



KI-Entwicklung im Systemwettbewerb

Eine Chance für Deutschland?

Christian Hübner

Auf einen Blick

Deutschland zählt aus der globalen Perspektive zu den führenden KI-Entwicklungsnationen. Es verfügt über eine starke Forschungslandschaft, anpassungsfähige Wirtschaft und gute technische Infrastrukturen. Allerdings droht es aufgrund der enormen Geschwindigkeit, die die USA und China über ihre Systemrivalität in der KI-Entwicklung vorlegen, abgehängt zu werden. In diesem Umfeld gilt es, die geopolitischen Dynamiken zu erkennen und strategisch zu nutzen. Chancen ergeben sich dann in der Förderung des Zugangs zu heimischen Daten, der Weiterentwicklung wirtschaftlicher Rahmenbedingungen für die Chipproduktion in Deutschland, der Entwicklung eigener Quantencomputer und der Einforderung einer wettbewerbsfähigen KI-Regulierung.

Inhaltsverzeichnis

Einführung	3
Globale Spitzenreiter	5
Generative KI und Large-Language-Modelle (LLM)	10
Rechenleistung, KI-Chips und Lieferketten	15
Quantencomputer	20
Regulierung	24
Fazit	27

Einführung

Der weltweite Wettbewerb in der Entwicklung von Anwendungen der Künstlichen Intelligenz (KI) hat nicht zuletzt durch den einfachen Zugang und die außergewöhnlichen Fähigkeiten von generativen Sprachprogrammen wie ChatGPT oder Bard erheblich zugenommen. Mit ihnen können sich viele Menschen über unterschiedliche Themen informieren und austauschen, seien es literarische Texte, wissenschaftliche Abhandlungen oder Programmcodes. Selbst Bilder, Videos und Musik können damit ausgewertet und generiert werden. Die Antworten der Programme lassen sich zudem kaum noch von menschlichen Antworten unterscheiden. Entsprechend hoch wird ihr Potenzial eingeschätzt. Sie gelten als Basistechnologie, aus der weitere innovative Produkte und Dienstleistungen hervorgehen, die wiederum die Produktivität ganzer Volkswirtschaften steigern können.

KI-Anwendungen werden bereits heute in vielen Bereichen von Wirtschaft, Forschung und Industrie eingesetzt. Sie helfen, die Diagnose von Krankheiten zu verbessern und globale Lieferketten zu optimieren. Sie senken Energiekosten durch genauere Verbrauchsprognosen, etwa in der Stahlindustrie oder im Wärmesektor. Oder sie helfen, die Auswirkungen des Klimawandels besser vorherzusagen, um mehr Zeit für Anpassungs- oder Präventionsmaßnahmen zu gewinnen. Im militärischen Bereich verbessern sie die Fähigkeit zur Abwehr von Cyberangriffen, die Geschwindigkeit der Entscheidungsfindung oder ermöglichen den effizienten Einsatz autonomer Technologien in der Luft, an Land und auf See.¹

Mit der wachsenden Bedeutung von KI nimmt auch die kritische Auseinandersetzung mit ihr zu. Die öffentlichen Bedrohungsszenarien, mit denen die Risiken von KI beschrieben werden, reichen von der Vorstellung einer bald Realität werdenden, den Menschen entmündigenden, allumfassenden KI bis hin zum Vergleich mit der Zerstörungskraft einer Atombombe. Die Formulierungen sind zugespitzt und scheinen eher dem Science-Fiction-Genre entnommen zu sein. Sie stehen aber für Entwicklungen, die sich unter anderem in möglichen Arbeitsplatzver-

lusten für Menschen, manipulativen Deepfakes oder unkontrollierbaren Drohnen artikulieren. Der politische Ruf nach globaler Regulierung wird lauter. Der Wettbewerb um die Entwicklung leistungsfähiger KI hat sich dadurch nicht verringert. Im Gegenteil, er ist voll entbrannt und findet entlang ihrer globalen Wertschöpfungs- und Lieferketten statt. Entsprechend hoch sind die Anstrengungen vieler Regierungen, diesen Bereich strategisch zu definieren und gezielt auszubauen.

Angeführt wird der Wettbewerb von den Systemrivalen USA und China, die hoch motiviert sind, ihre Spitzenpositionen zu verteidigen und auszubauen. Wer von den beiden Mächten in dem Rennen führt, welche Länder die nachfolgenden Plätze einnehmen und wie sich Deutschland darin einordnet, ist wiederum von der zu beurteilenden Perspektive abhängig. Erkennbar ist jedoch, dass die aktuellen geopolitischen Dynamiken im Bereich der Entwicklung generativer KI, der Herstellung von Computerchips, der Entwicklung von Quantencomputern und das regulatorische Umfeld Einfluss darauf nehmen.

Globale Spitzenreiter

Die globale KI-Landschaft verändert sich rasant. Immer mehr Regierungen auf der ganzen Welt fördern aktiv die KI-Entwicklung in ihren Ländern. Über Länderrankings wird der Versuch unternommen, den Erfolg dieser Bemühungen aus unterschiedlichen Blickwinkeln einzuordnen. Aus diesen Ergebnissen lassen sich Hinweise ableiten, inwieweit politische Rahmenbedingungen die KI-Entwicklung prägen.

(1) Der Critical Technology Tracker des Australian Strategic Policy Institute (ASPI) vergleicht die KI-Entwicklung aus sicherheitspolitischer Perspektive.² Dazu analysiert er zehn Prozent der am häufigsten zitierten Forschungsartikel, die sich mit kritischen Technologien befassen. Dahinter steht die Überlegung, dass die Wahrscheinlichkeit, dass daraus tatsächlich patentierbare und letztlich nutzbare sicherheitspolitisch relevante Technologien entstehen, besonders hoch ist. In der Kategorie KI-Technologie werden die Forschungsbereiche (i) Datenanalyse, (ii) Algorithmen und KI-Hardwarebeschleuniger, (iii) Computerchip-Design und -Herstellung, (iv) kontradiktorische KI, (v) maschinelles Lernen und (vi) Sprachverarbeitungssysteme verglichen. In den Rankings belegen China und die USA immer die ersten beiden Plätze. Wobei China vier Mal an erster Stelle steht. Indien liegt in vier der sechs Kategorien auf Rang drei. Es folgen auf den Plätzen vier und fünf gehäuft Großbritannien und Südkorea. Italien liegt zwei Mal auf Platz fünf. Deutschland kann im Forschungsbereich Entwurf und Herstellung von Computerchips international den vierten Platz belegen.

