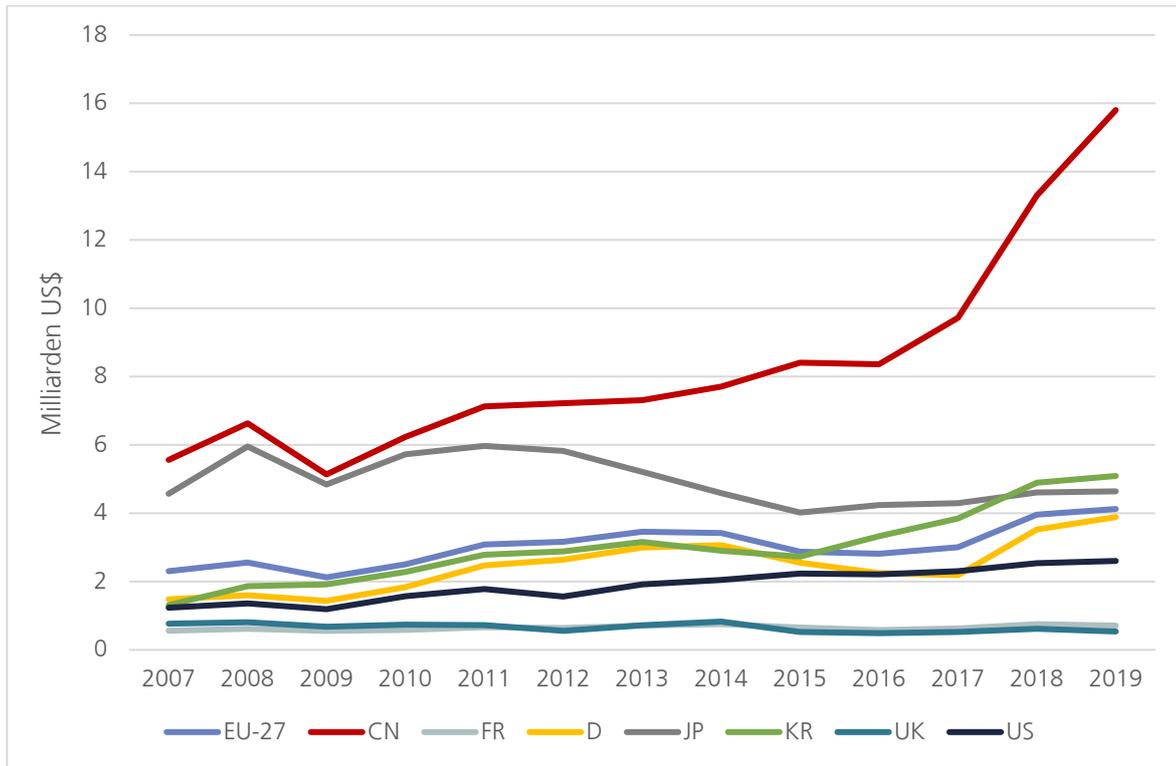
Abbildung A71: Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Neue Materialien relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

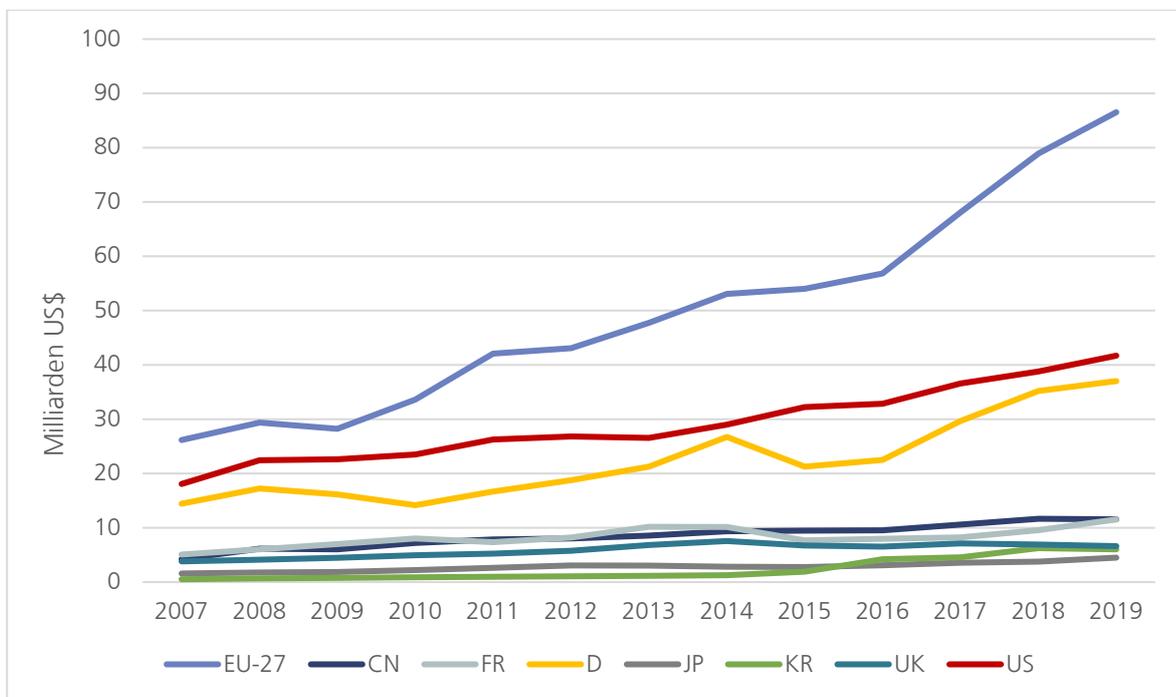
Abbildung A72: Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Bereich der für Lösungen im Feld Nanotechnologie relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

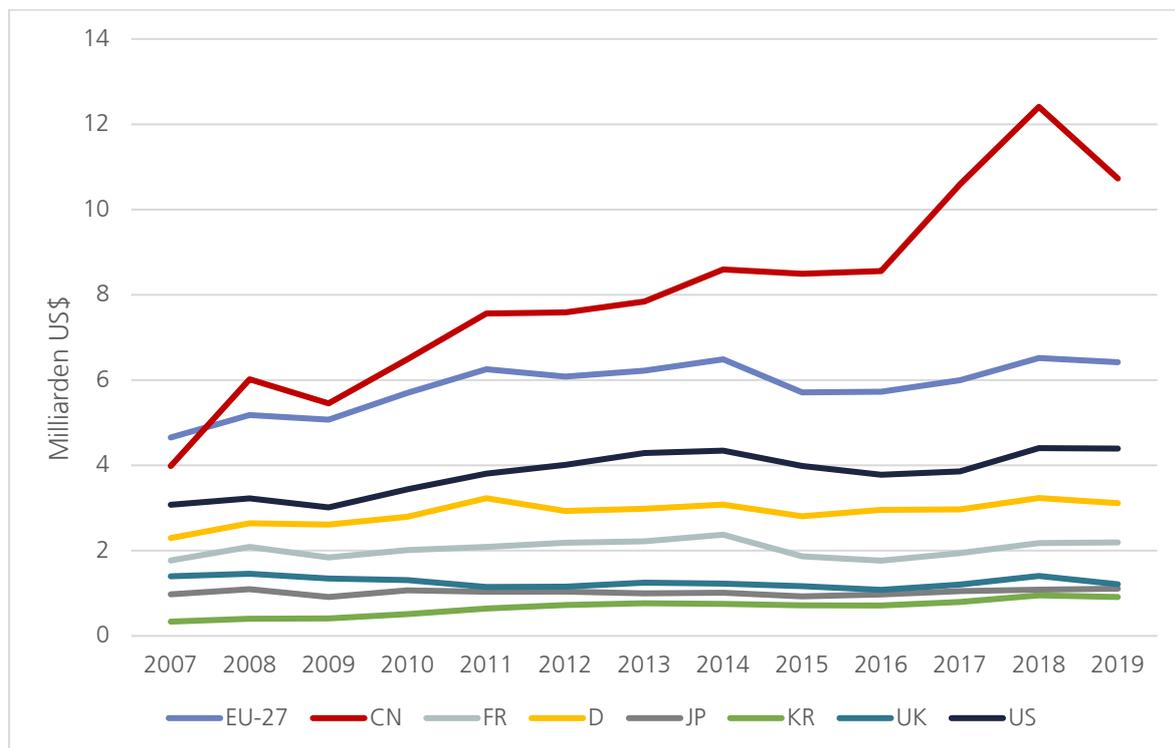
Abbildung A73: Entwicklung des globalen Exportaufkommens im Feld Lebenswissenschaften



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

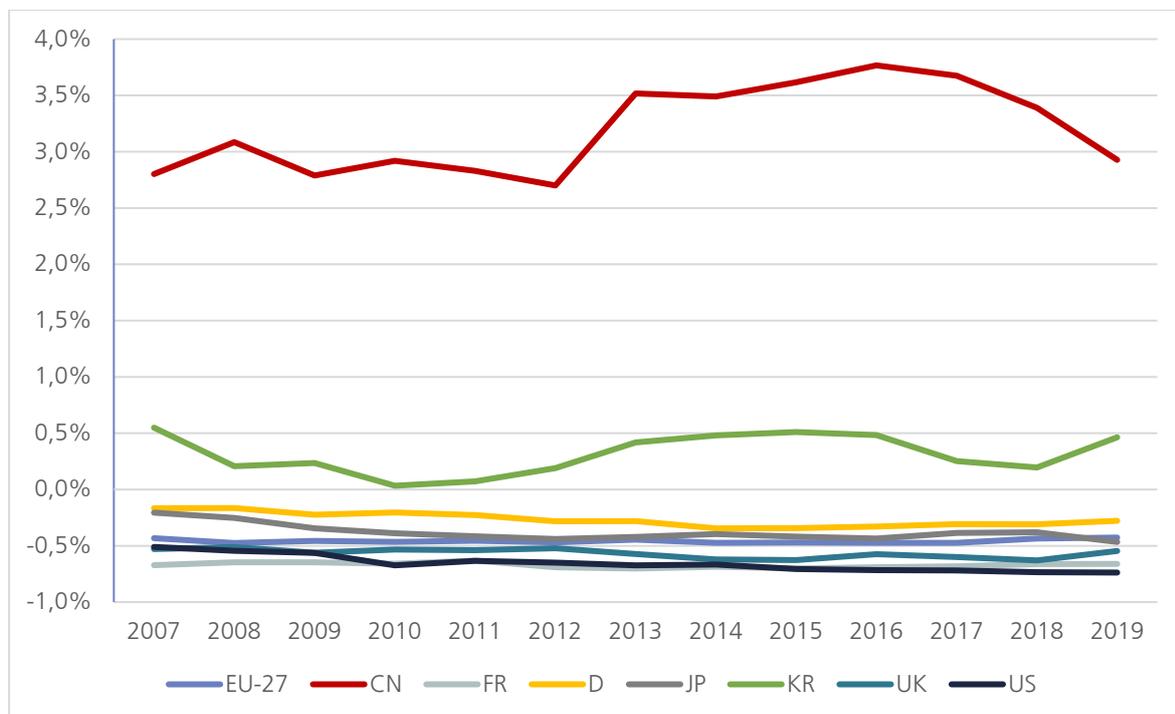
Abbildung A74: Entwicklung des globalen Exportaufkommens hinsichtlich für den Bereich Bioökonomie relevanter Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

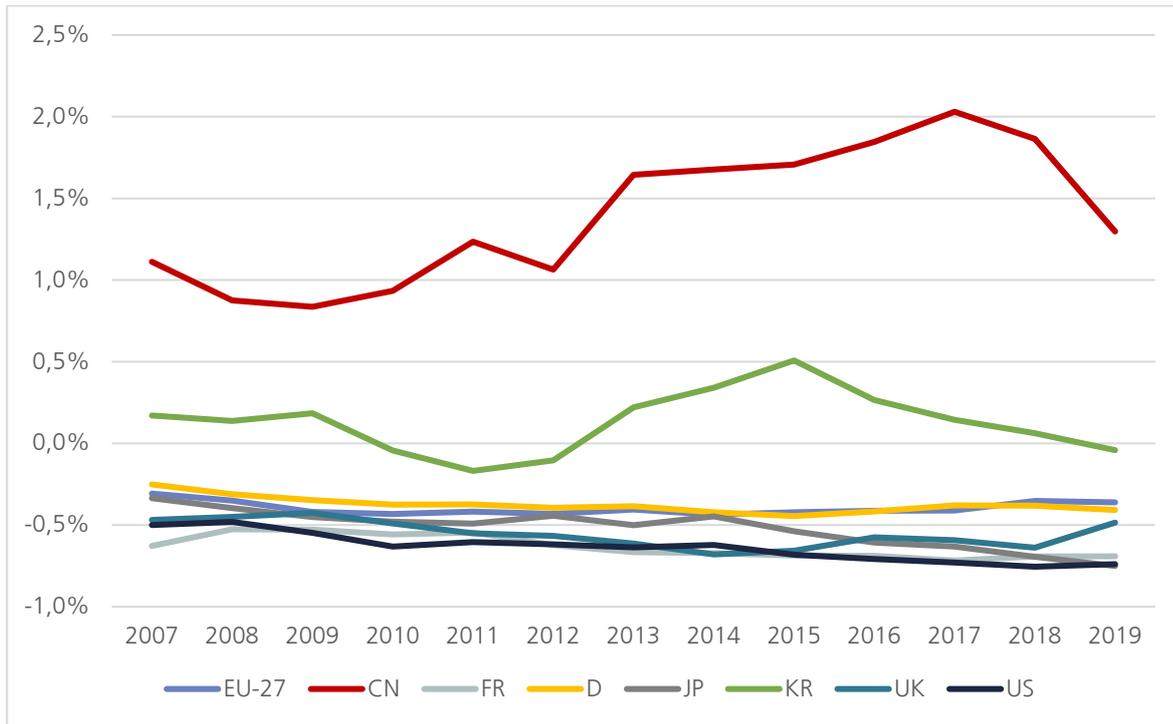
Abbildung A75: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Künstliche Intelligenz relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

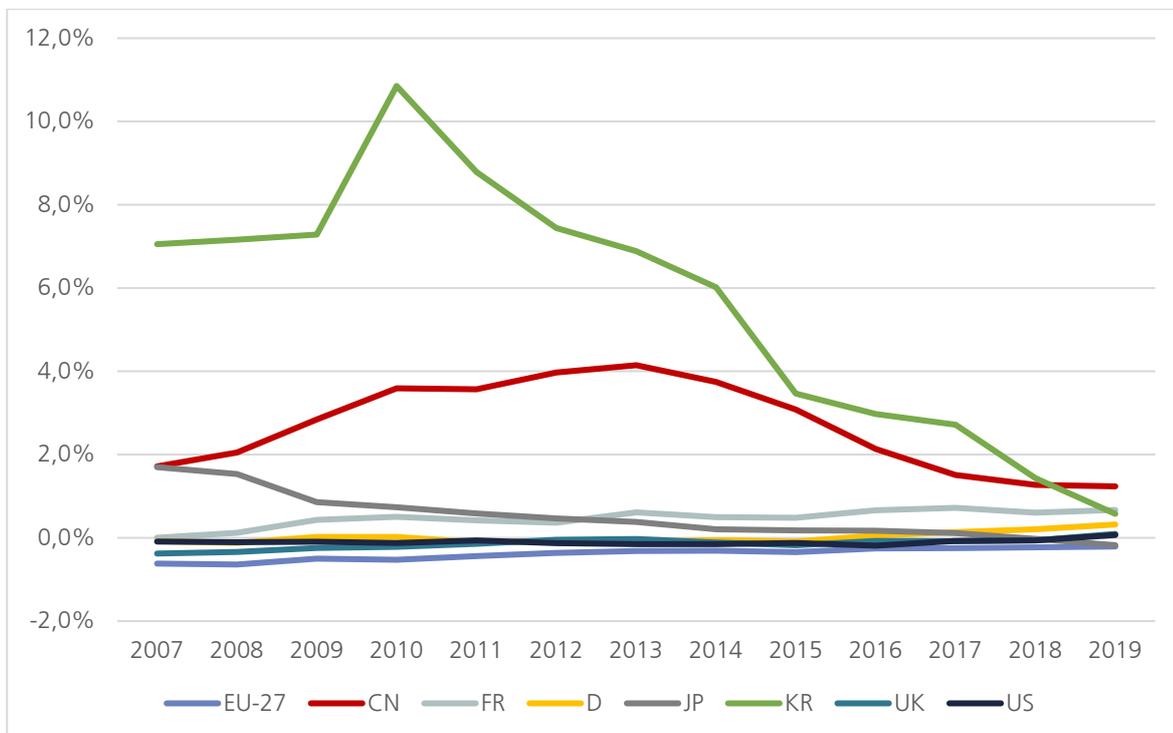
Abbildung A76: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Big Data relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

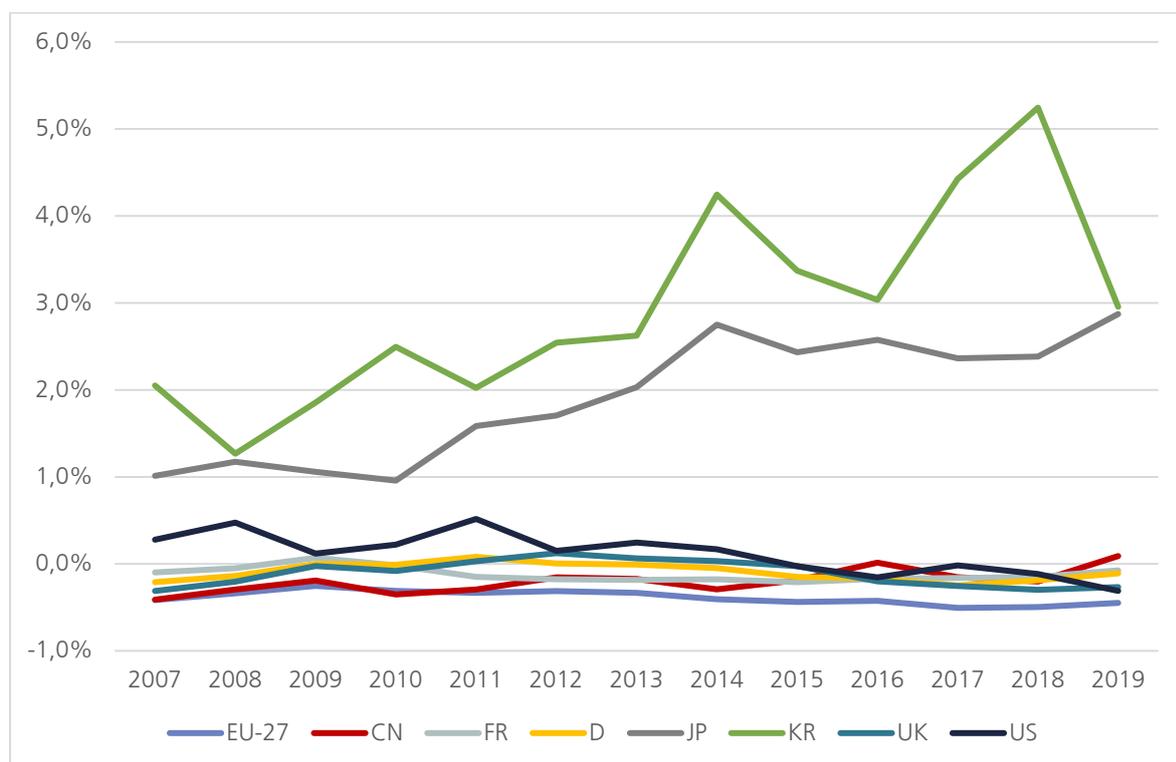
Abbildung A77: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Digitaler Mobilitätstechnologien relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

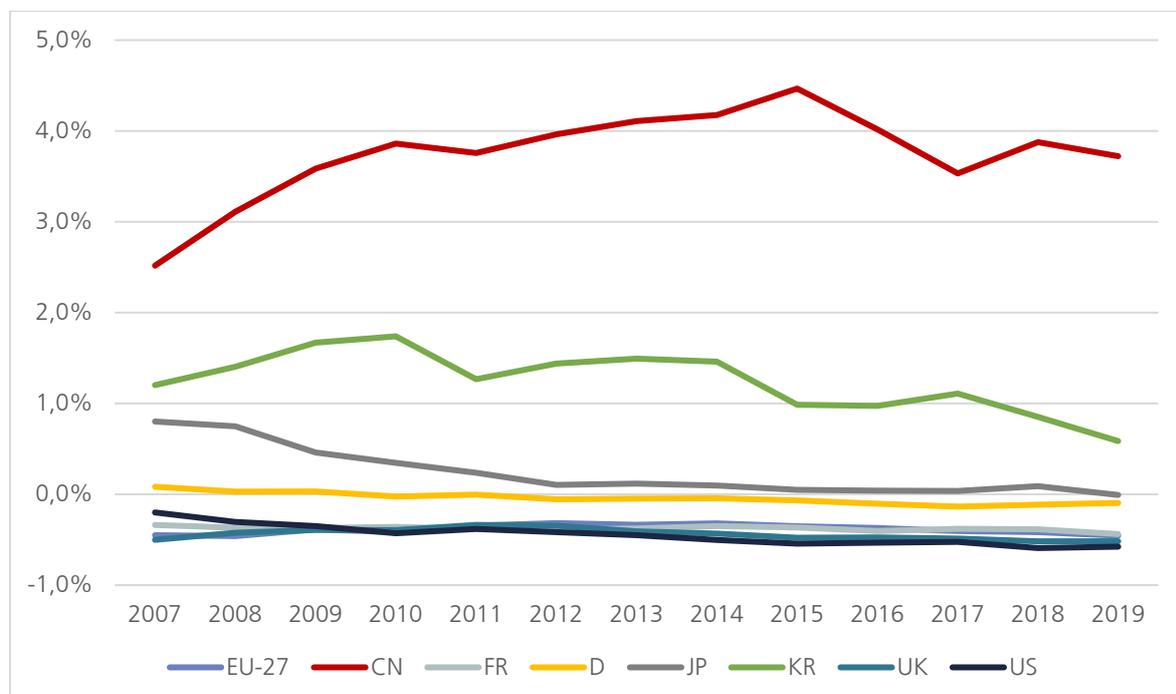
Abbildung A78: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Digitaler Sicherheitstechnologien relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

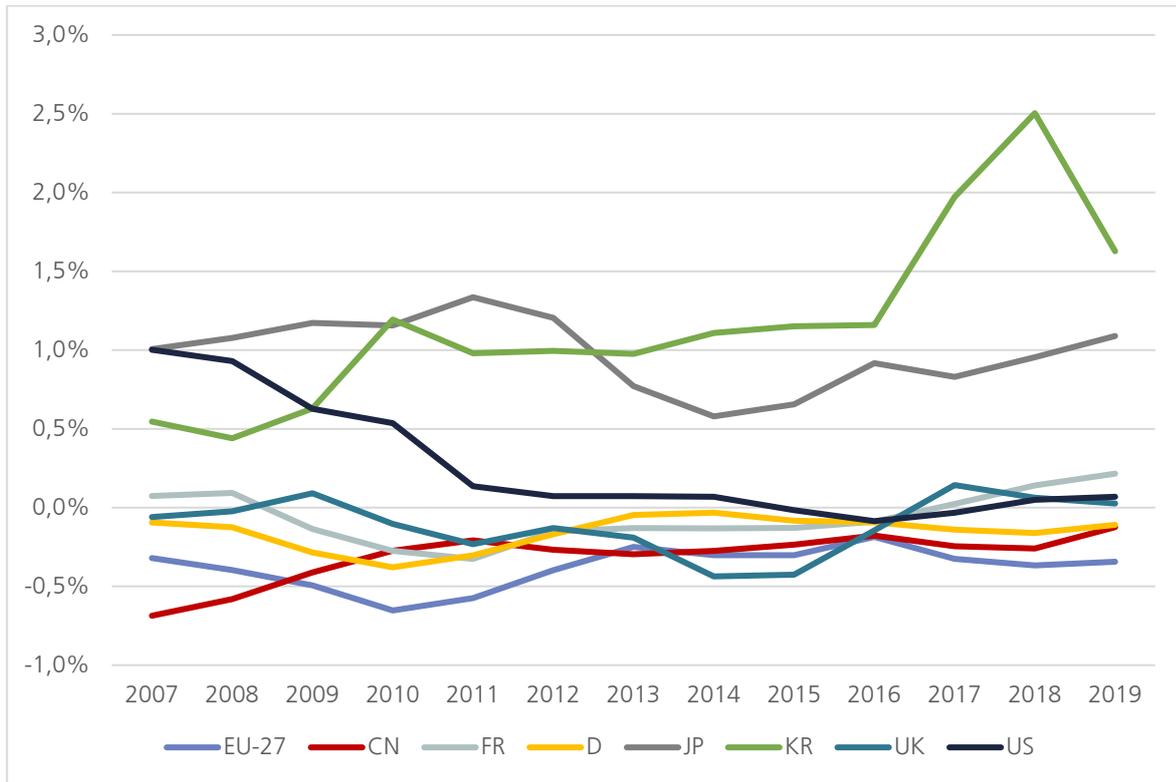
Abbildung A79: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Internet of Things relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

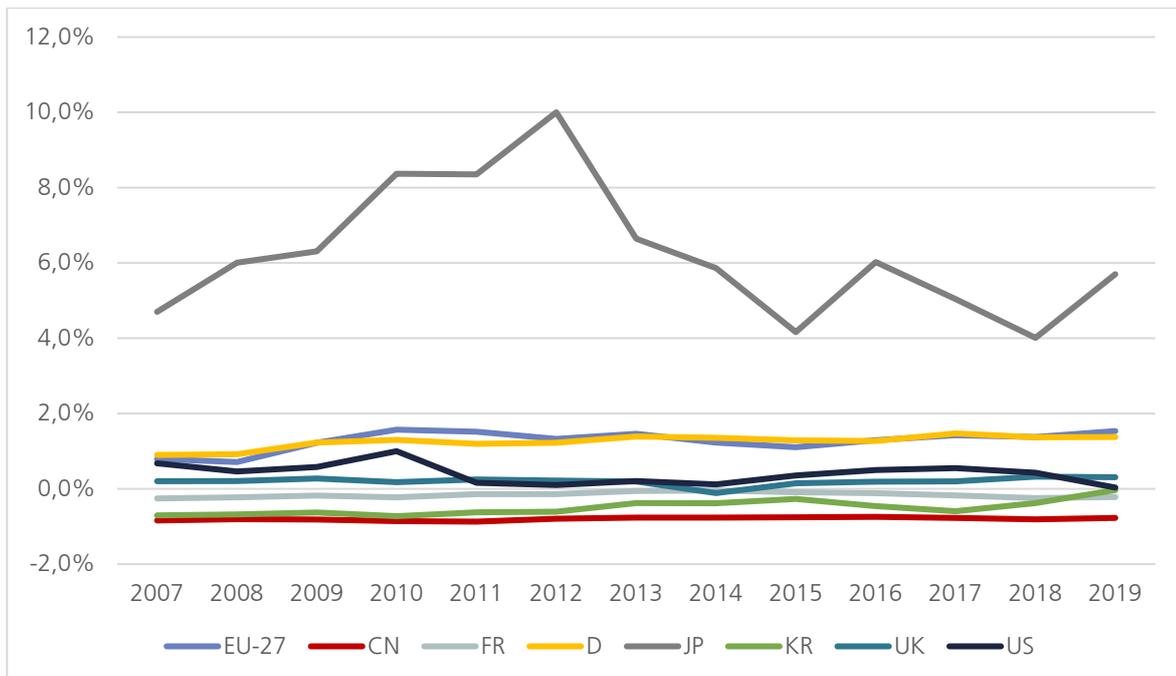
Abbildung A80: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen in der Mikro- u. Nanoelektronik



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

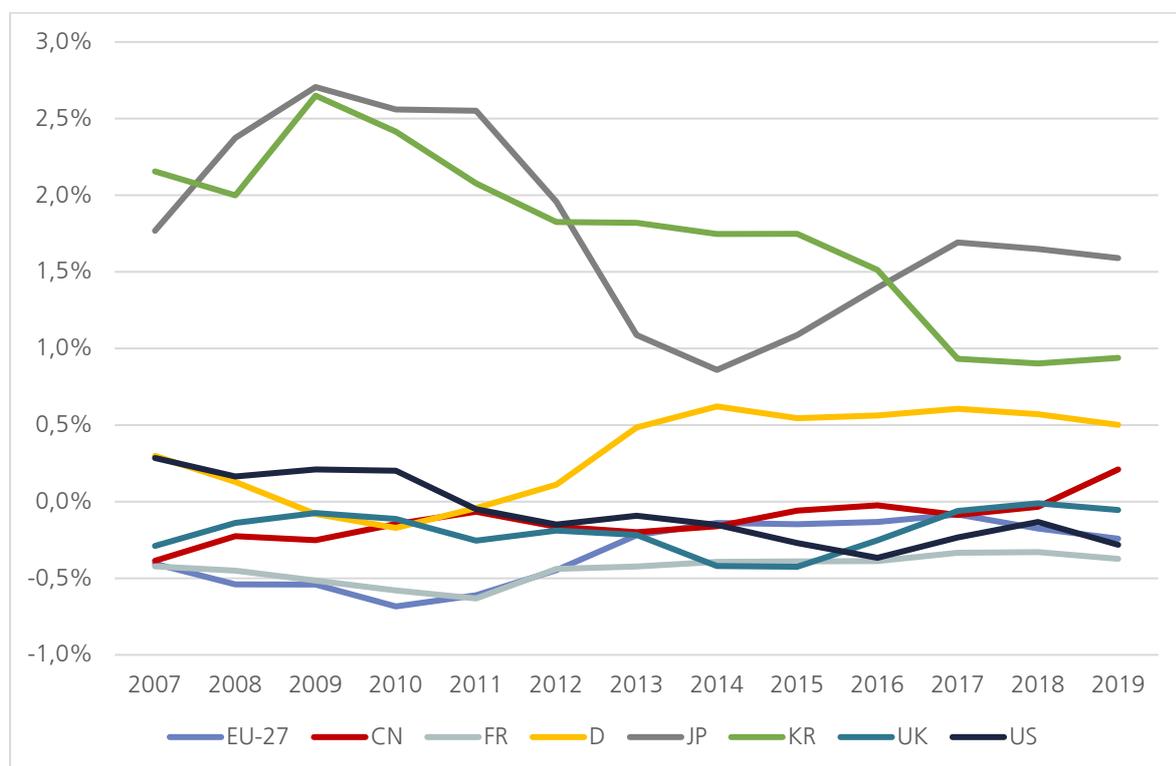
Abbildung A81: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Advanced Manufacturing relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

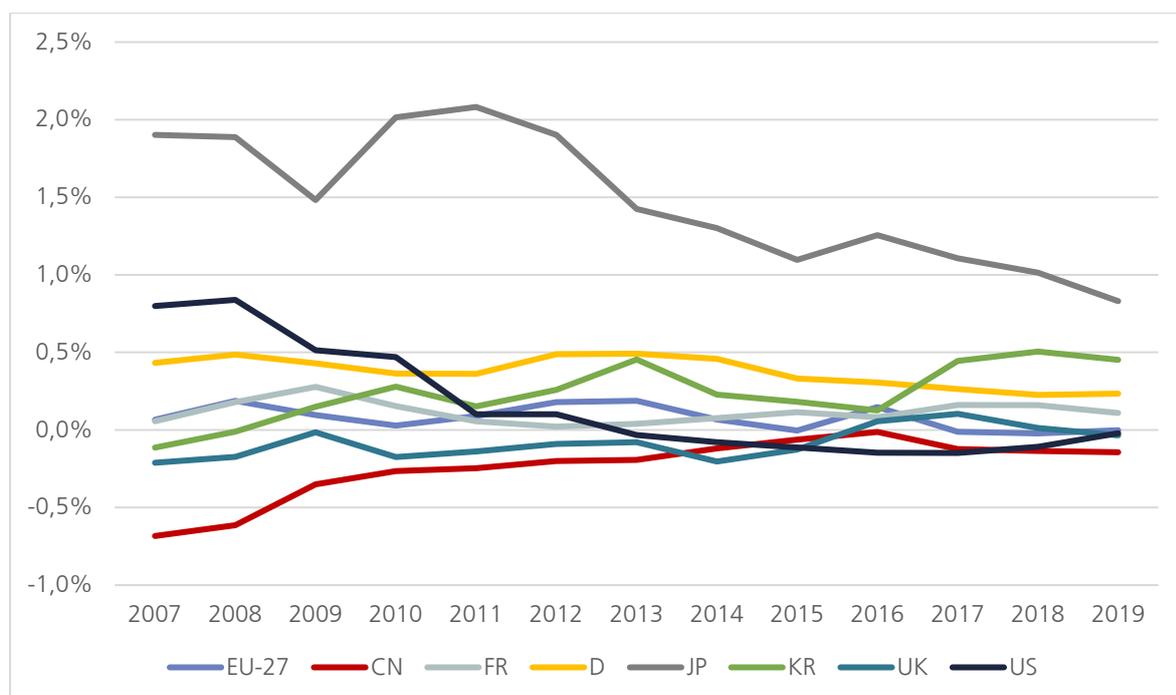
Abbildung A82: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Photonik relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