(2) Der Top-Ranked AI Nations (TRAIN) Index der Fletcher School (Tufts University) indiziert die Bereiche Datenvolumen, Datenzugang (u. a. Regulierung und Zugang zu öffentlichen Daten), Kapital (u. a. Investitionen und Talente) sowie Innovationskraft (u. a. Patente) mit 45 Indikatoren.³ Auf dieser Grundlage sind 25 führende KI-Entwicklungsnationen verglichen worden. Im Ergebnis ergibt sich eine klare Führung der USA, die vor allem über ihre Kapitalressourcen und Datenverfügbarkeit punktet. Es folgen China, Großbritannien, Japan und Deutschland. In dem Ranking zeigt sich im Besonderen, die Leistungsfähigkeit Groß-

britanniens in der KI-Entwicklung. Es hat sehr früh schon eine KI-Strategie formuliert und verfolgt darüber eine KI-Regulierungspolitik, in der vor allem Innovationen fördernde Rahmenbedingungen im Vordergrund stehen. Deutschland steht in diesem Ranking auf Platz fünf, wobei die Abstände zu Großbritannien und Japan relativ gering sind. Würde nur die Kategorie Datenzugang bewertet werden stünde Deutschland in diesem Ranking sogar auf Platz zwei nach Großbritannien.⁴

(3) Der AI Readiness Index 2023 des Oxford Insight Institute konzentriert sich auf die Frage, inwieweit Regierungen in der Lage sind, KI für öffentliche Dienstleistungen zu nutzen.⁵ Dazu wurde ein gewichteter Index aus 193 Ländern mit 39 Indikatoren aus den Bereichen Regierung, Technologie, Daten und Infrastruktur berechnet. Darunter sind Indikatoren zur KI-Strategie, zum Datenschutzrecht, zur 5G-Infrastruktur, zum Internetzugang, zur KI-Ausbildung oder zu den staatlichen Ausgaben für Forschung und Entwicklung. Angeführt wird das Ranking von den USA, gefolgt von Singapur, Großbritannien, Finnland und Kanada. Die USA haben eine besondere Dominanz im Technologiebereich, die sich unter anderem durch ein hohes Innovationsniveau und Unternehmen auszeichnet, die der Regierung fertige KI-Produkte liefern können. Im Bereich der allgemeinen digitalen Kompetenz der Bevölkerung ist Singapur jedoch besser aufgestellt. Insgesamt zeigt die Regierung von Singapur eine hohe Bereitschaft, KI-Technologien zur Lösung von Problemen einzusetzen. China liegt auf Platz 16. Seine herausragenden Kompetenzen im Bereich der KI-Forschung und -Entwicklung werden durch Defizite im Bereich des Internetzugangs von Haushalten in ländlichen Regionen überlagert. Deutschland liegt in diesem Ranking auf Platz 8.

(4) Der Global AI Index von Tortoise Media umfasst 62 Länder, die aktiv in die Entwicklung von KI investieren.⁶ Er konzentriert sich auf die aktuellen KI-Kapazitäten eines Landes und stützt sich auf 111 Indikatoren, die drei Kategorien mit sieben Unterkategorien zugeordnet werden können: Umsetzung (Talente, Infrastruktur, operatives Umfeld, Regulierung und so weiter), Innovation (Forschung und Entwicklung) und Investition (Regierungsstrategie und kommerzielles Umfeld). Die USA führen das Ranking an, gefolgt von China. An dritter Stelle liegt Singapur, gefolgt von Großbritannien und Kanada. Der Vorsprung der

USA gegenüber China zeigt sich hier insbesondere im Bereich der Investitionen in den KI-Sektor. Singapur schneidet bei den meisten relativen Indikatoren wie der Anzahl der KI-Fachkräfte pro Million Einwohnerinnen und Einwohner gut ab. Großbritannien ist stark bei den inländischen KI-Investitionen. Die Kompetenz im Bereich der generativen KI wird von Tortoise Media mit einem separaten Ranking von zehn Ländern anhand von zehn Indikatoren aufgegriffen. Verglichen werden die Entwicklungen in den Bereichen Forschung, Patente und Kommerzialisierung. China kann die meisten Publikationen im Bereich der generativen KI vorweisen. Im Vergleich zu China werden jedoch US-amerikanische Publikationen im Bereich der großen Sprachmodelle häufiger zitiert. Im Bereich der erteilten Patente für Anwendungen der generativen KI können die USA zehn Mal mehr vorweisen als China. Deutschland liegt im Gesamtranking auf Platz 8 und im Spezialranking für generative KI auf Platz 6. Im Gesamtranking wird für Deutschland ein hoher KI-Fachkräftewert ausgewiesen, der im Einzelnen betrachtet Deutschland im weltweiten Vergleich auf Platz 3 hinter den USA und Indien platziert.

(5) Der Global Computing Index umfasst 15 Länder auf sechs Kontinenten.⁷ Er zeigt die Auswirkungen des Ausbaus der Rechenleistung eines Landes auf das Bruttoinlandsprodukt und die digitale Wirtschaft. Die Rechenleistung wird durch vier Bereiche mit spezifischen Unterkategorien dargestellt. Diese sind: (i) Rechnerkapazität, unter anderem Anzahl der Hochleistungsrechner und Ausgaben für Server; (ii) Rechereffizienz, unter anderem Ausgaben für Cloud-Dienste und durchschnittliche Nutzung externer Server zur Datenspeicherung; (iii) Infrastrukturunterstützung, unter anderem Anzahl der Rechenzentren und jährliche Bereitstellung von Netzwerkdiensten für Unternehmen sowie (iv) Anwendungsfelder, unter anderem KI, Robotik und Big Data. Auf dieser Grundlage ergibt sich ein Ranking für Rechenleistung, bei dem die USA vor China führen. Es folgen Japan, Deutschland und Großbritannien. Das Ranking spiegelt nicht ausschließlich die Entwicklung der Rechenleistung mit Blick auf KI wider, da es auch andere Anwendungen umfasst. Dennoch gibt es indirekt einen Überblick, inwieweit die technischen Voraussetzungen für die Entwicklung von KI in den jeweiligen Ländern gegeben sind.

Globale Rankings

Schwerpunkt Einrichtung

Top 5 nach Ländern

	1	2	3	4	5	
Sicherheit	i	China	USA	Indien	UK	Italien
	ii	China	USA	UK	Südkorea	Indien
	iii	USA	China	Indien	Deutschland	Italien
	iv	China	USA	Australien	Indien	UK
	v	China	USA	Indien	UK	Südkorea
	vi	USA	China	Indien	UK	Südkorea
Daten/ Innovation	Australian Strategic Policy Institute (ASPI) – Critical Technology Tracker (2023). (i) Datenanalyse, (ii) Algorithmen und KI-Hardware-beschleuniger, (iii) Computerchip-Design und -Herstellung, (iv) kontradiktorische KI, (v) maschinelles Lernen und (vi) Sprachverarbeitungssysteme					
Governance	Top-Ranked AI Nations (TRAIN) Index der Fletcher School (Tufts University)					
	USA	China	UK	UK	Japan	Deutschland
Umsetzung/ Umfeld/ Innovation	Oxford Insights – Government AI Readiness Index 2023.					
	USA	China	Singapur	UK	Finnland	Kanada
Computer- leistung	Trotoise Media – Global AI Index.					
	USA	China	Singapur	UK	UK	Kanada
Computer- leistung	2021–2022 Global Computing Index Assessment Report					
	USA	China	Japan	Japan	Deutschland	UK

(Eigene Zusammenstellung)

Die hier ausgewählten Rankings zeigen eine klare globale Führung der USA und Chinas in der KI-Entwicklung. Unterschiede ergeben sich dahingehend, dass China bei sicherheitsrelevanten KI-Technologien punktuell vor den USA liegt. Indien, Großbritannien und Südkorea folgen mit deutlichem Abstand. Deutlich vor China liegen die USA bei der wirtschaftlichen Nutzung, beim Hervorbringen marktfähiger KI-Innovationen und beim gesellschaftlichen Zugang zu KI-Technologien. Dahinter folgen Großbritannien, Singapur und Kanada. Im Bereich Forschung liegt China zwar vor den USA, wenn man nur die Anzahl der Forschungspublikationen zum Thema KI betrachtet. Dieser Unterschied wird noch deutlicher, wenn auch die Forschungspublikationen aus chinesischsprachigen Datenbanken berücksichtigt werden.⁸ Qualitative Analysen zeigen jedoch, dass zum Beispiel bei der Fokussierung auf neueste Entwicklungen wie die generative KI die USA auch dann in der Wissenschaft stärker sind als China.⁹ Weitergehende Analysen in diesem Bereich zeigen zudem, dass sich die KI-Forschung zwischen den USA und China dahingehend unterscheidet, dass in China der Fokus im Bereich der Überwachungstechnologien wie Objekterkennung, Nachverfolgung oder Szenenverständnis von Videoaufnahmen liegt. Während in den USA der Schwerpunkt in den Bereichen Sensoranalyse, 3D, Grafik, Audio oder Spracherkennung liegt.¹⁰

Deutschlands Stärke im internationalen Vergleich liegt in der KI-Grundlagenforschung. Dieser Umstand lässt sich auch in anderweitigen ausschließlichen Wissenschaftsrankings, die Deutschland in KI relevanten Bereichen wie Sprachverarbeitung oder Maschinelles Lernen vergleichen, darstellen. Dort nimmt Deutschland im globalen Vergleich unmittelbar nach den USA und China sogar Platz 3 ein.¹¹ Darüber hinaus verfügt Deutschland über hohe Kompetenzen in der Entwicklung von Computerchips und kann zugleich auf eine gute Rechenleistungsinfrastruktur zurückgreifen. Verbesserungspotenzial gibt es im Bereich der wirtschaftlichen Erschließung der Grundlagenforschung für die Entwicklung von innovativen Technologien. Anderen westlichen Demokratien wie Großbritannien, Japan, Südkorea oder Kanada, die häufig unmittelbar nach den USA in internationalen Rankings erscheinen, gelingt dies besser.

Generative KI und Large-Language-Modelle (LLM)

Viele KI-Anwendungen, die heute auf dem Markt sind und im globalen Wettbewerb stehen, sind aus dem KI-Forschungsfeld „Maschinelles Lernen“ hervorgegangen. Dabei geht es darum, Programme zu entwickeln, die auf der Basis von Daten selbstständig lernen, das heißt die nicht zusätzlich programmiert werden müssen, um bestimmte Dinge zu tun. Dazu werden in Anlehnung an menschliche Denkprozesse neuronale Netze entwickelt, die den Lernprozess simulieren sollen. Ziel ist es, auf diese Weise Zusammenhänge in Daten zu erkennen. Dieser Prozess wird durch Deep-Learning-Ansätze vorangetrieben beziehungsweise optimiert, indem zusätzliche Schichten zwischen den Knoten der neuronalen Netze berücksichtigt werden, die Muster noch genauer erkennen können.

Mit diesem Ansatz können Daten nicht nur sehr genau analysiert werden. Es können auch Modelle entwickelt beziehungsweise trainiert werden, die auf Basis eines Eingabedatensatzes neue Daten in Form von Texten, Bildern oder Videos generieren. Diese trainierten Modelle werden als Foundation Models (FMs) bezeichnet. FMs wird ein hoher Marktwert zugeschrieben. Sie können von Unternehmen oder anderen Institutionen gekauft, gemietet oder, wenn die Anbieter es erlauben, auch speziell trainiert werden. Ihr volles Einsatzpotenzial lässt sich gegenwärtig kaum abschätzen.

Zu den FMs gehören die Large Language Models (LLMs), die es ermöglichen, Sprache zu generieren und zu verstehen. Als Datenbasis dienen Texte aus Büchern, Sozialen Medien oder Internetseiten. Spezielles Training der LLMs mit spezifischen Daten ermöglicht zudem konkrete Branchen- und Unternehmensspezifika. Sie eignen sich für den Kundendienst, Übersetzungen, die Generierung von Inhalten, zum Beispiel für Werbetexte, die Bildklassifikation, die Erstellung und Bearbeitung hochauflösender Bilder, die Musikproduktion, die Dokumentenanalyse, die Robotik, das Gesundheitswesen oder in autonomen Fahrzeugen.

Entsprechend hoch sind die Investitionen, die in die Entwicklung von LLMs fließen. Allein in das US-amerikanische Start-up OpenAI, das ChatGPT anbietet, sind bis heute über elf Milliarden US-Dollar von verschiedenen Investoren geflossen.¹²

LLMs sind trotz der rasanten Entwicklung noch sehr junge Modelle, die Schwächen aufweisen. Sie neigen zum Beispiel zu sogenannten Halluzinationen. Dies ist der Fall, wenn der vom LLM generierte Output plausibel, aber faktisch falsch ist. Ein weiteres großes Problem ist der Black-Box-Charakter. Es ist schwierig, die internen Mechanismen zu verstehen, die ihre Entscheidungsfindung steuern. Diese mangelnde Interpretierbarkeit kann Fragen der Rechenschaftspflicht, des Vertrauens und des Potenzials für verzerrte oder unerwünschte Ergebnisse aufwerfen. Ein wichtiger Faktor ist die Qualität des zugrunde liegenden Datensatzes. LLMs können sich auf implizites Wissen in den Trainingsparametern verlassen, was zu verzerrten oder ungenauen Ergebnissen führen kann. Prompting (Eingaben beziehungsweise Aufforderungen) kann zu einem Einfallstor für die Manipulation von LLMs werden, indem die wiederholte Eingabe von Fragen mit schädlichem Inhalt die Ausgabe für andere Benutzerinnen und Benutzer verändert. Ansätze zur Lösung dieser Herausforderungen in der Entwicklung von LLMs nehmen erheblichen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit dieser Modelle.