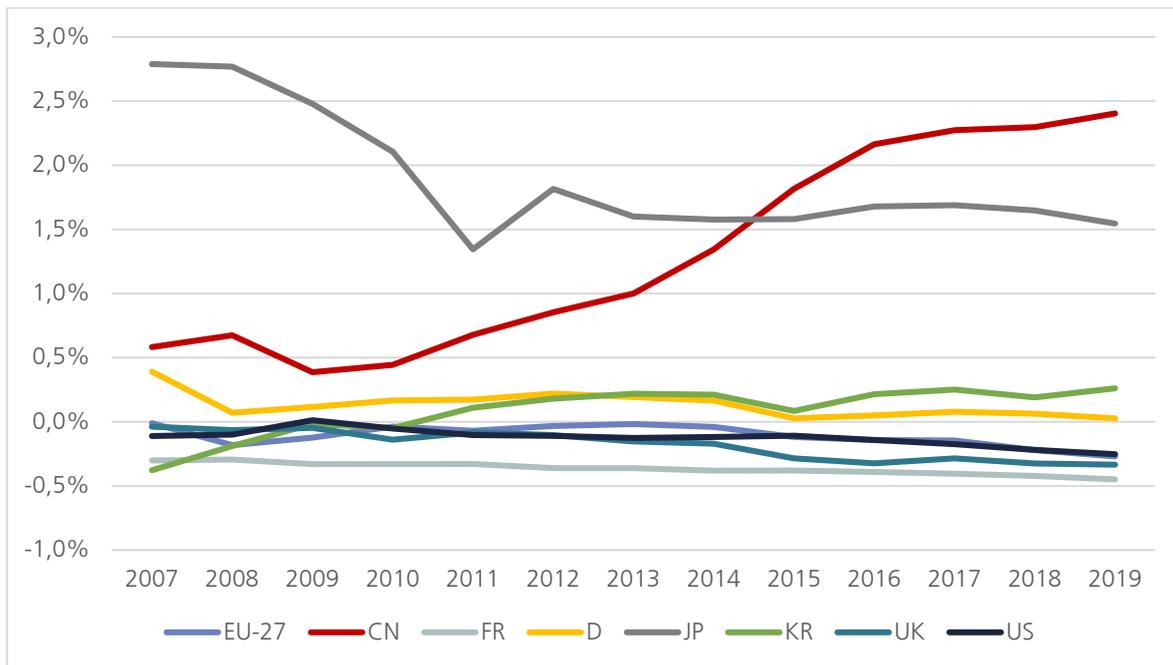
Abbildung A83: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Robotik relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

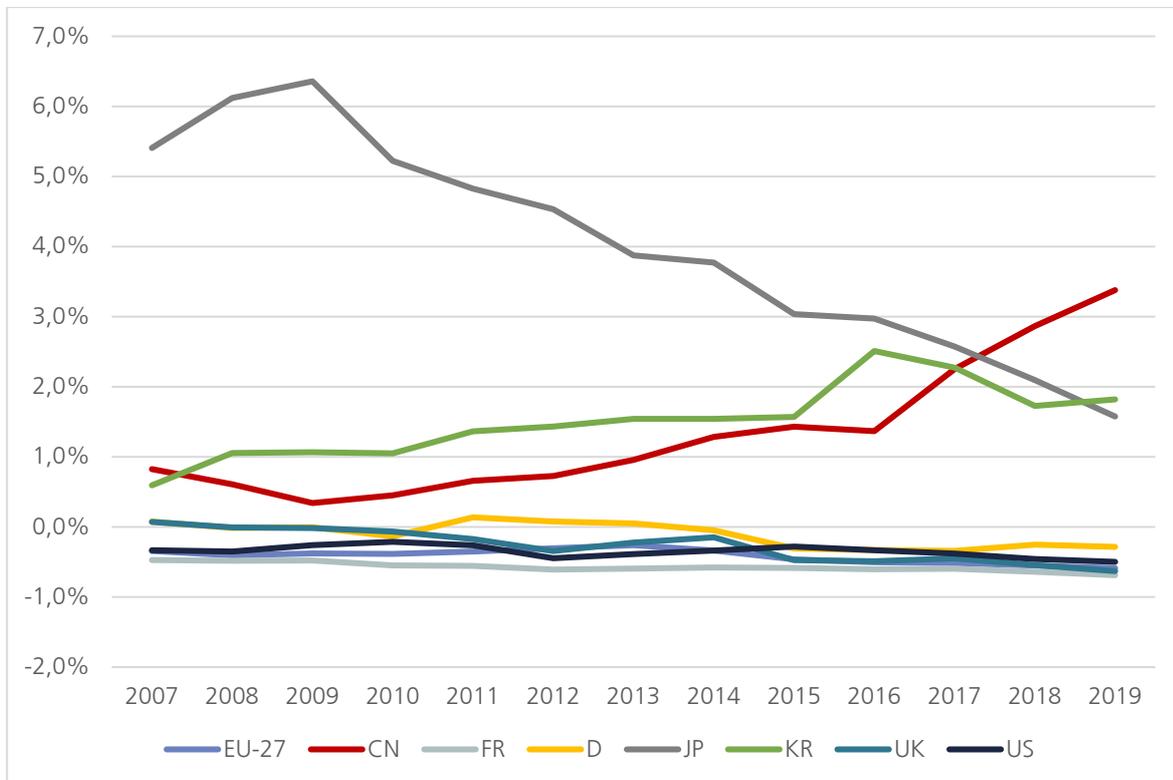
Abbildung A84: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Neue Materialien relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

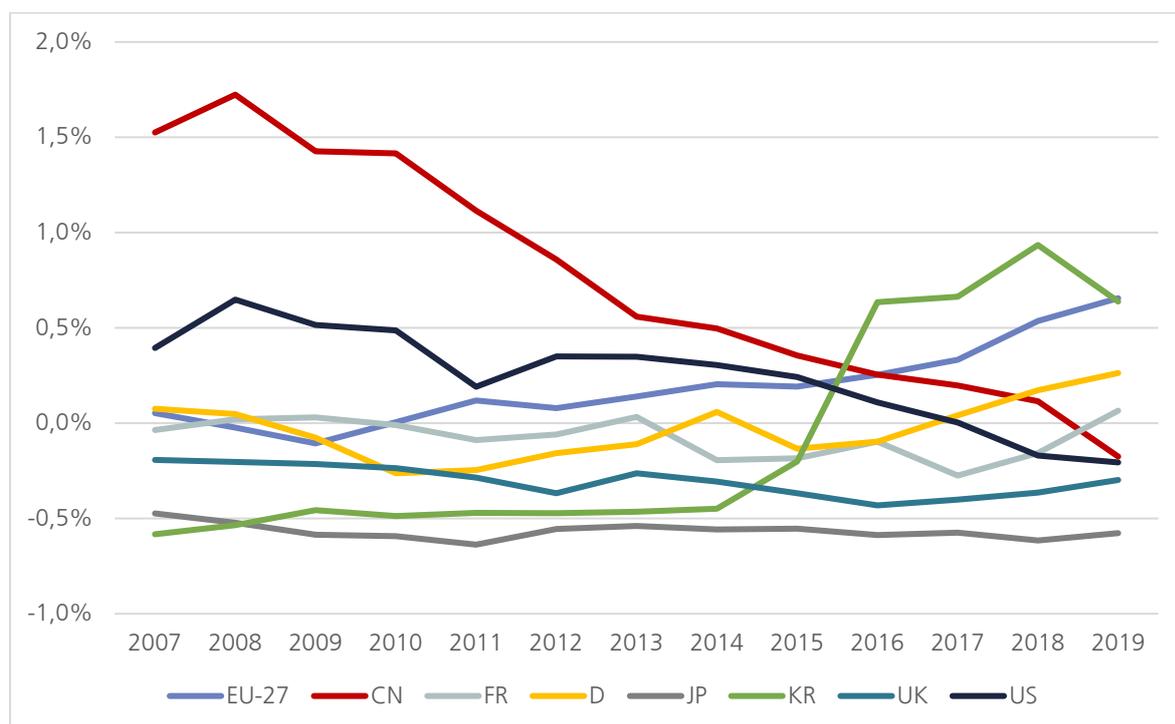
Abbildung A85: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Bereich der für Lösungen im Feld Nanotechnologie relevanten Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

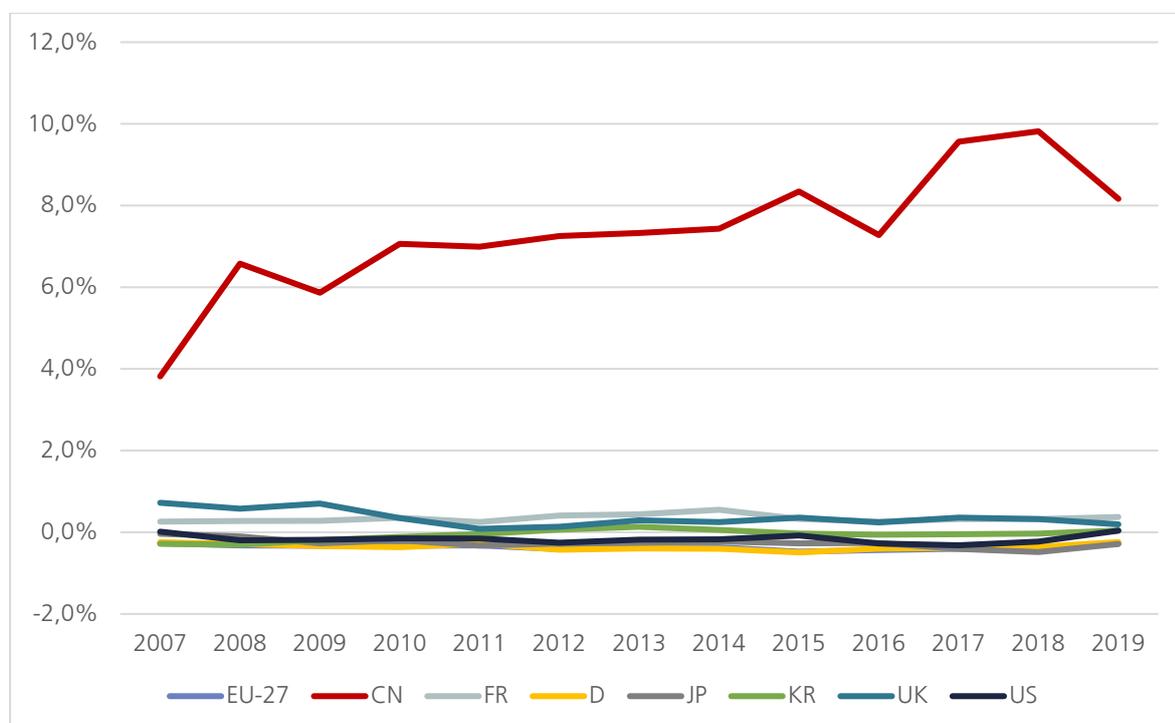
Abbildung A86: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen im Feld Lebenswissenschaften



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

Abbildung A87: Entwicklung der relativen Handelsbilanzen hinsichtlich für den Bereich Bioökonomie relevanter Gütergruppen



Anmerkung: China ohne Hong Kong

Quelle: Auswertungen TU Berlin/Fraunhofer ISI, auf Basis von UN COMTRADE

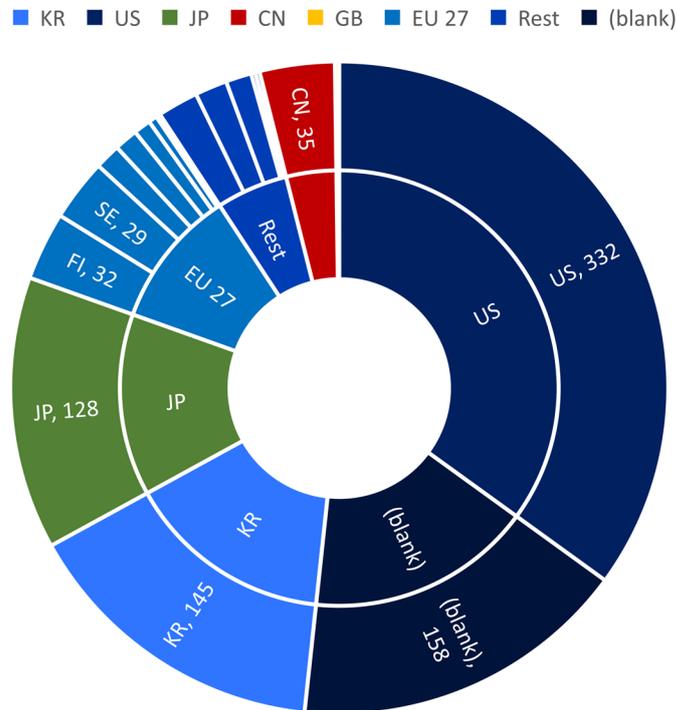
Anhang V - Detaillierte Ergebnisse, Standardisierung

Abbildung A88: Nationale Leitungspositionen in internationalen Standardisierungsorganisationen in den vier Schlüsseltechnologiebereichen

	ISO	Lead	IEC	Lead	ITU	Lead
Advanced Manufacturing KETS06	ISO/TC 261 Additive manufacturing	GERMANY	SyC SM Smart Manufacturing	United States	SG5 - Environment and circular economy	China
Advanced Materials KETS05	ISO/TC 334 Reference materials	SOUTH AFRICA				
Big Data	ISO/IEC JTC 1/SC 32	UNITED STATES	ISO/IEC JTC 1/SC 32		SG20 - IoT, smart cities & communities	United Arab Emirates
Bioeconomy					SG3 - Economic and policy issues	Japan
Biotechnology	ISO/TC 276 Biotechnology	GERMANY				
Digital Security	ISO/IEC JTC 1/SC 27	GERMANY	ISO/IEC JTC 1/SC 27	GERMANY	SG17 - Security	Korea
Internet of Things (IOT)	ISO/IEC JTC 1/SWG 5	UNITED STATES	ISO/IEC JTC 1/SC 41	KOREA, REPUBLIC OF	SG20 - IoT, smart cities & communities	United Arab Emirates
Artificial Intelligence	ISO/IEC JTC 1/SC 42	UNITED STATES	ISO/IEC JTC 1/SC 42 Artificial Intelligence	UNITED STATES	SG20 - IoT, smart cities & communities	United Arab Emirates
Life Science	ISO/TC 276 Biotechnology	GERMANY				
Microelectronics KETS03	ISO/IEC JTC 1/SC 25 Interconnection of information technology equipment	GERMANY	SC 47F Micro-electromechanical systems	Japan		
Mobility	ISO/TC 204 Intelligent transport systems	UNITED STATES	TC 125 Personal e-Transporters (PeTs)/ TC 69 Electrical power/energy transfer systems for electrically propelled road vehicles and industrial trucks	Belgium	SG15 - Transport, access and home	United States of America
Nanotechnology KETS02	ISO/TC 229 Nanotechnologies	UNITED KINGDOM	TC 113 Nanotechnology for electrotechnical products and systems	GERMANY		
Photonics KETS04	ISO/TC 172/SC 3 Optical materials and components	JAPAN	TC 34 Lighting	UNITED KINGDOM		
Robotics	ISO/TC 299 Robotics	SWEDEN				