Die globale LLM-Landschaft entwickelt sich schnell und der Wettbewerb unter den kommerziellen LLM-Entwicklern ist hoch. Gleichzeitig wird die Situation dadurch verschärft, dass es zahlreiche Entwickler, Entwicklergemeinschaften und Unternehmen gibt, die ihre LLMs kostenlos als Open Source anbieten. Dies fördert die Entwicklung von LLMs, übt aber auch Druck auf Unternehmen aus, die die Kontrolle über ihre Software-Entwicklungen behalten. Die Stanford University listet in einer Übersicht 160 große LLMs auf.¹³ Die LLM-Plattform Hugging Face führt zahlreiche weitere Open Source LLMs auf.¹⁴ Diese Übersichten geben jedoch nur einen ungefähren Überblick über die weltweite LLM-Landschaft. Insbesondere chinesische LLM-Entwickler, die sich untereinander ebenfalls in einem starken Wettbewerb befinden, sind darin nur eingeschränkt abgebildet.¹⁵¹⁶ Schätzungen gehen davon aus, dass circa 73 Prozent aller weltweit publizierten LLMs aus den USA und 15 Prozent aus China stammen.¹⁷ Es ist allerdings davon auszugehen, dass China in diesem

Überblick: Ausgewählte Large-Language-Modelle (LLMs)

Modelle	Unternehmen/Entwickler	Land
PaLM2, Bard, Gemini	Google	USA
Llama, Llama2	Meta	
GPT4, GPT3.5	OpenAI	
Claude	Anthropic	
Jurassic	A21 Labs	Israel
Luminous	Aleph Alpha	Deutschland
Mistral 7B	Mistral AI	Frankreich
Poro	Silo AI	Finnland
HyperClover	Naver	Südkorea
YaLM 100B	Yandex	Russland
Falcon, Noor (Arabic)	Technology Innovation Institute	Vereinigte Arabische Emirate
Ernie	Baidu	China
PanGu- Σ	Huawei	
Tongyi Qianwen	Alibaba	
HunYuan	Tencent	
Yi-34b	01.AI	

(Eigene Zusammenstellung)

Bereich deutlich aufholt. Nach Angaben chinesischer Behörden soll es in China über 80 LLMs geben.¹⁸

Zu den kommerziellen Entwicklern von LLMs gehören die großen Technologiekonzerne Google, Meta, Baidu, Huawei, Alibaba oder Tencent sowie die Start-ups OpenAI, Cohere und Anthropic. In China hat zudem jüngst das Start-up 01.AI für Schlagzeilen gesorgt, das in kürzester Zeit eine Milliardenbewertung erreichte. In der EU gibt es derzeit drei Unternehmen, Aleph Alpha aus Deutschland, Mistral AI aus Frankreich und Silo AI aus Finnland, die LLMs entwickelt haben.

Ein weiteres Unternehmen aus Deutschland, Nyonix, könnte bald dazukommen. Darüber hinaus gibt es weitere LLMs in Südkorea (Naver), Russland (Yandex) oder den Vereinigten Arabischen Emiraten (Technology Innovation Institute), die in einem spezifischen sprachlichen Kontext stehen. Hier ist auch das Projekt GPT-X einzuordnen, das sich zum Ziel gesetzt hat, europäische LLMs als Alternative zu den USA und China zu entwickeln und zu trainieren.¹⁹ In der Entwicklung dieser LLMs spiegelt sich nicht nur die Motivation wider, in diesem KI-Bereich wettbewerbsfähig zu sein, sondern auch der Anspruch auf digitale Souveränität. Gegenwärtig wird der globale LLM-Markt von Unternehmen aus den USA und China dominiert. Für die Wettbewerbsfähigkeit von LLMs ist der Zugriff auf regionale Sprachdaten von wachsender Bedeutung. Diese können den spezifischen kulturellen Wertekontext am besten abbilden.

Die Messung der Leistungsfähigkeit von LLMs ist zu einer zentralen Größe im globalen Wettbewerb der KI geworden. Allerdings ist ein direkter Vergleich zwischen LLMs im Allgemeinen und zwischen LLMs aus den USA und China im Besonderen wenig aussagekräftig. Die Modelle werden mit unterschiedlichen Zielsetzungen entwickelt und trainiert und weisen daher auch unterschiedliche Stärken und Schwächen auf. Um dennoch einen Leistungsvergleich zu ermöglichen, wurden zahlreiche Benchmarks entwickelt, die regelmäßig zur Leistungsbewertung von LLMs herangezogen werden.²⁰ Diese untersuchen im Einzelnen die verschiedenen Bereiche eines LLM, zum Beispiel seine Fähigkeit, Texte zusammenzufassen, Fragen richtig zu beantworten, Programmier- oder Mathematikkenntnisse, aber auch seine Kreativität. Derzeit schneidet das neueste LLM von OpenAi, GPT4, in vielen dieser Benchmarks am besten ab, auch im Vergleich zu ausgewählten chinesischen LLMs.²¹

Darüber hinaus geben Indikatoren wie die Anzahl der Parameter eines LLM, die Größe und die Qualität des für das Training verwendeten Datensatzes Aufschluss über die Leistungsfähigkeit der Modelle. Je größer ihre Anzahl ist, desto mehr Komplexität kann abgebildet werden und desto genauer ist die Ausgabe. Der Umfang des Datensatzes wird wiederum durch Token beschrieben, die einzelne Wörter, Zahlen, Zeichen oder andere Informationseinheiten repräsentieren. Als Datenbasis dienen unter anderem Webseiten, Bücher und Programmiercodes.

Je mehr Token vorhanden sind, desto mehr Informationen stehen dem LLM zum Lernen zur Verfügung. Die Qualität der Daten ist wichtig. So ist es sinnvoll, Daten aus möglichst unterschiedlichen Quellen zu verwenden, damit das Modell übergreifende Muster lernen kann.

Die rasante Entwicklung der Modelle lässt sich an den Zahlen ablesen. Heute gibt es LLMs wie PanGu- Σ von Huawei oder GPT3.5 von OpenAI, die mehr als eine Billion Parameter aufweisen. Noch im letzten Jahr galten Modelle wie Megatron-Turing NLG von Microsoft und NVIDIA oder Palm von Google mit über 500 Milliarden Parametern als die größten Modelle überhaupt. Auch die Größe der Trainingsdaten hat deutlich zugenommen. Während GPT2 von OpenAI im Jahr 2018 noch mit rund zehn Milliarden Token trainierte, konnte Llama 2 von Meta 2023 bereits auf zwei Billionen Token zurückgreifen. Als Spitzenreiter im Bereich Parameter und Token gilt gegenwärtig GPT4, obwohl OpenAI dazu keine genauen Angaben gemacht hat. Es wird aber geschätzt, dass es mit über einer Billion Parametern trainiert wurde.²² Chinesische LLM-Entwickler behaupten ebenfalls, in diese Bereiche vorgestoßen zu sein, machen aber ebenfalls keine genauen Angaben dazu.²³

Aktuelle Tendenzen in der Entwicklung generativer KI zielen unter anderem auf den Bereich der Multimodalität ab. So können LLMs nicht nur Bilder, Videos oder Musik generieren, sondern diese auch auswerten und verschriftlichen.²⁴ Hier schließt sich die Entwicklung an, dass nicht für jede Anwendung große LLMs benötigt werden, sondern die gleiche Qualität auch mit kleineren und kostengünstiger zu entwickelnden Modellen möglich ist. Mit weiteren Entwicklungen und Anwendungsfeldern für LLMs ist zu rechnen.

Die Treiber der globalen LLM-Entwicklung sind vor allem in den USA und China zu finden. Für deutsche und andere europäische Unternehmen ist das eine große Herausforderung. Die finanziellen und technischen Ressourcen, die dort für die Entwicklung zum Einsatz kommen und zugänglich sind, sind in Deutschland gegenwärtig nicht verfügbar. Die Bereitstellung spezifischer Sprachdaten in Deutschland aber auch darüber hinaus in Europa insgesamt könnte vor diesem Hintergrund zu einem wichtigen Wettbewerbsfaktor werden, den es zu erschließen gilt.

Rechenleistung, KI-Chips und Lieferketten

Die Entwicklung generativer KI wie LLMs, aber auch der zunehmende Einsatz von KI-Systemen in anderen Bereichen wie Industrierobotik, Smartwatches, autonome Fahrsysteme, Gesundheitswesen oder Materialforschung erfordern immer größere Rechenkapazitäten, um die wachsenden Datenmengen zu verarbeiten.²⁵ Im internationalen Vergleich verfügen die USA über die größten Rechenkapazitäten, gefolgt von China, Japan und Deutschland.²⁶ In Deutschland können Unternehmen und Forschungseinrichtungen auf Hochleistungsrechenzentren wie das JUWELS in Jülich oder alphaOne in Berlin zurückgreifen.²⁷ Im Vergleich zum US-amerikanischen Markt fallen die deutschen Rechenkapazitäten jedoch kaum ins Gewicht.²⁸ Und der Abstand zu den USA und China wird für Deutschland immer größer, da diese viel höhere Ausbauraten aufweisen.²⁹ Insbesondere in den USA ist ein sehr intensiver Wettbewerb der LLM-Entwickler um Rechenkapazitäten zu beobachten, der sich in einer besonders hohen Nachfrage nach Computerchips niederschlägt. Der KI-Entwickler OpenAI will sogar eigene Chips herstellen lassen.³⁰

Die Bedeutung von Prozessoren beziehungsweise Computerchips, die in Rechenzentren zum Einsatz kommen, ist für die KI-Entwicklung herausragend. Ihre Weiterentwicklung ist Gegenstand eines intensiven Wettbewerbs. Ziel ist es, immer mehr Schaltkreise auf immer kleineren Chips unterzubringen. Die neusten Entwicklungen können mittlerweile bis zu 1,2 Billionen Schaltkreise vorweisen.³¹ Supercomputer erreichen damit Rechengeschwindigkeiten im ExaFlops-Bereich.³² Das sind mehr als eine Billion Rechenoperationen pro Sekunde. Der Mitbegründer des Chipkonzerns Intel, Gordon Moore, beschrieb die Leistungsentwicklung bereits 1965 mit der Prognose, dass sich die Anzahl der Schaltkreise auf Computerchips bei gleichbleibenden Kosten alle 18 bis 24 Monate verdoppeln werde.³³ Diese Schätzung kommt der tatsächlichen Entwicklung immer noch sehr nahe, obwohl die technologischen Hürden größer werden.³⁴ So findet der Aufbau moderner Computerchips

inzwischen im Nanometerbereich statt. Auf dieser Ebene kann die Größe der Schaltkreise nach Atomen abgezählt werden, was weitere Leistungssteigerungen zwar nicht verhindert, aber erschwert.

Für Computerchips in der KI-Entwicklung gilt, dass sie neben der Rechenleistung auch wirtschaftlichen Faktoren wie Verfügbarkeit, Bezahlbarkeit und dem Energieverbrauch entsprechen. Vor diesem Hintergrund hat sich eine eigene Klasse von Chips, die KI-Chips, herausgebildet, die das Ziel verfolgen, die Computerchiparchitektur als Ganzes kostenoptimal auszugestalten. An der Spitze dieser Entwicklung stehen gegenwärtig die sogenannten Graphics Processing Units (GPU), die mehrheitlich von US-amerikanischen Unternehmen angeboten werden. GPUs sind eigentlich für die Berechnung komplexer beweglicher 3D-Grafiken entwickelt worden, wie sie unter anderem in Computerspielen vorkommen. Im Vergleich zur Chiparchitektur, der Central Processing Units (CPUs), die Aufgaben nacheinander verarbeiten, können sie große Datensätze beispielsweise für das Training von sprachbasierten KIs parallel erledigen, was die Verarbeitungszeit verkürzt. Auf dieser Ebene sind auch die Tensor Processing Units (TPUs) einzuordnen, die das Maschinelle Lernen direkt unterstützen. Einen weiteren KI-Entwicklungsschritt stellen die Neuromorphic Processing Units (NPU) dar. Diese versuchen, die Funktionsweise des menschlichen Gehirns durch die Konstruktion von künstlichen Neuronen nachzuahmen. GPUs, TPUs und NPUs sind heute in fast allen neueren Smartphones verbaut.

Der Wettbewerb in der Entwicklung von immer leistungsfähigeren (KI-) Chips hat eine im hohen Maße globalisierte und zugleich spezialisierte Wertschöpfungskette mit ebenso komplexen Lieferketten hervorgerufen. Viele Elemente davon befinden sich in einem angespannten geökonomischen Umfeld. Das zeigt sich bereits beim Design der Chips. Dafür braucht es nämlich hochspezialisierte Software und entsprechend qualifiziertes Personal. Das Wissen um diese digitalen Chipdesignentwürfe ist Gegenstand streng gewahrter urheber- und patentrechtlicher Eigentumsfragen. Ihre Entwicklung findet fabriklos (*fabless*) statt. Es sind vor allem US-amerikanische Unternehmen, die diesen Bereich dominieren.³⁵ Die Begehrlichkeiten, an diese Entwürfe zu gelangen, sind entsprechend hoch.

Ein weiteres geoökonomisches Nadelöhr ist die Chipproduktion selbst. Dafür kommen hochspezialisierte Maschinen zum Einsatz, die Siliziumscheiben (Wafer) gemäß den Chipentwürfen durch Belichten, Lackieren und Ätzen zu Schaltkreisen verarbeiten. Dieser Bereich wird fast ausschließlich in Asien von taiwanesischen und südkoreanischen Unternehmen (Foundries) durchgeführt.³⁶ Weltmarktführer ist die Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC). Im Bereich der Hochleistungschips, die für die Entwicklung von KI besonders wichtig sind, hat TSMC sogar einen Marktanteil von über 90 Prozent.³⁷ Aber auch TSMC und andere Foundries sind auf spezialisierte Unternehmen angewiesen. Die weltweit leistungsfähigsten Lithografieanlagen stammen von einem einzigen Unternehmen, der Advanced Semiconductor Materials Lithography (ASML) in den Niederlanden.³⁸ Diese wiederum ist auf die Zulieferung von hochauflösenden Objektiven angewiesen, die weltweit nur von sehr wenigen Unternehmen hergestellt werden können, darunter die deutsche Firma Zeiss.