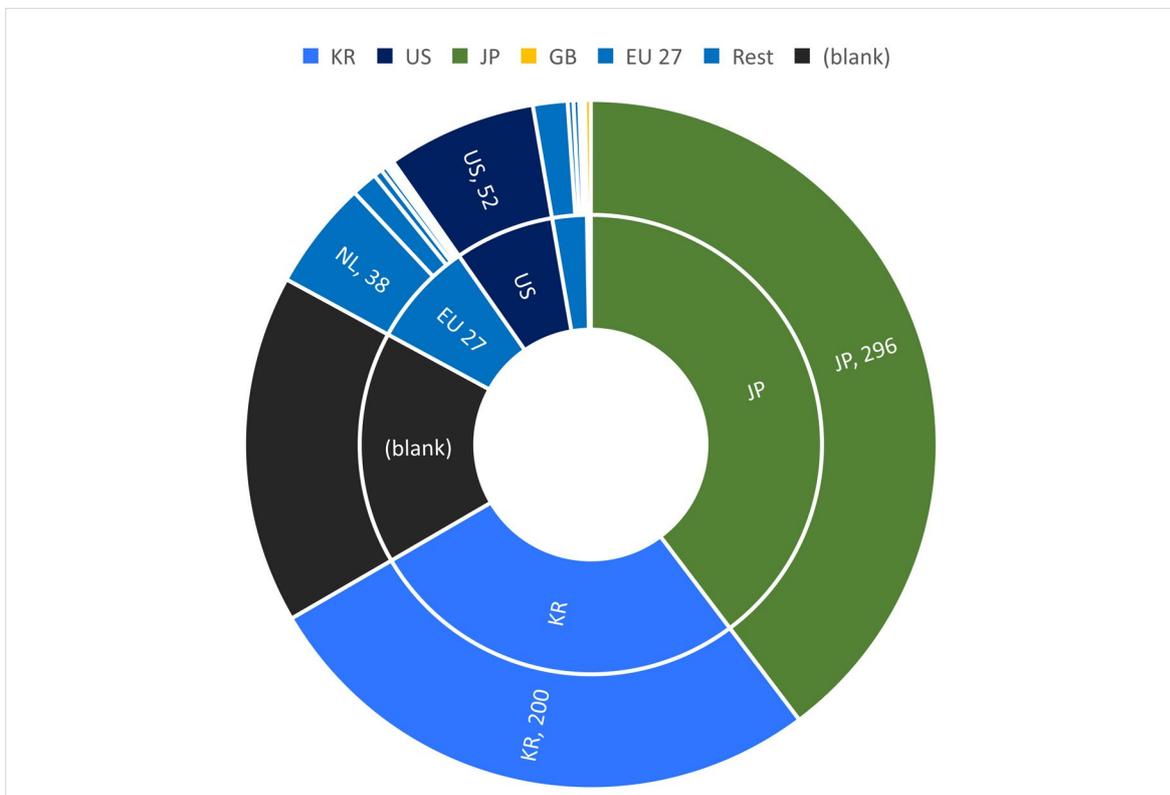
Quelle: Websites von ISO, IEC und ITU

Abbildung A89: Verteilung der standard-essentiellen Patente in den Advanced Manufacturing Technologien



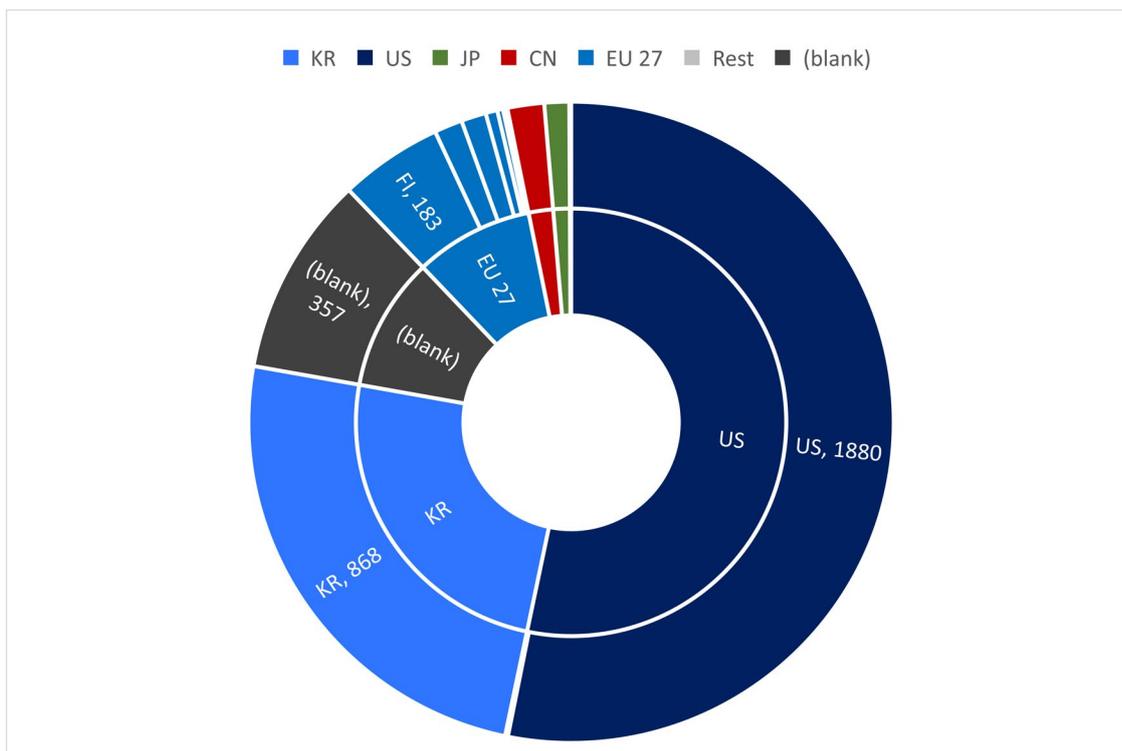
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI und der IPIytics GmbH

Abbildung A90: Verteilung der standard-essentiellen Patente in der Photonik



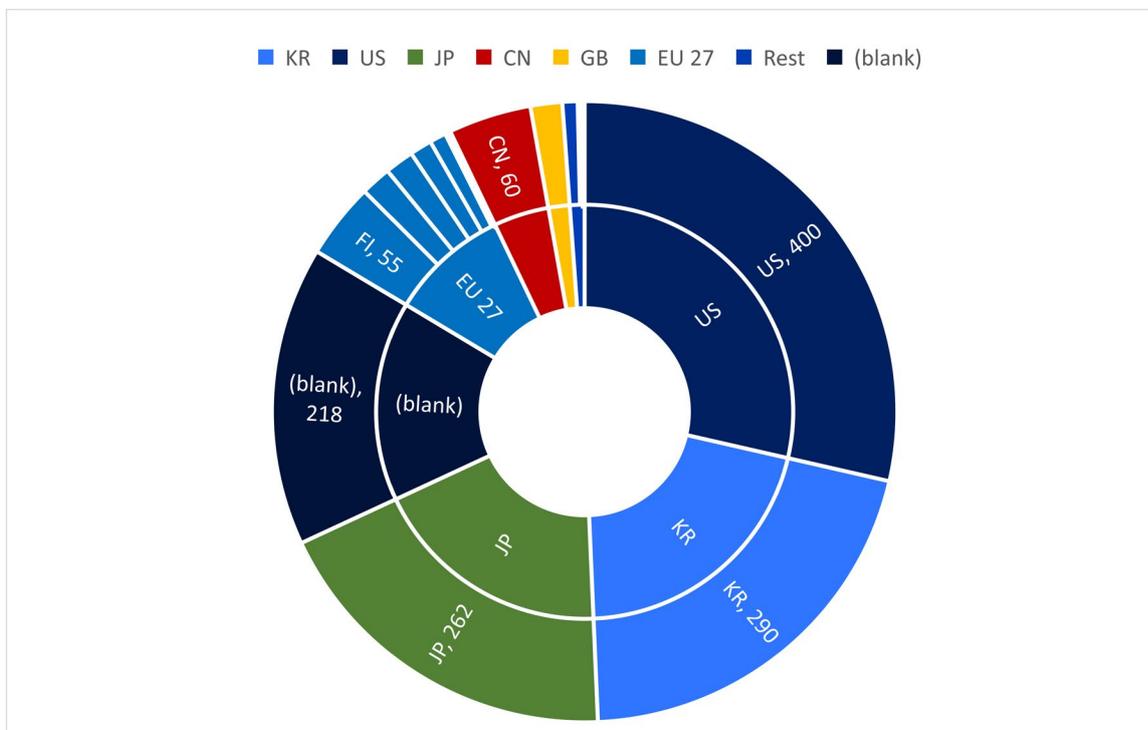
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI und der IPIytics GmbH

Abbildung A91: Verteilung der standard-essentiellen Patente im Bereich Robotik



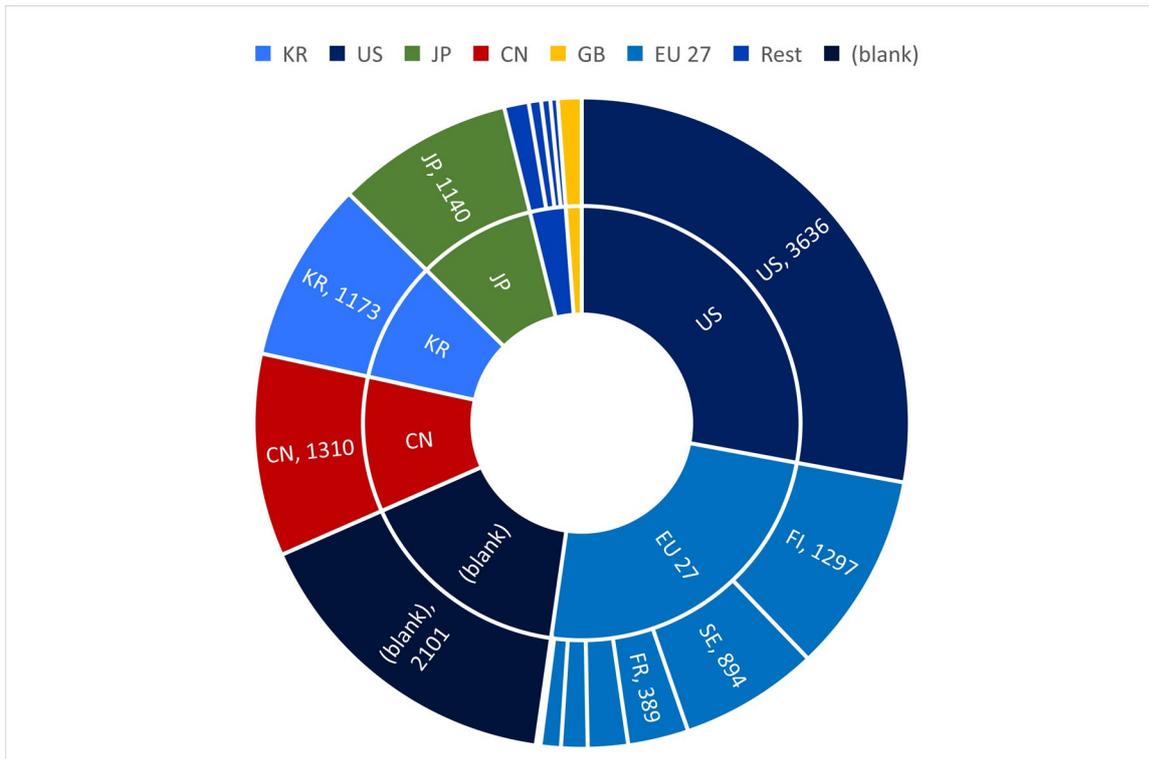
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI und der IPlytics GmbH

Abbildung A92: Verteilung der standard-essentiellen Patente im Bereich Künstliche Intelligenz



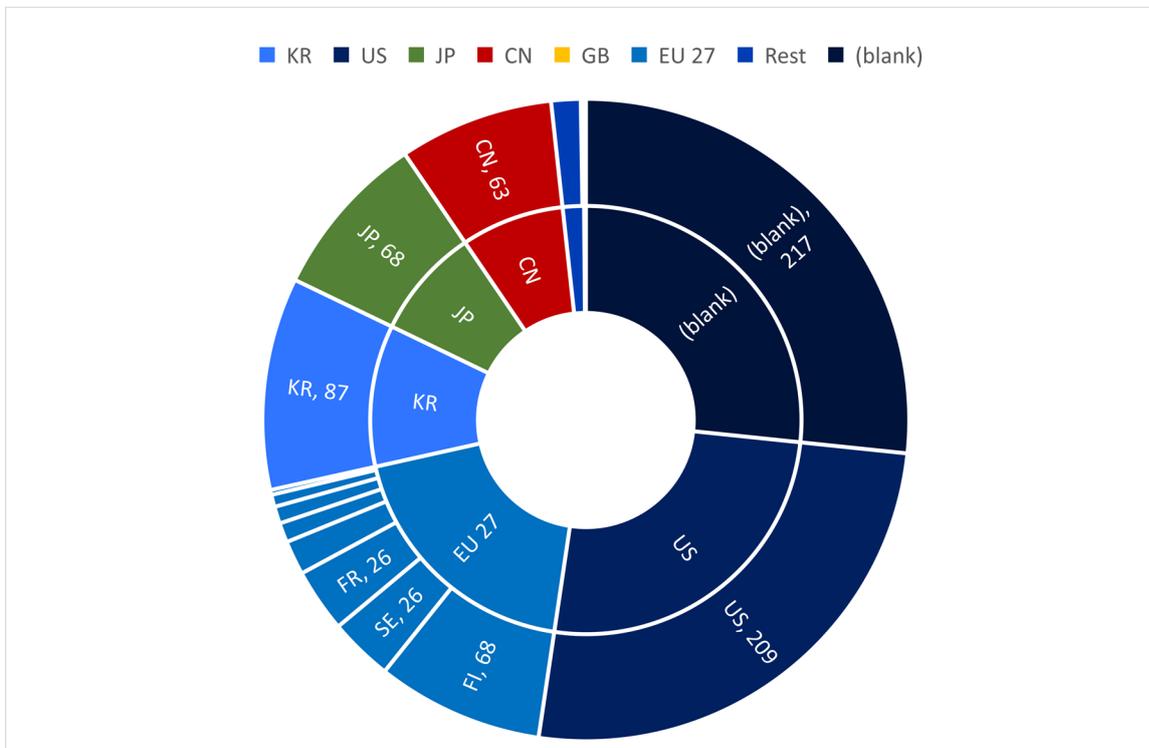
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI und der IPlytics GmbH

Abbildung A93: Verteilung der standard-essentiellen Patente im Bereich Digitale Sicherheitstechnologien



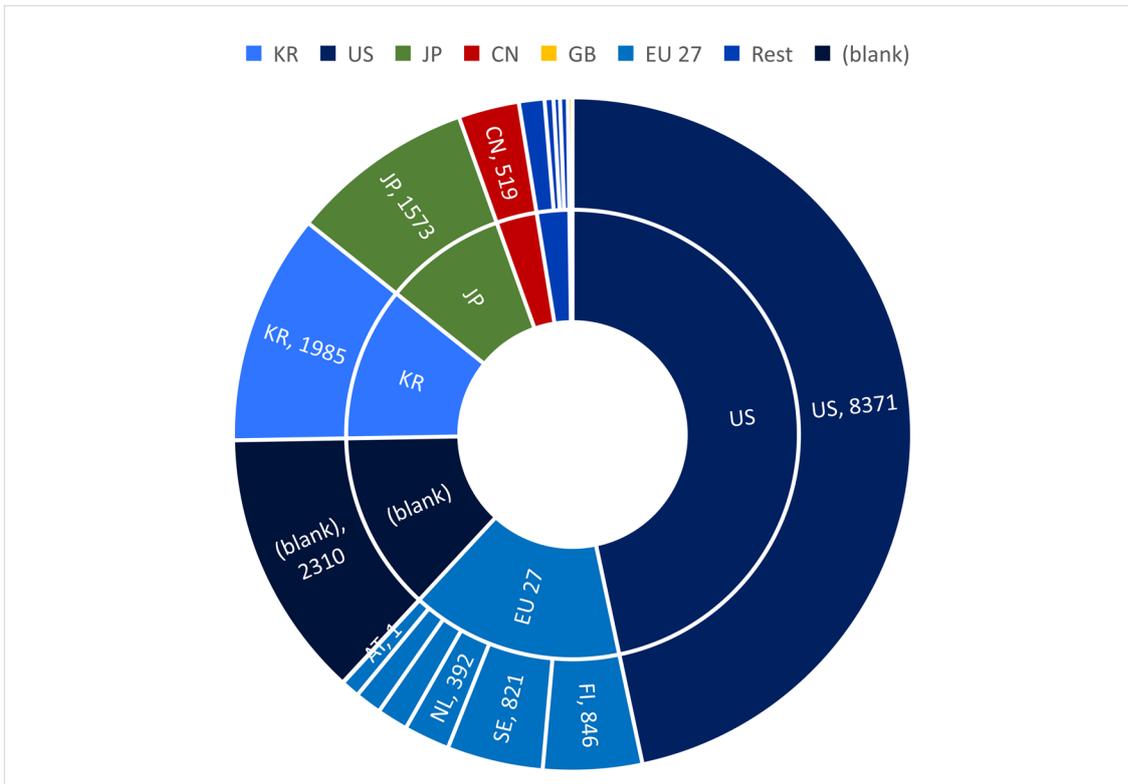
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI und der IPlytics GmbH

Abbildung A94: Verteilung der standard-essentiellen Patente im Bereich Big Data



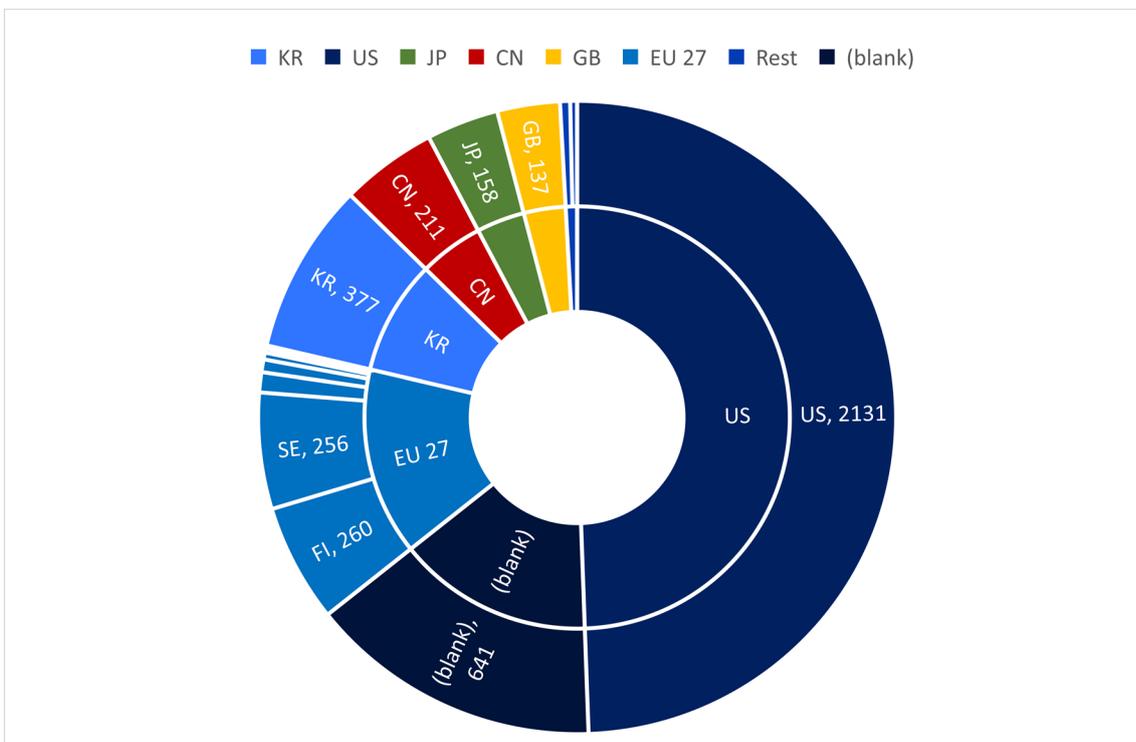
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI und der IPlytics GmbH

Abbildung A95: Verteilung der standard-essentiellen Patente im Bereich Internet of Things



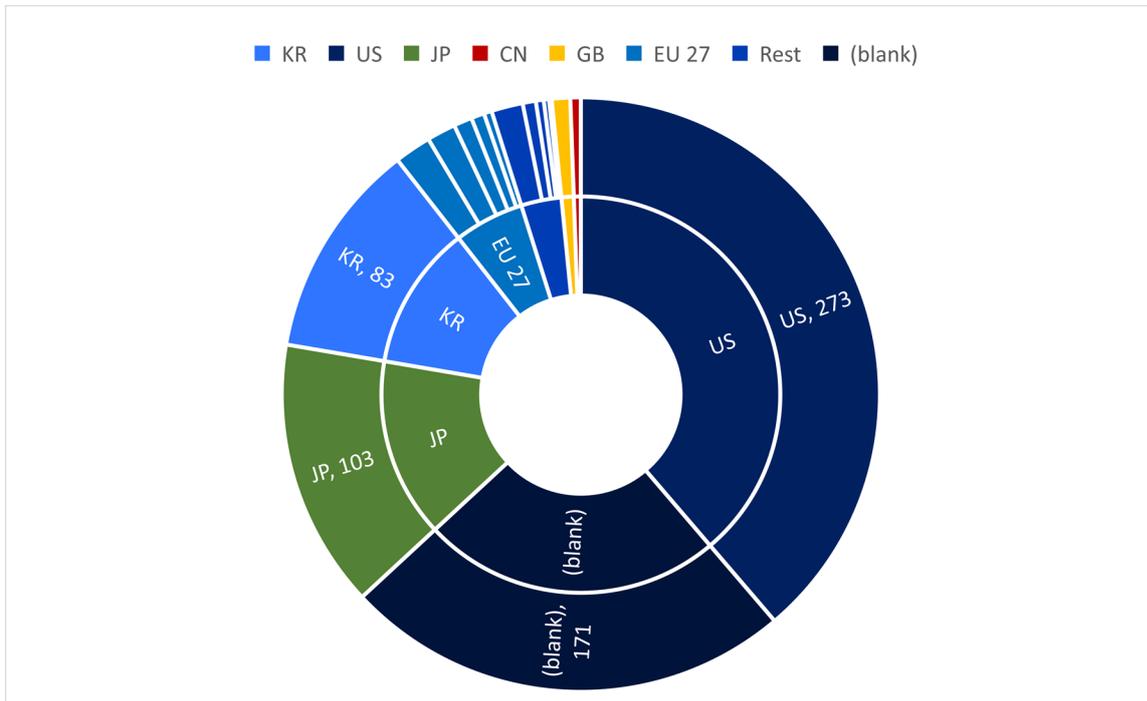
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI und der IPlytics GmbH

Abbildung A96: Verteilung der standard-essentiellen Patente im Bereich Digitale Mobilitätstechnologien



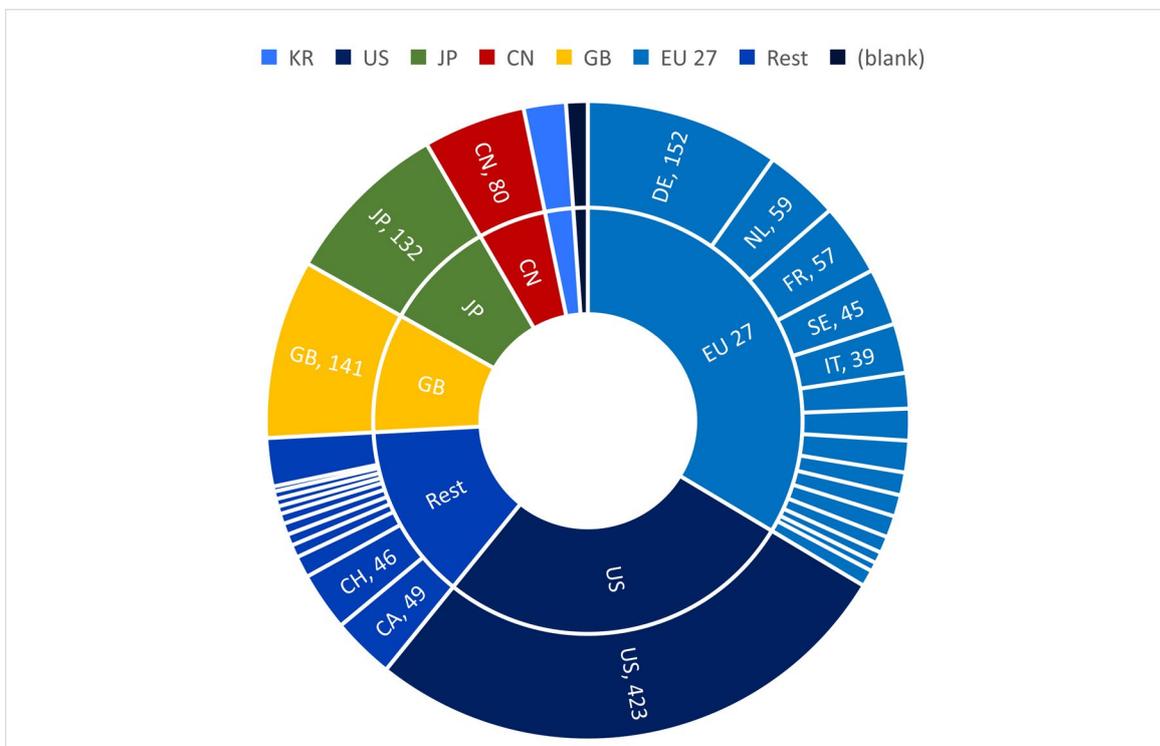
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI und der IPlytics GmbH

Abbildung A97: Verteilung der standard-essentiellen Patente in der Mikroelektronik



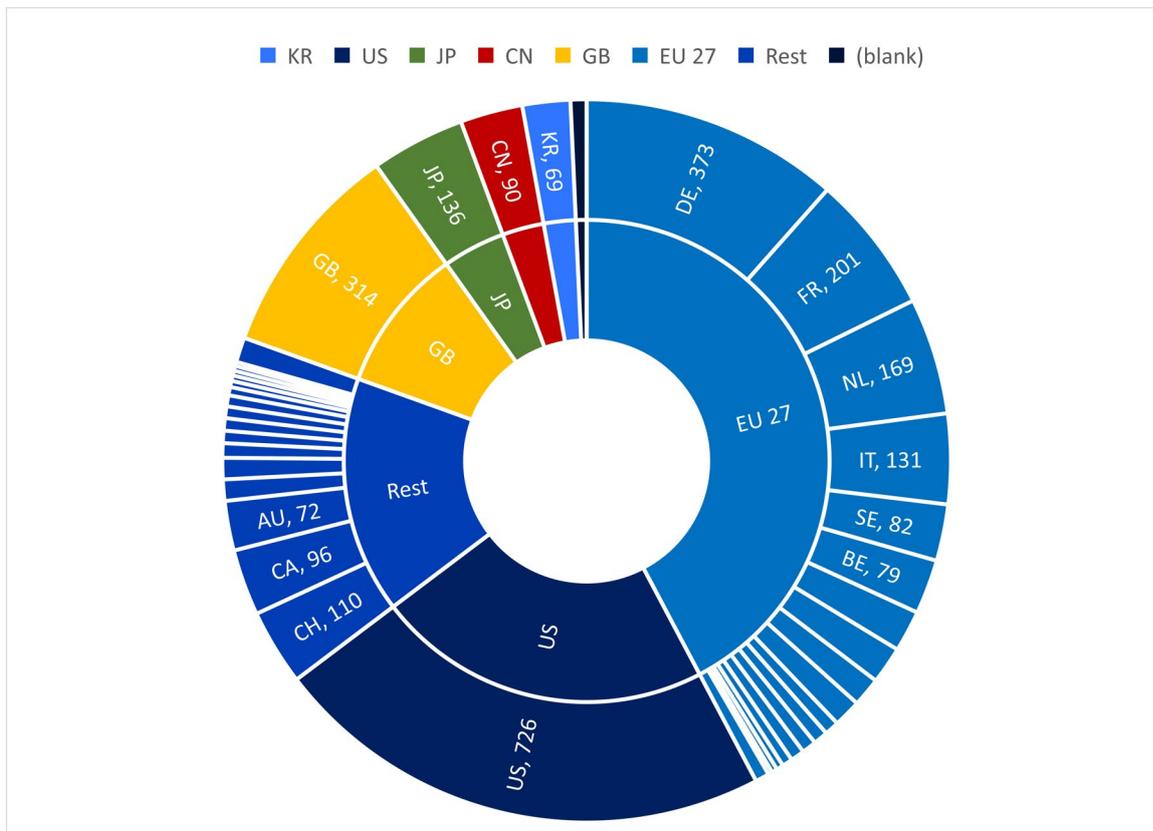
Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI und der IPlytics GmbH

Abbildung A98: Verteilung standard-relevanter Publikationen in den Materialwissenschaften



Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, basierend auf ISO Daten

Abbildung A99: Verteilung standard-relevanter Publikationen in den Bio-/Lebenswissenschaften



Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, basierend auf ISO Daten

Tabelle A2: Top-25 Publizierende Institutionen im Bereich Digitalisierungstechnologien

	2000-2004			2007-2011			2015-19		
US	University of California	>3.000	CN	Chinese Academy of Sciences	>5.500	CN	Chinese Academy of Sciences	>14.500	
CN	Chinese Academy of Sciences	>1.500	US	University of California	>5.500	US	University of California	>10.500	
CN	Tsinghua Univ	>1.000	CN	Harbin Institute of Technology	>2.500	CN	Graduate University of CAS	>5.000	
HK	IEEE	>1.000	CN	Shanghai Jiaotong University	>2.000	CN	Tsinghua Univ	>5.000	
CN	Shanghai Jiaotong University	>1.000	CN	Tsinghua Univ	>2.000	IN	Indian Institute of Technology	>5.000	
JP	University of Tokyo	>1.000	IN	Indian Institute of Technology	>2.000	CN	Shanghai Jiaotong University	>4.000	
US	University of Illinois	900-1000	CN	Zhejiang University	>2.000	CN	Zhejiang University	>4.000	
RU	Russian Academy of Sciences	800-900	CN	Graduate University of CAS	>1.500	CN	Harbin Institute of Technology	>4.000	
IN	Indian Institute of Technology	800-900	CN	Huazhong University of S&T	>1.500	IR	Islamic Azad University	>3.500	
SG	Nat. University of Singapore	700-800	CN	BJ Univ. Aero- and Astronautics	>1.000	CN	Huazhong University of S&T	>3.500	
SG	Nanyang Techn. University	700-800	US	University of Illinois	>1.000	CN	Beijing University of P&T	>3.500	
US	MIT	700-800	JP	University of Tokyo	>1.000	CN	Wuhan University	>3.500	
FR	CNRS	700-800	RU	Russian Academy of Sciences	>1.000	CN	BJ Univ. Aero- and Astronautics	>3.000	
US	University of Washington	700-800	CA	University of Toronto	>1.000	RU	Russian Academy of Sciences	>3.000	
CN	Harbin Institute of Technology	700-800	CN	Dalian University of Technology	>1.000	GB	University College London	>3.000	
CN	Zhejiang University	600-700	CN	Southeast University	>1.000	GB	University of Oxford	>3.000	
US	University of Michigan	600-700	FR	CNRS	>1.000	CN	Tianjin University	>2.500	
US	CDC	600-700	BR	University of São Paulo	>1.000	CN	Southeast University	>2.500	
US	University of Maryland	600-700	SG	Nanyang Techn. University	>1.000	IN	Nat. Institute of Technology	>2.500	
CA	University of Toronto	600-700	US	University of Washington	>1.000	CN	NW Polytechnical University	>2.500	
US	Stanford University	500-600	SG	Nat. University of Singapore	>1.000	US	University of Michigan	>2.500	
US	University of Texas	500-600	CN	Chongqing University	>1.000	CN	University Electr. S&T of China	>2.500	
US	State University of New York	500-600	US	University of Michigan	>1.000	CN	Central South University	>2.500	
GB	University of Cambridge	500-600	US	University of Texas	>1.000	CA	University of Toronto	>2.500	
HK	Hong Kong Polytechnic Univ.	500-600	US	MIT	>1.000	CN	Beijing Institute of Technology	>2.500	
	TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland		
DE	TU München	300-400	DE	TU München	500-600	DE	TU München	>1500	
DE	LMU München	200-300	DE	LMU München	500-600	DE	LMU München	>1000	
DE	RWTH Aachen	200-300	DE	RWTH Aachen	500-600	DE	RWTH Aachen	900-1000	
DE	Univ. of Erlangen-Nuremberg	200-300	DE	University of Bonn	400-500	DE	University of Heidelberg	900-1000	
DE	University of Heidelberg	200-300	DE	Free University of Berlin	400-500	DE	University of Bonn	800-900	
DE	University of Tübingen	200-300	DE	University of Heidelberg	400-500	DE	Inst. Kern- und Teilchenphysik	800-900	
DE	Univ of Karlsruhe	200-300	DE	Universität Freiburg	400-500	DE	Univ. of Erlangen-Nuremberg	800-900	
DE	Humboldt University	200-300	DE	Univ. of Erlangen-Nuremberg	400-500	DE	Free University of Berlin	800-900	

Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, basierend auf Elsevier SCOPUS

Tabelle A3: Top-25 Publizierende Institutionen im Bereich Produktionstechnologien