Die USA haben Chips zum Gegenstand des Systemwettbewerbs mit China in der KI-Entwicklung gemacht und damit weitreichende geopolitische Dynamiken ausgelöst. Mit einem Exportverbot für US-amerikanische Chiptechnologie wollen sie den Zugang Chinas zu dieser Technologie einschränken. Aus US-Sicht ist dies ein starker Hebel, um sich einen strukturellen Entwicklungsvorsprung gegenüber Chinas KI-Ambitionen zu sichern. Dabei nutzen sie strategisch ihre wirtschaftliche Dominanz in den Bereichen Chip-Design, Chipherstellung bis hin zum Cloud-Geschäft, in dem US-Unternehmen über 70 Prozent des Weltmarktes halten.³⁹ Unter das Exportverbot fallen leistungsfähige KI-Chips, die Nutzung von Design-Software, Schaltungsentwürfe und die Nutzung von Maschinen oder Maschinenteilen für die Chipherstellung.⁴⁰ Darüber hinaus können sich US-Bürgerinnen und -Bürger strafbar machen, wenn sie China bei der Entwicklung und Herstellung von Chips unterstützen. Die USA koordinieren ihr Exportverbot auch mit anderen westlichen Ländern, darunter Japan und die Niederlande, die ebenfalls damit begonnen haben, den Export von Hochleistungstechnologien für die KI-Chipherstellung, zum Beispiel Lithografiemaschinen, nach China zu reduzieren.

Die chinesischen Reaktionen waren zunächst zögerlich. Erst Ende 2022 beschwerte sich China bei der Welthandelsorganisation (WTO) über das

Exportverbot. Im Frühjahr 2023 hat die chinesische Regierung es Betreibern wichtiger Infrastrukturunternehmen untersagt, Chips des US-Herstellers Micron zu kaufen. In einem weiteren Schritt wurde der chinesische Export der Rohstoffe Gallium und Germanium mit einer Ausfuhrgenehmigung belegt. Diese Rohstoffe werden für die Chipherstellung benötigt. Darüber hinaus hat China eine Fusion zwischen dem US-Chiphersteller Intel und dem israelischen Chiphersteller Tower Semiconductor verhindert. Die chinesischen Behörden haben das Recht, Unternehmensfusionen zu verhindern, wenn diese zusammen mehr als 100 Millionen Franken Umsatz in China generieren.⁴¹

Das Exportverbot trifft China hingegen kurzfristig sehr hart, da es kaum über nennenswerte eigene Produktionskapazitäten verfügt und auf Importe angewiesen ist. Gleichzeitig ist es der weltweit größte Absatzmarkt für Chips, was durchaus Folgen in Form von Umsatzeinbußen für die großen Chipproduzenten in den USA, Taiwan, Südkorea oder Japan haben dürfte. Ob das Exportverbot die KI-Entwicklung in China tatsächlich verlangsamen kann, wird sich erst in einigen Jahren zeigen. Das Exportverbot führt auch dazu, dass chinesische Unternehmen mit massiver staatlicher Unterstützung ihre eigene Chipindustrie ausbauen. Ein Prozess, den die chinesische Regierung bereits seit einigen Jahren aktiv vorantreibt.⁴²

Darüber hinaus haben chinesische Unternehmen nach wie vor Zugang zu US-Chips, sofern es sich nicht um Hochleistungs-KI-Chips handelt.⁴³ Kurz vor Inkrafttreten des Exportverbots haben chinesische Unternehmen in großem Umfang US-Chips gekauft. Zudem haben sich immer wieder Lieferkettenwege aufgetan, die das Exportverbot zu umgehen versuchen. Nachjustierungen zur Verhinderung der Umgehung des US-Exportverbots wurden von der US-Regierung bereits angekündigt.⁴⁴

Für die globalen Wertschöpfungs- und Lieferketten der Chipindustrie ergibt sich aus diesen Entwicklungen eine Neuausrichtung. Dazu gehört eine breitere Aufstellung und vor allem eine stärkere Diversifizierung in westlichen Ländern. Der US Science and Chips Act 2022 setzt hier an. Er fördert den Ausbau der Chipindustrie in den USA mit 52 Milliarden US-Dollar.⁴⁵ Und auch die EU hat mit dem EU Chips Act begonnen, ihre Chipindustrie mit bis zu 43 Milliarden Euro zu fördern.⁴⁶ Japan und

Südkorea ziehen ebenfalls mit speziellen Förderprogrammen nach. Für Taiwan, das in seiner heimischen Chipindustrie einen wichtigen Garanten für den Erhalt des politischen Status quo sieht, könnte dies Folgen haben. Es kann sich den US-Plänen zum Ausbau der eigenen KI-Chipindustrie nur schwer entziehen. So investiert TSMC inzwischen nicht nur in den USA, sondern auch in Europa in den Aufbau eigener Chipfabriken. Damit verringert es zugleich die Abhängigkeit der globalen Chipindustrie vom Produktionsstandort Taiwan.

Deutschland entwickelt sich zum Profiteur dieser geopolitischen Umwälzungen. Im weltweiten Vergleich liegt es bei den Investitionen in den Aufbau von Chipfertigungskapazitäten an zweiter Stelle hinter den USA.⁴⁷ Gerade in Ostdeutschland könnten die Investitionen des Chipkonzerns Intel in Magdeburg sowie von TSMC und Infineon in Dresden, die allerdings mit nicht unumstrittenen erheblichen staatlichen Subventionen gefördert werden, zum Aufbau langfristiger Produktionsstrukturen beitragen.⁴⁸ Dies könnte nicht nur weitere Industrien und unmittelbare Arbeitsplätze nach sich ziehen, sondern auch die geostrategische Rolle Deutschlands als Hochtechnologieland stärken und letztlich auch die deutsche KI-Entwicklung fördern. Diesen Prozess gilt es weiter voranzutreiben, um weitere Segmente der Chipwertschöpfungskette dauerhaft in Deutschland anzusiedeln. Ziel muss es dabei jedoch sein, dass diese dauerhaft ohne deutsche Subventionspakete attraktive Rahmenbedingungen vorfinden.

Quantencomputer

Je aufwändiger es wird, neue und noch leistungsfähigere Generationen von Computerchips zu entwickeln, desto mehr rücken die Möglichkeiten des Quantencomputers in den Fokus. Für die Entwicklung der KI kann der Quantencomputer zum Katalysator werden. Das Training generativer Programme ließe sich mit ihm erheblich beschleunigen und KI-Berechnungen, die selbst mit den leistungsfähigsten Computerchips mehr als 1.000 Jahre dauern würden, könnten in wenigen Stunden durchgeführt werden.