	2000-2004			2007-2011			2015-19		
HK	IEEE	300-400	CN	Chinese Academy of Sciences	600-700	CN	Chinese Academy of Sciences	>1.500	
CN	Shanghai Jiaotong University	200-300	CN	Harbin Institute of Technology	600-700	US	University of California	>1.000	
US	University of California	200-300	US	University of California	500-600	CN	Harbin Institute of Technology	900-1000	
CN	Harbin Institute of Technology	100-200	CN	Shanghai Jiaotong University	400-500	CN	Shanghai Jiaotong University	800-900	
US	MIT	100-200	CN	Zhejiang University	300-400	CN	Zhejiang University	600-700	
JP	University of Tokyo	100-200	CN	Tsinghua Univ	300-400	CN	Tsinghua Univ	600-700	
US	California Inst. of Technology	100-200	US	MIT	300-400	CN	Graduate University of CAS	600-700	
SG	Nanyang Techn. University	100-200	SG	Nanyang Techn. University	200-300	CN	Huazhong University of S&T	600-700	
CN	Chinese Academy of Sciences	100-200	IN	Indian Institute of Technology	200-300	CN	BJ Univ. Aero- and Astronautics	500-600	
CN	Tsinghua Univ	100-200	CN	BJ Univ. Aero- and Astronautics	200-300	US	MIT	500-600	
US	Carnegie Mellon University	100-200	CN	Huazhong University of S&T	200-300	IN	Indian Institute of Technology	500-600	
JP	Tokyo Institute of Technology	100-200	JP	University of Tokyo	200-300	CN	Tianjin University	400-500	
SG	Nat. University of Singapore	100-200	US	Georgia Institute of Technology	200-300	CN	Beijing Institute of Technology	400-500	
US	University of Michigan	100-200	CN	Tianjin University	200-300	SG	Nat. University of Singapore	400-500	
US	Georgia Institute of Technology	100-200	AU	University of Sydney	200-300	SG	Nanyang Techn. University	400-500	
KR	Technology	100-200	US	University of Illinois	100-200	CN	Beijing University of P&T	400-500	
CA	University of Toronto	100-200	KR	Technology	100-200	CN	South China Univ of Technology	400-500	
JP	Osaka University	90-100	SG	Nat University of Singapore	100-200	US	Georgia Institute of Technology	400-500	
RU	Russian Academy of Sciences	90-100	CN	Beijing University of P&T	100-200	IT	Istituto Italiano di Tecnologia	400-500	
US	Stanford University	90-100	DK	Technical Univ of Denmark	100-200	RU	Russian Academy of Sciences	400-500	
FR	CNRS	90-100	RU	Russian Academy of Sciences	100-200	GB	Imperial College	300-400	
US	University of Illinois	80-90	US	California Inst of Technology	100-200	CN	Nanjing University of P&T	300-400	
US	University of South. California	80-90	CH	ETH Zurich	100-200	CN	NW Polytechnical University	300-400	
US	Pennsylvania State University	80-90	US	Carnegie Mellon University	100-200	CH	ETH Zurich	300-400	
CH	EPFL	70-80	US	Stanford University	100-200	CN	Southeast University	300-400	
	TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland		
DE	Univ of Karlsruhe	50-60	DE	Univ of Karlsruhe	50-60	DE	TU München	300-400	
DE	TU München	50-60	DE	TU München	50-60	DE	RWTH Aachen	100-200	
DE	RWTH Aachen	40-50	DE	RWTH Aachen	40-50	DE	DLR	100-200	
DE	DLR	30-40	DE	DLR	30-40	DE	Karlsruhe Inst. of Technology	100-200	
DE	Universität Freiburg	30-40	DE	Universität Freiburg	30-40	DE	Darmstadt Univ. of Technology	100-200	
DE	Univ of Erlangen-Nuremberg	20-30	DE	Univ of Erlangen-Nuremberg	20-30	DE	MPI Metallforschung	100-200	
DE	Universität Dortmund	20-30	DE	Universität Dortmund	20-30	DE	Univ of Erlangen-Nuremberg	100-200	
DE	Siemens AG	20-30	DE	Siemens AG	20-30	DE	Technische Universität Berlin	100-200	

Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, basierend auf Elsevier SCOPUS

Tabelle A4: Top-25 Publizierende Institutionen im Bereich Materialtechnologien

	2000-2004			2007-2011			2015-19		
RU	Russian Academy of Sciences	>10.000	CN	Chinese Academy of Sciences	>25.000	CN	Chinese Academy of Sciences	>50.000	
CN	Chinese Academy of Sciences	>10.000	RU	Russian Academy of Sciences	>10.000	RU	Russian Academy of Sciences	>20.000	
US	University of California	7-8.000	US	University of California	>10.000	CN	Graduate University of CAS	>15.000	
JP	Tohoku University	5-6.000	IN	Indian Institute of Technology	8-9.000	IN	Indian Institute of Technology	>15.000	
JP	University of Tokyo	5-6.000	CN	Graduate University of CAS	8-9.000	US	University of California	>10.000	
FR	CNRS	5-6.000	CN	Tsinghua Univ	6-7.000	CN	Tsinghua Univ	>10.000	
JP	Osaka University	4-5.000	CN	Harbin Institute of Technology	6-7.000	CN	Harbin Institute of Technology	>10.000	
CN	Tsinghua Univ	4-5.000	CN	Central South University	6-7.000	CN	Central South University	>10.000	
JP	Kyoto University	3-4.000	CN	Zhejiang University	5-6.000	CN	University of S&T Beijing	9-10.000	
JP	Tokyo Institute of Technology	3-4.000	JP	Tohoku University	5-6.000	CN	Zhejiang University	9-10.000	
IN	Indian Institute of Technology	3-4.000	JP	University of Tokyo	5-6.000	CN	Shanghai Jiaotong University	9-10.000	
JP	AIST	3-4.000	CN	Shanghai Jiaotong University	5-6.000	CN	University of S&T of China	9-10.000	
JP	Nat. Inst. for Materials Science	2-3.000	FR	CNRS	4-5.000	CN	South China Univ of Technology	8-9.000	
RU	Moscow State University	2-3.000	JP	Osaka University	4-5.000	CN	Tianjin University	8-9.000	
SG	Nat. University of Singapore	2-3.000	CN	University of S&T Beijing	4-5.000	CN	Huazhong University of S&T	8-9.000	
PL	Polish Academy of Sciences	2-3.000	JP	Kyoto University	4-5.000	CN	NW Polytechnical University	8-9.000	
ES	CSIC	2-3.000	CN	Sichuan University	4-5.000	CN	Jilin University	8-9.000	
GB	University of Cambridge	2-3.000	CN	Huazhong University of S&T	4-5.000	CN	Sichuan University	8-9.000	
CN	Shanghai Jiaotong University	2-3.000	JP	AIST	4-5.000	CN	Xi'an Jiaotong Univ	7-8.000	
KR	Seoul National University	2-3.000	SG	Nat. University of Singapore	4-5.000	CN	Peking University	7-8.000	
CN	Zhejiang University	2-3.000	CN	NW Polytechnical University	3-4.000	IR	Islamic Azad University	7-8.000	
UA	Nat. Acad. of Sciences Ukraine	2-3.000	CN	Jilin University	3-4.000	SG	Nanyang Techn. University	6-7.000	
SG	Nanyang Techn. University	2-3.000	JP	Nat. Inst. for Materials Science	3-4.000	CN	BJ Univ. Aero- and Astronautics	6-7.000	
US	University of Illinois	2-3.000	SG	Nanyang Techn. University	3-4.000	CN	Chongqing University	6-7.000	
US	Pennsylvania State University	2-3.000	KR	Seoul National University	3-4.000	CN	Southeast University	6-7.000	
	TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland		
DE	Forschungszentrum Jülich	1-2.000	DE	RWTH Aachen	1-2.000	DE	Instit. für Kern-/Teilchenphysik	3-4.000	
DE	RWTH Aachen	1-2.000	DE	Instit. für Kern-/Teilchenphysik	1-2.000	DE	RWTH Aachen	3-4.000	
DE	MPI für Festkörperforschung	1-2.000	DE	Forschungszentrum Jülich	1-2.000	DE	Karlsruhe Instit. of Technology	3-4.000	
DE	TU München	1-2.000	DE	Darmstadt Univ of Technology	1-2.000	DE	Forschungszentrum Jülich	2-3.000	
DE	Universität Stuttgart	1-2.000	DE	Univ of Erlangen-Nuremberg	1-2.000	DE	Univ of Erlangen-Nuremberg	2-3.000	
DE	Hahn-Meitner-Institut	1-2.000	DE	Inst. für Exp. Kernphysik	1-2.000	DE	TU München	2-3.000	
DE	Uni of Erlangen-Nuremberg	1-2.000	DE	TU München	1-2.000	DE	Darmstadt Univ of Technology	1-2.000	
DE	Inst für Exp. Kernphysik	1-2.000	DE	IFW Dresden	1-2.000	DE	Inst für Exp. Kernphysik	1-2.000	

Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, basierend auf Elsevier SCOPUS

Tabelle A5: Top-25 Publizierende Institutionen im Bereich Bio- und Lebenswissenschaften

2000-2004			2007-2011			2015-19		
US	University of California	>35.000	US	University of California	>50.000	CN	Chinese Academy of Sciences	>65.000
RU	Russian Academy of Sciences	>10.000	CN	Chinese Academy of Sciences	>30.000	US	University of California	>60.000
CN	Chinese Academy of Sciences	>10.000	RU	Russian Academy of Sciences	>15.000	RU	Russian Academy of Sciences	>25.000
JP	University of Tokyo	>10.000	US	Harvard Medical School	>15.000	CN	Graduate University of CAS	>20.000
US	Harvard Medical School	>10.000	BR	University of São Paulo	>10.000	BR	University of São Paulo	>20.000
US	National Institutes of Health	9-10.000	JP	University of Tokyo	>10.000	US	Harvard Medical School	>15.000
FR	CNRS	8-9.000	FR	CNRS	>10.000	CN	Zhejiang University	>15.000
JP	Kyoto University	8-9.000	FR	INSERM	>10.000	GB	University of Oxford	>15.000
US	National Cancer Institute	7-8.000	US	National Institutes of Health	>10.000	DK	University of Copenhagen	>15.000
US	University of Illinois	7-8.000	CA	University of Toronto	>10.000	CA	University of Toronto	>10.000
US	University of Washington	7-8.000	US	University of Florida	>10.000	US	University of Florida	>10.000
US	University of Wisconsin	7-8.000	GB	University of Oxford	>10.000	GB	University College London	>10.000
BR	University of São Paulo	7-8.000	US	University of Washington	>10.000	US	University of Washington	>10.000
CA	University of Toronto	7-8.000	US	University of Illinois	>10.000	CN	Chin. Acad. Agricult. Sciences	>10.000
FR	INSERM	6-7.000	JP	Kyoto University	9-10.000	JP	University of Tokyo	>10.000
US	University of Florida	6-7.000	CN	Graduate University of CAS	9-10.000	AU	University of Queensland	>10.000
GB	University of Oxford	6-7.000	US	University of Wisconsin	9-10.000	CN	Fudan University	>10.000
US	University of Minnesota	6-7.000	GB	University College London	9-10.000	AU	University of Melbourne	>10.000
GB	University College London	6-7.000	US	University of Minnesota	9-10.000	GB	University of Cambridge	>10.000
GB	University of Cambridge	6-7.000	DK	University of Copenhagen	9-10.000	US	University of Illinois	>10.000
US	Cornell University	5-6.000	GB	University of Cambridge	8-9.000	US	University of Minnesota	>10.000
DK	University of Copenhagen	5-6.000	CN	Zhejiang University	8-9.000	FR	CNRS	>10.000
US	Ohio State University	5-6.000	CA	University of British Columbia	8-9.000	CN	Shanghai Jiaotong University	>10.000
US	State University of New York	5-6.000	US	National Cancer Institute	8-9.000	CN	China Agricultural University	>10.000
NL	Wageningen University	5-6.000	US	University of Michigan	8-9.000	BR	Universidade Estadual Paulista	>10.000
	TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland	
DE	LMU München	3-4.000	DE	LMU München	5-6.000	DE	LMU München	7-8.000
DE	University of Heidelberg	3-4.000	DE	Free University of Berlin	5-6.000	DE	TU München	7-8.000
DE	University of Tübingen	3-4.000	DE	University of Heidelberg	4-5.000	DE	Free University of Berlin	6-7.000
DE	Universität Würzburg	3-4.000	DE	GA Universität Göttingen	4-5.000	DE	University of Bonn	5-6.000
DE	GA Universität Göttingen	2-3.000	DE	TU München	4-5.000	DE	University of Heidelberg	5-6.000
DE	University of Bonn	2-3.000	DE	University of Bonn	4-5.000	DE	University of Tübingen	5-6.000
DE	TU München	2-3.000	DE	University of Tübingen	4-5.000	DE	Universität Freiburg	5-6.000
DE	Humboldt University	2-3.000	DE	Universität Würzburg	3-4.000	DE	GA Universität Göttingen	4-5.000

Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, basierend auf Elsevier SCOPUS

Tabelle A6: Top-25 Patentierende Institutionen (Anmelder transnationaler Patente) im Bereich Digitalisierungstechnologien

	2000-2004			2007-2011			2015-19		
NL	PHILIPS ELECTRONICS	>2.500		JP	PANASONIC CORPORATION	>2.500	CN	BOE TECHNOLOGY GROUP	>3.000
JP	PANASONIC CORPORATION	>2.000		JP	SHARP CORPORATION	>1.500	US	INTEL CORPORATION	>3.000
DE	INFINEON TECHNOLOGIES	>1.000		JP	NEC CORPORATION	>1.000	KR	SAMSUNG ELECTRONICS	>2.000
JP	SONY CORPORATION	>1.000		US	APPLIED MATERIALS	>1.000	JP	MITSUBISHI ELECTRIC	>2.000
DE	SIEMENS	>1.000		DE	ROBERT BOSCH	>1.000	CN	HUAWEI TECHNOLOGIES	>1.500
JP	TOKYO ELECTRON	800-900		NL	PHILIPS ELECTRONICS	900-1000	US	QUALCOMM	>1.500
DE	ROBERT BOSCH	800-900		US	QUALCOMM	900-1000	JP	SONY CORPORATION	>1.500
JP	FUJITSU	800-900		JP	SONY CORPORATION	900-1000	US	MICROSOFT TECH LICENSING	>1.500
US	MOTOROLA	800-900		US	IBM	800-900	US	APPLIED MATERIALS	>1.000
US	IBM	700-800		KR	SAMSUNG ELECTRONICS	800-900	JP	DENSO CORPORATION	>1.000
JP	CANON	700-800		US	MICROSOFT CORPORATION	800-900	JP	PANASONIC IP MANAGEMENT	>1.000
US	APPLIED MATERIALS	700-800		JP	FUJIFILM	800-900	DE	ROBERT BOSCH	>1.000
US	INTEL CORPORATION	700-800		JP	TOKYO ELECTRON	800-900	JP	MURATA MANUFACTURING	>1.000
KR	SAMSUNG ELECTRONICS	700-800		KR	LG INNOTEK COMPANY	800-900	JP	SHARP CORPORATION	>1.000
JP	HITACHI	600-700		JP	FUJITSU	700-800	JP	FUJIFILM	>1.000
FI	NOKIA CORPORATION	600-700		DE	SIEMENS	700-800	JP	NEC CORPORATION	>1.000
US	MICROSOFT CORPORATION	600-700		US	INTEL CORPORATION	700-800	DE	SIEMENS	>1.000
JP	TOSHIBA CORPORATION	500-600		JP	MITSUBISHI ELECTRIC	600-700	US	GOOGLE	>1.000
JP	NEC CORPORATION	500-600		JP	CANON	600-700	CN	ZTE CORPORATION	>1.000
JP	SEIKO EPSON CORPORATION	500-600		FR	CEA	600-700	KR	LG ELECTRONICS	900-1000
JP	SHARP CORPORATION	500-600		CN	ZTE CORPORATION	600-700	NL	PHILIPS ELECTRONICS	900-1000
US	HONEYWELL INTERNATIONAL	400-500		JP	TOSHIBA CORPORATION	600-700	DE	OSRAM OPTO SEMICONDUCT	900-1000
US	KODAK	400-500		JP	MURATA MANUFACTURING	600-700	JP	SONY SEMICONDUCTOR	800-900
US	AMD	400-500		JP	SEMICONDUCTOR ENERGY LAB	600-700	KR	SAMSUNG DISPLAY	800-900
JP	NIKON CORPORATION	400-500		JP	TOYOTA MOTOR CORP	600-700	CN	SHENZHEN CHINA STAR OPTO	800-900
	TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland		
DE	INFINEON TECHNOLOGIES	>1000		DE	ROBERT BOSCH	>1000	DE	ROBERT BOSCH	>1000
DE	SIEMENS	>1000		DE	SIEMENS	700-800	DE	SIEMENS	>1000
DE	ROBERT BOSCH	800-900		DE	OSRAM OPTO SEMICONDUCT	600-700	DE	OSRAM OPTO SEMICONDUCT	900-1000
DE	PHILIPS IP & STANDARDS	300-400		DE	FRAUNHOFER	300-400	DE	MERCK PATENT	300-400
DE	OSRAM OPTO SEMICONDUCT	200-300		DE	PHILIPS IP & STANDARDS	200-300	DE	CONTINENTAL AUTOMOTIVE	300-400
DE	DAIMLERCHRYSLER	100-200		DE	MERCK PATENT	200-300	DE	VALEO SCHALTER/SENSOREN	300-400
DE	G&D (GIESECKE & DEVRIENT)	100-200		DE	BASF	200-300	DE	VOLKSWAGEN	300-400
DE	SAP	100-200		DE	G&D (GIESECKE & DEVRIENT)	200-300	DE	AUDI	200-300

Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, basierend auf EPO PATSTAT

Tabelle A7: Top-25 Patentierende Institutionen (Anmelder transnationaler Patente) Bereich Produktionstechnologien

2000-2004			2007-2011			2015-19		
NL	PHILIPS ELECTRONICS	>1.000	JP	SHARP CORPORATION	>1.500	DE	SIEMENS	>1.500
DE	SIEMENS	>1.000	DE	SIEMENS	>1.000	JP	mitsubishi electric	>1.000
JP	PANASONIC CORPORATION	800-900	NL	PHILIPS ELECTRONICS	>1.000	DE	ROBERT BOSCH	>1.000
DE	ROBERT BOSCH	700-800	JP	PANASONIC CORPORATION	>1.000	CN	BOE TECHNOLOGY GROUP	>1.000
US	3M INNOVATIVE PROPERTIES	500-600	DE	ROBERT BOSCH	900-1000	JP	FUJIFILM	>1.000
JP	SONY CORPORATION	500-600	US	GENERAL ELECTRIC (GE)	600-700	JP	PANASONIC IP MANAGEMENT	>1.000
US	HONEYWELL INTERNATIONAL	500-600	JP	FUJIFILM	600-700	JP	SHARP CORPORATION	900-1000
KR	SAMSUNG ELECTRONICS	400-500	JP	SUMITOMO CHEMICAL	500-600	KR	LG CHEM	800-900
US	CORNING	400-500	DE	OSRAM	500-600	JP	SONY CORPORATION	800-900
US	KODAK	400-500	JP	mitsubishi electric	400-500	KR	SAMSUNG ELECTRONICS	800-900
US	AGILENT TECHNOLOGIES	400-500	JP	NITTO DENKO CORPORATION	400-500	JP	OMRON CORPORATION	800-900
US	GENERAL ELECTRIC (GE)	400-500	US	HONEYWELL INTERNATIONAL	400-500	JP	KONICA MINOLTA	700-800
JP	HONDA MOTOR COMPANY	300-400	KR	SAMSUNG ELECTRONICS	400-500	KR	LG ELECTRONICS	700-800
JP	FUJITSU	300-400	JP	KONICA MINOLTA OPTO	400-500	CN	SZ DJI TECHNOLOGY COMPANY	600-700
JP	CANON	300-400	US	3M INNOVATIVE PROPERTIES	400-500	US	GENERAL ELECTRIC (GE)	600-700
JP	FANUC	300-400	JP	CANON	300-400	JP	NITTO DENKO CORPORATION	600-700
JP	mitsubishi electric	300-400	DE/NL	PHILIPS IP & STANDARDS	300-400	US	HONEYWELL INTERNATIONAL	500-600
JP	FUJIFILM	300-400	DE	OSRAM OPTO SEMICONDUCT	300-400	NL	PHILIPS LIGHTING HOLDING	500-600
JP	SUMITOMO ELECTRIC	300-400	JP	KONICA MINOLTA	300-400	JP	SUMITOMO CHEMICAL	400-500
JP	SEIKO EPSON CORPORATION	300-400	JP	NEC CORPORATION	300-400	FR	CEA	400-500
JP	PIONEER CORPORATION	300-400	FR	CEA	300-400	CN	HUAWEI TECHNOLOGIES	400-500
JP	HITACHI	200-300	KR	LG INNOTEK COMPANY	300-400	NL	PHILIPS ELECTRONICS	400-500
FR	ALCATEL	200-300	JP	TOYOTA MOTOR CORP	300-400	JP	HITACHI	400-500
US	DELPHI TECHNOLOGIES	200-300	JP	SONY CORPORATION	300-400	CH	ABB SCHWEIZ	400-500
JP	HAMAMATSU PHOTONICS	200-300	US	CORNING	300-400	US	BOEING COMPANY	400-500
TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland		
DE	SIEMENS	1270	DE	SIEMENS	1435	DE	SIEMENS	1692
DE	ROBERT BOSCH	710	DE	ROBERT BOSCH	948	DE	ROBERT BOSCH	1152
DE	DAIMLERCHRYSLER	200-300	DE	OSRAM	571	DE	CONTINENTAL AUTOMOTIVE	300-400
DE/NL	PHILIPS IP & STANDARDS	200-300	DE/NL	PHILIPS IP & STANDARDS	300-400	DE	OSRAM OPTO SEMICONDUCT	300-400
DE	INFINEON TECHNOLOGIES	100-200	DE	OSRAM OPTO SEMICONDUCT	300-400	DE	FRAUNHOFER	200-300
DE	FRAUNHOFER	100-200	DE	FRAUNHOFER	200-300	DE	OSRAM	200-300
DE	OSRAM OPTO SEMICONDUCT	100-200	DE	CONTINENTAL AUTOMOTIVE	200-300	DE	BMW	200-300
DE	CARL ZEISS SMT	100-200	DE	SICK	100-200	DE	SICK	200-300

Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, basierend auf EPO PATSTAT

Tabelle A8: Top-25 Patentierende Institutionen (Anmelder transnationaler Patente) Bereich Materialtechnologien

	2000-2004			2007-2011			2015-19		
US	3M INNOVATIVE PROPERTIES	800-900	DE	BASF	800-900	KR	LG CHEM	>1.000	
DE	BASF	700-800	US	DOW GLOBAL TECHNOLOGIES	700-800	JP	FUJIFILM	>1.000	
US	DUPONT	700-800	US	DUPONT	600-700	US	DOW GLOBAL TECHNOLOGIES	900-1000	
US	GENERAL ELECTRIC (GE)	600-700	JP	FUJIFILM	500-600	US	CORNING	800-900	
JP	TOKYO ELECTRON	300-400	JP	SUMITOMO CHEMICAL	500-600	JP	JFE STEEL	700-800	
US	APPLIED MATERIALS	300-400	JP	ASAHI GLASS COMPANY	500-600	NL/SA	SABIC	700-800	
US	EXXONMOBIL CHEM. PATENTS	300-400	US	3M INNOVATIVE PROPERTIES	500-600	US	3M INNOVATIVE PROPERTIES	600-700	
US	DOW GLOBAL TECHNOLOGIES	300-400	AT	BOREALIS	400-500	DE	BASF	600-700	
DE	BAYER	200-300	JP	NITTO DENKO CORPORATION	400-500	KR	POSCO	600-700	
FR	L'OREAL	200-300	JP	JFE STEEL	400-500	JP	NSSMC	600-700	
JP	KANEKA CORPORATION	200-300	US	CORNING	300-400	JP	ZEON CORPORATION	600-700	
JP	JSR CORPORATION	200-300	JP	BRIDGESTONE CORPORATION	300-400	AT	BOREALIS	600-700	
JP	SHIN-ETSU CHEMICAL	200-300	DE	SIEMENS	300-400	JP	ASAHI GLASS COMPANY	500-600	
US	HONEYWELL INTERNATIONAL	200-300	JP	NIPPON STEEL CORPORATION	300-400	JP	NITTO DENKO CORPORATION	500-600	
US	KODAK	200-300	JP	TOKYO ELECTRON	300-400	US	APPLIED MATERIALS	500-600	
JP	ASAHI GLASS COMPANY	200-300	FR	CNRS	300-400	JP	SEKISUI CHEMICAL COMPANY	500-600	
DE	SCHOTT	200-300	US	APPLIED MATERIALS	300-400	JP	SUMITOMO CHEMICAL	400-500	
US	ROHM & HAAS COMPANY	200-300	US	GENERAL ELECTRIC (GE)	300-400	JP	DIC CORPORATION	400-500	
US	CORNING	200-300	JP	JX NIPPON MINING & METALS	200-300	JP	KURARAY COMPANY	400-500	
JP	MITSUI CHEMICALS	200-300	JP	KOBE STEEL	200-300	JP	SHIN-ETSU CHEMICAL	400-500	
CH	CIBA SPECIALTY CHEMICALS	200-300	KR	LG CHEM	200-300	JP	BRIDGESTONE CORPORATION	400-500	
FI	BOREALIS TECHNOLOGY	200-300	JP	SHARP CORPORATION	200-300	US	EXXONMOBIL CHEMICAL	400-500	
JP	JAPAN S&T AGENCY	200-300	JP	SHIN-ETSU CHEMICAL	200-300	FR	MICHELIN	400-500	
JP	FUJIFILM	200-300	JP	TORAY INDUSTRIES	200-300	JP	SUMITOMO ELECTRIC	400-500	
JP	CANON	200-300	NL	SABIC INNOVATIVE PLASTICS IP	200-300	JP	TORAY INDUSTRIES	400-500	
	TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland		
DE	BASF	700-800	DE	BASF	800-900	DE	BASF	600-700	
DE	BAYER	200-300	DE	SIEMENS	300-400	DE	SIEMENS	200-300	
DE	SCHOTT	200-300	DE	BAYER MATERIALSCIENCE	200-300	DE	HENKEL	200-300	
DE	SIEMENS	200-300	DE	LANXESS	100-200	DE	COVESTRO DEUTSCHLAND	100-200	
DE	FRAUNHOFER	100-200	DE	FRAUNHOFER	100-200	DE	THYSSEN KRUPP	100-200	
DE	DEGUSSA	100-200	DE	EVONIK DEGUSSA	100-200	DE	THYSSENKRUPP STEEL EUROPE	100-200	
DE	BASELL POLYOLEFINE	100-200	DE	HENKEL	100-200	DE	EVONIK DEGUSSA	100-200	
DE	HENKEL	100-200	DE	WACKER-CHEMIE	100-200	DE	WACKER-CHEMIE	100-200	

Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, basierend auf EPO PATSTAT

Tabelle A9: Top-25 Patentierende Institutionen (Anmelder transnationaler Patente) Bereich Bio- und Lebenswissenschaften

2000-2004			2007-2011			2015-19		
CN	SH BIOWINDOW GENE DEV	700-800	US	PROCTER & GAMBLE	700-800	US	PROCTER & GAMBLE	>1.000
US	UNIVERSITY OF CALIFORNIA	700-800	US	UNIVERSITY OF CALIFORNIA	600-700	US	HARVARD UNIVERSITY	>1.000
US	PROCTER & GAMBLE	700-800	CH	ROCHE	600-700	US	UNIVERSITY OF CALIFORNIA	900-1000
GB	UNILEVER	600-700	US	HARVARD UNIVERSITY	600-700	FR	INSERM	700-800
NL	UNILEVER	600-700	FR	CNRS	500-600	CH	ROCHE	700-800
US	HARVARD UNIVERSITY	600-700	FR	INSERM	400-500	FR	CNRS	700-800
IN	HINDUSTAN UNILEVER	500-600	US	DUPONT	300-400	DE	HENKEL	500-600
FR	CNRS	500-600	DK	NOVOZYMES	300-400	DK	NOVOZYMES	400-500
US	ISIS PHARMACEUTICALS	400-500	DE	HENKEL	300-400	DE	BASF	400-500
US	MILLENNIUM PHARMA	400-500	GB	UNILEVER	300-400	US	MIT (MASS INST TECHNOLOGY)	400-500
JP	JAPAN S&T AGENCY	400-500	NL	UNILEVER	300-400	CN	CHINESE ACAD OF SCIENCES	300-400
DE	BAYER	400-500	IN	HINDUSTAN UNILEVER	300-400	US	UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA	300-400
CH	ROCHE	400-500	DE	BASF	300-400	JP	FUJIFILM	300-400
US	INCYTE	400-500	CH	NOVARTIS	300-400	GB	UNILEVER	300-400
US	GENENTECH	400-500	DE	BASF PLANT SCIENCE	200-300	NL	UNILEVER	300-400
DE	HENKEL	300-400	US	GENENTECH	200-300	US	CONOPCO, INC., UNILEVER	300-400
DE	BAYER HEALTHCARE	300-400	NL	DSM IP ASSETS	200-300	US	STANFORD UNIVERSITY	300-400
DE	BASF	300-400	DE/CH	ROCHE DIAGNOSTICS	200-300	US	UNIVERSITY OF TEXAS SYSTEM	200-300
FR	INSERM	300-400	US	DANISCO USA	200-300	US	U.S. DEP. OF HEALTH & H.S.	200-300
US	U.S. DEP. OF HEALTH & H.S.S	300-400	US	JOHNS HOPKINS UNIVERSITY	200-300	US	ROCHE	200-300
DK	NOVOZYMES	300-400	US	U.S. DEP. OF HEALTH & H.S.	200-300	CH	NOVARTIS	200-300
US	DUPONT	300-400	US	UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA	200-300	JP	OSAKA UNIVERSITY	200-300
US	CURAGEN CORPORATION	300-400	US	UNIVERSITY OF TEXAS SYSTEM	200-300	JP	UNIVERSITY OF TOKYO	200-300
DE	DEGUSSA	300-400	JP	UNIVERSITY OF TOKYO	200-300	KR	SEOUL NATIONAL UNIVERSITY	200-300
CH	NOVARTIS	200-300	JP	KAO CORPORATION	200-300	NL	DSM IP ASSETS	200-300
TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland			TOP-10 Deutschland		
DE	BAYER	400-500	DE	HENKEL	300-400	DE	HENKEL	500-600
DE	HENKEL	300-400	DE	BASF	300-400	DE	BASF	400-500
DE	BAYER HEALTHCARE	300-400	DE	BASF PLANT SCIENCE	200-300	DE	ROCHE DIAGNOSTICS	200-300
DE	BASF	300-400	DE	ROCHE DIAGNOSTICS	200-300	DE	FRAUNHOFER	100-200
DE	DEGUSSA	300-400	DE	MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT	100-200	DE	EVONIK DEGUSSA	100-200
DE	ROCHE DIAGNOSTICS	200-300	DE	QIAGEN	100-200	DE	MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT	100-200
DE	MERCK PATENT	200-300	DE	FRAUNHOFER	100-200	DE	MERCK PATENT	100-200
DE	MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT	200-300	DE	DKFZ	100-200	DE	DKFZ	90-100

Quelle: Auswertungen des Fraunhofer ISI, basierend auf EPO PATSTAT

Literatur

- Aiginger, K., Rodrik, D., 2020. Rebirth of Industrial Policy and an Agenda for the Twenty-First Century. *Journal of Industry, Competition and Trade* 20, 189-207.
- Aithal, P.S., Aithal, S., 2018. Study of various General-Purpose Technologies and Their Comparison towards developing Sustainable Society. *International Journal of Management, Technology, and Social Sciences (IJMTS)*, (2018) 3(2), 16–33.
- Baglieri, D., Cesaroni, F., Orsi, L., 2014. Does the nano-patent Gold-rush lead to entrepreneurial-driven growth? Some policy lessons from China and Japan. *Technovation* 34, 746-761.
- Balassa, B., 1965. Trade Liberalisation and "Revealed" Comparative Advantage. *The Manchester School* 33(2), 99–123.
- Balland, P.-A., Boschma, R., Crespo, J., Rigby, D.L., 2019. Smart specialization policy in the European Union: relatedness, knowledge complexity and regional diversification. *Regional Studies* 53(9), 1252–1268.
- Bekar, C., Carlaw, K., Lipsey, R., 2018. General purpose technologies in theory, application and controversy: a review. *Journal of Evolutionary Economics* 28(5), 1005–1033.
- Bekkers, R., Verspagen, B., Smits, J., 2002. Intellectual Property Rights and standardization: the case of GSM. *Telecommunications Policy*, 26(3–4), 171–188.
- Belitz, H., Gornig, M., Kemfert, C., Löckener, R., Sundmacher, T., 2021. Prioritäten setzen, Ressourcen bündeln, Wandel beschleunigen: Neue Ansätze in der Industrie- und Technologiepolitik. *WISO Diskurs: Expertisen und Dokumentationen zur Wirtschafts- und Sozialpolitik*, 02/2021. Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn.
- Benner M.J., Tushman M.L. 2002. Process management and technological innovation: a longitudinal study of the photography and paint industries, *Administrative Science Quarterly*, 47, 676–706.
- Benner M.J., Tushman M.L. 2003. Exploitation, exploration, and process management: the productivity dilemma revisited, *Academy of Management Review*, 28, 238–256.
- Blind, K., 2019. CASE: Publizieren, Patentieren und Standardisieren: Die besten drei zur Verwertung: Vergleich der Strategie- Trias für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung (FuE). *Wissenschaftsmanagement*, 2/2019, 13–22.
- Blind, K., Böhm, M., 2019. *The Relationship Between Open Source Software and Standard Setting*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-11592-2, doi:10.2760/937637.

- Blind, K., Von Laer, M., 2021. Paving the path: drivers of standardization participation at ISO, *The Journal of Technology Transfer*. doi: 10.1007/s10961-021-09871-4 (abgerufen am 16. August 2021).
- Blind, K., Bekkers, R.N.A., Dietrich, Y., Iversen, E.J., Köhler, F., Müller, B., Pohlmann, T., Smeets, S.J.J., Verweijen, G.J.H., 2011. Study on the interplay between standards and intellectual property rights (IPRs). Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Blind, K., Hermann, P., Abdelkafi, N., Gruber, S., Hoffmann, W., Neuhäusler, P., Pohle, A., Stein, L.T., Weiße, M., 2020. Relevanz der Normung und Standardisierung für den Wissens- und Technologietransfer, Bericht der Fraunhofer Gesellschaft, München.
- Blind, K., Böhm, M., Grzegorzewska, P., Katz, A., Muto, S., Pätsch, S., Schubert, T., 2021. The impact of Open Source Software and Hardware on technological independence, competitiveness and innovation in the EU economy. Final Study Report. European Commission, Brussels, doi: 10.2759/430161.
- Block, F., 2011. Innovation and the Invisible Hand of Government. In: Block, F.L., Keller, M.R., (Hrsg.) 2011. State of Innovation. The U.S. Government's Role in Technology Development. Routledge, New York, 1-26.
- BMBF, 2019. Digitale Zukunft: Lernen. Forschen. Wissen. Die Digitalstrategie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, 2019.
- BMBF, 2021. Technologisch souverän die -Zukunft gestalten: BMBF-Impulspapier zur technologischen Souveränität, 30 Seiten. (abgerufen am 29. Juni 2021).
- Bonvillian, W.B., 2017. Advanced Manufacturing: A New Policy Challenge. *Annals of Science and Technology Policy* 1(1), 1-131.
- Bresnahan, T.F., Trajtenberg, M., 1995. General purpose technologies "Engines of growth"? *Journal of econometrics* 65(1), 83–108.
- Bundesregierung, 2020. Nationale Bioökonomiestrategie.
- Butter, M., Fischer, N., Gijsberts, G., Hartmann, C., Heide, M. de, van der Zee, F., 2014. Horizon 2020. Key enabling technologies (KETs), booster for European leadership in the manufacturing sector. Study for the ITRE Committee, Brussels.
- Deutsche Bundesbank, 2020. Folgen des zunehmenden Protektionismus. Monatsbericht 40 (Januar 2020). Deutsche Bundesbank, Frankfurt am Main.

-
- Dinges, M., Hofer, M., Leitner, K.H., Löschenbrand, D., Wasserbacher, D., Zelenbaba, S., Rainer, B., Dachs, B., Zemen, T., Blind, K., Camps, P., Delaere, S., Deshpande, A., Gunashekar, S., Virdee, M. 2021. 5G supply market trends, Report for DG Connect; <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/074df4ff-f988-11eb-b520-01aa75ed71a1/language-en> (abgerufen am 16. August 2021).
- Edler, J., Blind, K., Frietsch, R., Kimpeler, S., Kroll, H., Lerch, C., Reiss, T., Roth, F., Schubert, T., Schuler, J., Walz, R. 2020. Technology Sovereignty: from demand to concept. Perspectives-Policy Brief. Karlsruhe: Fraunhofer ISI. <https://www.econstor.eu/handle/10419/233462> (abgerufen am 16. August 2021).
- Edler, J., Blind, K., Kroll, H., Schubert, T. 2021. Technology sovereignty as an emerging frame for innovation policy: Defining rationales, ends and means, Fraunhofer ISI Discussion Papers - Innovation Systems and Policy Analysis, No. 70, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- Ernst, D., 2016. Advanced Manufacturing and China's Future for Jobs. East-West Center Working Papers. Innovation and Economic Growth Series, Nr. 8, 1-34.
- Europäische Kommission, 2009. Current situation of key enabling technologies in Europe.: Commission Staff Working Document accompanying the Communication from the Commission, EC COM 2009/1257. Europäische Kommission, Brüssel.
- Europäische Kommission, 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. Brüssel.
- Europäische Kommission, 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. Europäische Kommission, Brüssel.
- Europäische Kommission, 2020. Advanced Technologies for Industry-Methodological report; Indicator framework and data calculations. Europäische Kommission, Brüssel.
- Evangelista, R., Meliciani, V., Vezzani, A., 2018. Specialisation in key enabling technologies and regional growth in Europe. *Economics of Innovation and New Technology* 27(3), 273–289.
- Evens, R., Kaitin, K., 2015. The Evolution of Biotechnology and its Impact on Health Care. *Health Affairs* 34(2), 210-219.
- Falck, O., Wölfl, A., 2020. Auf dem Weg zu einer modernen Industriepolitik. *Branchen und Sektoren. Ifo-Schnelldienst* 7(1), 60-63
-

- Fisher, E., Mahajan, R.L., 2006. Nanotechnology legislation. Contradictory intent? US federal legislation on integrating societal concerns into nanotechnology research and development. *Science and Public Policy* 33(1), 5-16.
- Freeman, C., 1982. *The Economics of Industrial Innovation*. Pinter Publishers, London.
- Frietsch, R., Schmoch, U., 2010. Transnational Patents and International Markets. *Scientometrics* 82(1), 185–200.
- Gao, Y., Biyu, J., Weiyu S., Sinko, P.J., Xie, X., Zhang, H., Jia, L., 2016. China and the United States – Global partners, competitors and collaborators in nanotechnology development. *Nanomedicine* 12(1), 13-19.
- Gaulier, G., Zignago, S., 2010. BACI: International Trade Database at the Product-Level (the 1994-2007 Version). SSRN Electronic Journal.
- Gerybadze, A., 2015. Instrumente der Innovationspolitik. Auf dem Weg zu einer neuen Industriepolitik? *WSI-Mitteilungen* 68(7), 516–525.
- Graham, S.J.H., Iacopetta, M., 2009. Nanotechnology and the emergence of a general purpose technology. *Annals of Economics and Statistics* 115, 116.
- Grupp, H., 1998. *Foundations of the Economics of Innovation: Theory, Measurement and Practice*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Hall, B.H., Trajtenberg, M., 2004. Uncovering GPTs with patent data. National Bureau of Economic Research.
- Hausmann, R., Hidalgo, C.A., Bustos, S., Coscia, M., Simoes, A., 2014. *The atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity*. MIT Press.
- Heimberger, H., Horvat, D., Kroll, H., Shauchuk, P., 2020a. *Advanced Technologies for Industry – International reports. Report on China. Technological capacities and key policy measures. Bericht für die Europäische Kommission*. Europäische Kommission, Brüssel.
- Heimberger, H., Horvat, D., Kroll, H., Shauchuk, P., 2020b. *Advanced Technologies for Industry – International reports. Report on the United States of America. Technological capacities and key policy measures. Bericht für die Europäische Kommission*. Europäische Kommission, Brüssel.
- Helpman, E., 1998. *General purpose technologies and economic growth*. MIT press, Cambridge, MA.
- Helpman, E., Trajtenberg, M., 1994. *A time to sow and a time to reap: growth based on general purpose technologies*. National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA.
- Hicks, D.J., Simmons, R., 2019. The National Robotics Initiative. A Five-Year Retrospective. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 26(3), 70-77

-
- Hidalgo, C.A., Klinger, B., Barabási, A.-L., Hausmann, R., 2007. The product space conditions the development of nations. *Science* 317(5837), 482–487.
- Hirschman, A., 1964. The Paternity of an Index. *American Economic Review* 54(0).
- Howitt, P., 1998. Measurement, obsolescence, and general purpose technologies. *General purpose technologies and economic growth* 9, 219–252.
- Hui, X., 2020. Facilitating Inclusive Global Trade: Evidence from a Field Experiment. *Management Science* 66(4), 1737–1755.
- Information Society Technologies Advisory Group, (ISTAG), 2012. Software Technologies: The Missing Key Enabling Technology – Toward a Strategic Agenda for Software Technologies in Europe.
- Izsak, K., Perez, M., Kroll, H., Wydra, S., 2020. Advanced Technologies for Industry – International reports. EU Report. Technological capacities and key policy measures. Bericht für die Europäische Kommission. Europäische Kommission, Brüssel.
- Jie Yang, 2008. An Analysis of So-Called Export-led Growth. *IMF Working Papers* 2008 (220).
- Jovanovic, B., Rousseau, P.L., 2005. General purpose technologies In: Aghion, P., Durlauf, S., (Hrsg.) 2005. *Handbook of economic growth*, 1st Edition, 1181–1224. Elsevier, North Holland.
- Kane, E., 2017. Is Blockchain a General Purpose Technology? RMIT University, Melbourne, SSRN 2932585.
- Kazmierczak, M., Ritterson, R., Gardner, D., Casagrande, R., Hanemann, T., Rosen, D.H., 2019. China's Biotechnology Development. The Role of US and Other Foreign Engagement: A report prepared for the U.S.-China Economic and Security Review Commission. Europäische Kommission, Brüssel.
- Kleinman, D., Delborne, J., Autry, R., 2008. Beyond the Precautionary Principle in Progressive Politics: Toward the Social Regulation of Genetically Modified Organisms. *Tailoring Biotechnologies* 4(1), 41-54.
- Von Laer, M., Blind, K., Ramel, F., 2021. Standard essential patents and global ICT value chains with a focus on the catching-up of China. *Telecommunications Policy*, <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2021.102110> (abgerufen am 16. August 2021).
- Lia, N., Guan, J.C., 2016. Policy and innovation: Nanoenergy technology in the USA and China. *Energy Policy* 91, 220-232.
- Lipsey, R.G., Carlaw, K.I., Bekar, C.T., 2005. *Economic transformations: general purpose technologies and long-term economic growth*. OUP, Oxford.

- Liu, K., 2018. Chines Manufacturing in the Shadow of the China-US Trade War. *Economic Affairs* 38(3), 307-324.
- Melitz, M.J., 2003. The impact of trade on intra-industry reallocations and aggregate industry productivity. *econometrica* 71(6), 1695–1725.
- Michels, C., Schmoch, U., 2012. The growth of science and database coverage. *Scientometrics* 93(3), 831–846.
- Montresor, S., Quatraro, F., 2017. Regional Branching and Key Enabling Technologies: Evidence from European Patent Data. *Economic Geography* 93(4), 367–396.
- Moore, S., 2020. China's role in the global biotechnology sector and implications for US policy. *Global China Series*. Brookings Institution, Washington, D.C.
- Moser, P., Nicholas, T., 2004. Was electricity a general purpose technology? Evidence from historical patent citations. *American Economic Review* 94(2), 388–394.
- OECD, Eurostat, 2005. *Oslo Manual. Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data*. Paris 2005.
- OECD, Eurostat, 2018. *Oslo Manual 2018. Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation*. Paris 2018.
- Owen, G., Hopkins, M.M., 2016. *Science, the State and the City: Britain's Struggle to Succeed in Biotechnology* by Geoffrey. Oxford, Oxford University Press
- Petralia, S., 2020. Mapping general purpose technologies with patent data. *Research Policy* 49(7), 104013.
- Pohlmann, T., Blind, K., Heß, P., 2020. Studie zur Untersuchung und Analyse der Patentsituation bei der Standardisierung von 5G, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
- Qiu, J., 2016. Nanotechnology development in China: challenges and opportunities. *National Science Review* 3, 148-152.
- Rammer, C., Behrens, V., Doherr, T., Krieger, B., Peters, B., Schubert, T., Trunschke, M., von der Burg, J., 2020. Innovationen in der Deutschen Wirtschaft. Indikatorbericht zur Innovationserhebung 2019. ZEW, Fraunhofer ISI, Infas.
- Rammer, C., Doherr, T., Krieger, B., Marks, H., Niggemann, H., Peters, B., Schubert, T., Trunschke, M., von der Burg, J., 2021. Innovationen in der Deutschen Wirtschaft. Indikatorbericht zur Innovationserhebung 2020. ZEW, Fraunhofer ISI, Infas, Mannheim, Karlsruhe, Bonn.
- Ruttan, V.W., 2008. General purpose technology, revolutionary technology, and technological maturity, Staff papers, University of Minnesota.

-
- Sargent, J.F., 2016. Nanotechnology: A Policy Primer. Congressional Research Service Report 7-5700. Washington D.C.
- Schiefer, A., 2018. Das neue Oslo-Manual und die Auswirkungen auf die Innovationsstatistik. Forschung (FuE), Innovation Statistische Nachrichten 11/2018.
- Schmaltz, T., Thielmann, A., Reiss, T., 2021. Hemmnisse und Bedürfnisse der Mikroelektronikindustrie 2019 (Eine Befragung des ZVEI); Interner Projektbericht 2020, Veröffentlichung geplant 2021. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- Schmoch, U., 2007. Double-Boom Cycles and the Comeback of Science-Push and Market-Pull, *Research Policy* 36(7), 1000–1015.
- Schmoch, U., 2008. Concept of a Technology Classification for Country Comparisons. Final Report to the World Intellectual Property Organization (WIPO). Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- Schüller, M., 2015. Chinas Industriepolitik: Auf dem Wege zu einem neuen Erfolgsmodell? WSI Mitteilungen 07/2015. Das Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Institut (WSI), Düsseldorf.
- Shan, J., Sun, F., 1998. On the export-led growth hypothesis: the econometric evidence from China. *Applied Economics* 30(8), 1055–1065.
- Shi-Kupfer, K., Ohlberg, M., 2019. China's Digital Rise. Challenges for Europe. Merics Paper on China, Nr.7. Mercator Institute for China Studies, Berlin.
- Siliverstovs, B., Herzer, D., 2006. Export-led growth hypothesis: evidence for Chile. *Applied Economics Letters* 13(5), 319–324.
- Thielmann, A., 2009. Blockaden bei der Etablierung neuer Schlüsseltechnologien. Blockaden bei der Etablierung der Nanoelektronik. TAB-Brief, Nr. 35, Juni 2009, 36–40. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Berlin.
- Thielmann, A., Zimmermann, A., Gauch, S., Nusser, M., Hartig, J., Wydra, S., Blümel, C., Blind, K., 2009. Blockaden bei der Etablierung neuer Schlüsseltechnologien, Innovationsreport, Arbeitsbericht Nr. 133, Juli 2009, 248. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Berlin.
- Tushman, M.L., O'Reilly, C. 1986. Ambidextrous Organizations: Managing Evolutionary and Revolutionary Change, *California Management Review*, 38, 551-568.
- Vallas, S.P., Kleinman, D.L., Biscotti, D., 2011. Political Structures and the Making of U.S. Biotechnology. In: Block, F.L., Keller, M.R. (Hrsg.): *State of Innovation. The U.S. Government's Role in Technology Development*. Routledge, New York, 57-77.
- van Velde, E. de, Pieterjan, D., Wydra, S., Som, O., Heide, M. de, 2015. Key enabling technologies (Kets) observatory. Second report.
-

- Vogel, R. (2011): Exploration und Exploitation: Stand und Perspektiven der internationalen Diskussion, Diskussionspapier Nr. 10/2011, Diskussionspapiere des Schwerpunktes Unternehmensführung am Fachbereich BWL, Universität Hamburg
- Wübbeke, J., Meissner, M., Zenglein, M., Ives, J., Conrad, B., 2016. Made In China 2025. The making of a high-tech superpower and consequences for industrial countries. Merics Paper on China, Nr. 2. Mercator Institute for China Studies, Berlin.
- Wydra, S., 2010. Produktions- und Beschäftigungseffekte neuer Technologien: am Beispiel der Biotechnologie. Peter Lang International Academic Publishers.
- Wydra, S., 2011. Innovation and industrial policy for key enabling technologies in Europe—Findings for micro-/nanoelectronics and industrial biotechnology: In 3rd European Conference on Corporate R&D and Innovation, CONCORD-2011, October 6th 2011, Seville (Spain), the Dynamics of Europe's Industrial Structure and the Growth of Innovative Firms.
- Wydra, S., Leimbach, T., 2015. Integration von Industrie- und Innovationspolitik: Beispiele aus den USA und Israel und Ansätze der neuen EU-Industriepolitik. Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung, 84(1), 121-134.
- Wydra, S., Blümel, C., Nusser, M., Thielmann, A., Lindner, R., Mayr, C., 2010. Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Wirtschaft im Hinblick auf die EU-Beihilfepolitik – am Beispiel der Nanoelektronik, Innovationsreport, Arbeitsbericht Nr. 137, 2010, 228 Seiten. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Berlin.
- Wydra, S., Hüsing, B., Aichinger, H., Reiss, T., Pullmann, L., Fischer, P., Schwarz, A., Kempter-Regel, B., Kindervater, R., 2021. Potenzialanalyse und Roadmapping Biointelligenz für Baden-Württemberg.
- Yalcin, E., Felbermayr, G., Steininger, M., 2017. Konsequenzen einer protektionistischen Handelspolitik der USA. GED Studie. Bertelsmann Stiftung, Gütersloh.