Infobox: *Quantencomputer erreichen ihre enorme Rechengeschwindigkeit durch physikalische Gesetze, die auf atomarer Ebene gelten. Im Vergleich dazu arbeiten klassische Computer mit Schaltkreisen, die die Werte 1 (offen) oder 0 (geschlossen) annehmen können. Diese Schaltzustände sind Informationen (Bits), die gespeichert und verarbeitet werden können. Je mehr Bits oder Schaltkreise, desto höher die Rechnerleistung. Quantencomputer setzen dagegen auf sogenannte Quantenbits oder Qubits. Das können zum Beispiel Ionen, Elektronen oder Photonen sein. Diese Teilchen haben Eigenschaften, die sich ebenfalls mit 1 oder 0 beschreiben lassen. Ihre besondere Leistungsfähigkeit ergibt sich jedoch daraus, dass sie die Zustände 1 und 0 (und möglicherweise noch viele weitere) gleichzeitig einnehmen können. Dieser Zustand beschreibt die Situation bevor feststeht, ob das Teilchen gerade den Zustand 1 oder 0 hat. Dies entspricht im Wesentlichen einer Münze, die sich in der Luft dreht und bei der noch nicht klar ist, ob am Ende Kopf oder Zahl oben liegt. Man kann nur sagen, dass mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Kopf oben ist. Qubits enthalten im Vergleich zu normalen Bits mehr Speicher- und verarbeitbare Information. Außerdem können Qubits miteinander verknüpft oder verschränkt sein. Das bedeutet, dass die Änderung des Zustands eines Teilchens gleichzeitig die Änderung eines anderen Teilchens erfordert. Je mehr Qubits miteinander verknüpft sind, desto mehr Informationen können gleichzeitig dargestellt werden.*

Zwei Qubits können folgende vier Zustände gleichzeitig darstellen: 0:0/1:0/0:1/1:1. Drei Qubits können bereits acht Bits darstellen 0:0:0/0:0:1/1:0:0/0:1:0/1:1:0/0:1:1/1:1:1. Daraus ergibt sich der enorme Leistungsvorteil von Quantencomputern gegenüber klassischen Computern. Während beim klassischen Schaltkreiscomputer die Leistung linear mit der Anzahl der Bits steigt, wächst sie beim Qubit exponentiell.

Die Herausforderung beim Bau von Quantencomputern besteht darin, atomare Teilchen so zu manipulieren, dass sie als Qubits verwendet werden können. Quantencomputer-Ingenieure versuchen dies unter anderem mit Magnetfeldern, Temperaturänderungen sowie Mikrowellen- und Laserbestrahlung. Die meisten Quantencomputer basieren heute auf der Supraleitertechnologie. Dabei werden Elektronen als Qubits verwendet und entsprechend manipuliert. Der Vorteil ist, dass der Aufbau des supraleitenden Qubit-Chips auf ausgereiften Technologien beruht und die Skalierbarkeit gut realisierbar ist. Schwierig ist die Notwendigkeit niedriger Temperaturen, damit die entsprechende Manipulation der Elektronen funktioniert. Ein anderer Ansatz besteht darin, Photonen – also Lichtteilchen – als Qubits zu verwenden. Diese Art von Quantencomputern ist stabil gegenüber Umgebungsstörungen. Schwierig ist allerdings die Manipulation der Photonen und der Aufbau entsprechender Geräte. Ein anderer Ansatz sind Ionenfallen. Ionen sind elektrisch geladene Atome oder Moleküle. Ionenfallen-Quantencomputer sind stabil gegenüber Störungen und gut skalierbar. Allerdings ist auch hier der Aufbau der Geräte schwierig. Ein anderer Ansatz ist der sogenannte Quanten-Annealer. Dabei handelt es sich um ein quantenmechanisches System, das zur Lösung von Optimierungsproblemen eingesetzt wird. Für Rechenaufgaben ist er weniger flexibel einsetzbar.

Die Quantencomputertechnologie ist noch sehr jung und gegenwärtig ist es völlig offen, welche Konstruktionsansätze sich am Markt durchsetzen werden. Die noch zu bewältigenden technischen Herausforderungen sind sehr hoch, was die Anwendungsvielfalt deutlich einschränkt. Hier schließt sich die Herausforderung der Programmierung von Quantencomputern an. Qubits müssen mathematisch anders kodiert werden als Bits. Diese Disziplin steckt noch in den Kinderschuhen. Zudem muss sich erst noch transparent, nachvollziehbar und real zeigen, ob Quanten-

computer in der Lage sind, einen herkömmlichen Supercomputer bei der Berechnung alltäglicher Aufgaben zu übertreffen. Ob dies bereits geschehen ist, ist Teil einer breiten wissenschaftlichen und auch geopolitischen Debatte. Für Aufsehen sorgten chinesische Forscherinnen und Forscher, die behaupteten, mit einem Quantencomputer digitale Standardverschlüsselungen knacken zu können.⁴⁹ Inwieweit dies tatsächlich machbar ist, ist umstritten. Aber die Tatsache, dass es theoretisch möglich sein könnte, hat dazu geführt, dass Methoden einer quantenresistenten Kryptografie entwickelt werden.⁵⁰ Eine große Herausforderung stellt in diesem Kontext der Umstand dar, dass aufgezeichnete verschlüsselte Informationen aus den vergangenen Jahrzehnten möglicherweise im Nachhinein entschlüsselt und ausgewertet werden könnten.

Nach heutigem Entwicklungsstand könnten sich Quantencomputer eignen, um neue Medikamente und Materialien zu entwickeln. Sie können dabei helfen, die Strukturen und Eigenschaften von Materialien besser zu verstehen. Sie können auch für die Untersuchung der fundamentalen Gesetze der Physik eingesetzt werden. Zudem könnten sie in der Entwicklung neuer Anlagestrategien auf den Finanzmärkten eingesetzt werden. Die KI, die mit ihnen dafür nutzbar wären, könnten einen erheblichen Fortschritt ermöglichen. Dass Quantencomputer für alltägliche KI-Anwendungen eingesetzt werden, scheint jedoch aufgrund der enormen Rechenleistungen, die damit möglich wären, eher unwahrscheinlich. Es macht auch für alltägliche KI-Anwendungen, die im Smartphone zu finden sind, keinen Sinn, sie mit einem Quantenprozessor zu betreiben.

Das globale Wettrennen um den Quantencomputer ist dessen ungeachtet in vollem Gange. Gegenwärtig sind es vor allem US-amerikanische Unternehmen wie IBM oder Google, die Quantencomputer verkaufen oder Zugänge dazu über Clouds für andere Unternehmen und Forschungsunternehmen bereitstellen. Darüber hinaus stellen Unternehmen in China und Kanada Quantencomputer her. China unternimmt große Anstrengungen, um in diesem Bereich den Anschluss an die USA nicht zu verlieren. Im weltweiten Vergleich fördert China die Entwicklung von Quantencomputern über öffentliche Mittel am stärksten.⁵¹ Die EU hat ebenfalls begonnen, den Quantentechnologiebereich zu fördern.

Nach China investiert die EU am meisten öffentliche Mittel in diesen Bereich. Wobei innerhalb der EU fasst die Hälfte aller öffentlichen Förderungen allein in Deutschland anfallen.⁵² Erst danach folgen die USA, Japan und Großbritannien.

Die Ambitionen Chinas, in diesem Bereich voranzukommen, spiegeln sich auch in der Anzahl der Patente seiner Unternehmen und Forschungseinrichtungen wider. China führt hier deutlich vor allen Ländern.⁵³ Allerdings geben diese Patentstatistiken in der Regel nur die Patente wieder, die innerhalb Chinas gelten. Patente, die über die chinesischen Landesgrenzen hinausgehen und in mehreren Ländern gelten, werden von US-amerikanischen Unternehmen dominiert. Im Bereich Forschung führt China ebenfalls, wenn die Anzahl der entsprechenden Forschungsveröffentlichungen zugrunde gelegt wird.⁵⁴

In der Entwicklung von Quantencomputern hat Deutschland große Ambitionen und fördert es entsprechend.⁵⁵ Es kann dafür auf forschungsstarke und international renommierte Universitäten sowie Forschungseinrichtungen zurückgreifen. Innerhalb der EU ist Deutschland eines der führenden Länder bei der (Weiter-)entwicklung von Quantencomputern mit Start-ups und Unternehmen, die in diesem Bereich tätig sind. Für die strategische KI-Entwicklung in Deutschland könnte dieser Bereich einen wichtigen Beitrag leisten und sollte auch weiter gefördert werden.

Regulierung

Die Entwicklung der KI schreitet rasant voran und erfasst immer weitere Bereiche der Gesellschaft. Dabei wirft insbesondere die generative KI Fragen auf, die in immer mehr Ländern zu Regulierungen führen. Die Kernproblematik, dass KI sowohl positiv als auch negativ genutzt werden kann, ist nicht neu. So kann sie in der Medizin helfen, neue Medikamente zu entwickeln. Auf der anderen Seite könnte sie auch dazu beitragen, toxische Stoffe zu kreieren. Politische Entscheidungsträger müssen in diesem Kontext zwischen dem Erhalt von Freiraum für Innovation, gesellschaftlich akzeptablen oder nicht akzeptablen Risiken und der internationalen Wettbewerbsfähigkeit abwägen.

Entsprechend unterschiedlich sind die politischen Debatten und das angestrebte Maß an verbindlicher Regulierung weltweit. So ist China mit seiner KI-Regulierung bereits weit fortgeschritten. In der EU gibt es eine vorläufige Einigung für eine umfassende KI-Verordnung. In Ländern wie Kanada, Südkorea und Indien wird an entsprechenden Gesetzen gearbeitet. Daneben gibt es zahlreiche weitere Länder, die im Bereich KI eher auf Leitlinien, freiwillige Standards oder Risikomanagementsysteme setzen. Dazu gehören beispielsweise die USA, Israel oder Japan. Die Herausforderung bei der Regulierung von KI liegt zudem nicht nur darin, dass sich KI schnell entwickelt und entsprechende Gesetzesentwürfe daher nicht den neuesten Stand berücksichtigen können. Sondern auch darin, dass KI auch zahlreiche andere Bereiche wie Datenschutz, Patent- und Urheberrechtsfragen oder Cybersicherheit berührt. Hier stellt sich die grundsätzliche Frage, wo die Regulierung letztlich ansetzen soll, wenn die Entwicklung von KI grundsätzlich für gut befunden wird, unerwünschte Anwendungen aber verboten werden sollen. Diese Fragestellungen stellen sich insbesondere mit Blick auf die generativen KIs wie LLMs.

Aus geökonomischer Sicht lassen sich Regulierungsansätze anhand der verschiedenen Ansätze in der EU, den USA und China unterscheiden. Demnach strebt die EU eine risikobasierte Regulierung an. Hierzu werden KI-Systeme in Risikoklassen eingeteilt, die je nach Kategorie

verboten sein können oder verschiedenen Dokumentationspflichten unterstehen. Hinzu kommt, dass die Anbieter von KI-Basismodellen Transparenz- und Dokumentationspflichten u. a. mit Blick auf die eingesetzten Daten zu erfüllen haben. Hier gilt ebenfalls, dass diese sofern sie ein hohes Risiko aufweisen strengere Dokumentations- und Testauflagen zu erfüllen haben werden. Für vorabdefinierte Straftatbestände gelten für Sicherheitsbehörden in der Strafverfolgung Ausnahmen. Die USA verfolgen einen marktbasierten Ansatz, der bisher auf freiwilliger Kontrolle beruht. Das könnte sich mit Blick auf ein umfassendes Dekret des US-Präsidenten Joe Biden jedoch ändern. Dieses fordert diverse US-Bundesbehörden auf, Richtlinien zu entwickeln, die unter anderem zur Risikominimierung von Deepfakes beitragen sollen, KI-Tests vor der Veröffentlichung bestimmter Programme einfordern sowie die Nutzung von KI zur Entwicklung chemischer, biologischer oder nuklearer Kampfstoffe unterbinden. Zudem gibt es zahlreiche andere Gesetze, wie das US-Urheberrecht oder das US-Datenschutzgesetz, die auf KI-Anwendungen wie ChatGPT einwirken. China ist eines der ersten Länder weltweit, das eine umfassende KI-Regulierung eingeführt hat. Es setzt auf die vollständige Kontrolle seiner KI-Systeme. Erst kürzliche hat es entsprechende Verwaltungsvorschriften erlassen, die die Bereitstellung von Dienstleistungen generativer KI regeln, die zum Erstellen von Inhalten wie Texten, Bildern, Audio und Video verwendet werden können. Wesentliche Elemente in KI-Regulierung Chinas sind die Verhinderung von Diskriminierung durch KI-Systeme, die Förderung von Transparenz, z. B. zur Verpflichtung von KI-Anbietern, Informationen über ihre KI-Systeme offenzulegen sowie die Betonung der Verpflichtung von KI-Anbietern, die Auswirkungen ihrer KI-Systeme auf die Gesellschaft zu berücksichtigen.

Daraus ergeben sich unterschiedliche Entwicklungspfade für die KI-Entwicklung. So ist China weltweit führend in der KI-gestützten Gesichtserkennung, die zur Überwachung öffentlicher Räume eingesetzt wird, oder in der Umsetzung des Social Scoring Systems, das gutes Verhalten seiner Bewohnerinnen und Bewohner belohnt und schlechtes sanktioniert. In den USA, der EU und vielen anderen westlichen Staaten sind solche Formen der Datenverwendung nicht erlaubt. Umgekehrt zeigt sich gerade im Bereich der Entwicklung generativer KI ein Entwicklungsvorsprung, dessen Grundlage ein westliches Wertesystem ist. KI gene-

rierte Texte, Bilder oder Videos müssen keine zwingenden politischen Systemvorgaben erfüllen. In China hingegen besteht der Anspruch auf vollständige Kontrolle aller KI-Systeme. So dürfen sprachbasierte KIs in China nur Texte generieren, die den „sozialistischen Werten“ der Kommunistischen Partei Chinas entsprechen. Inwieweit sich dieser Aspekt auf die kommerzielle Wirkung der chinesischen LLMs auswirken wird, bleibt abzuwarten.

Auf die deutsche KI-Entwicklung und deren Wettbewerbsfähigkeit wird der angestrebte AI-Act der EU erheblichen Einfluss nehmen. Mit ihm entsteht ein einheitlicher Rechtsrahmen für KI-Systeme in der EU. Dies könnte die Marktintegration erleichtern und Unternehmen aus verschiedenen EU-Mitgliedstaaten den Zugang zu neuen Märkten ermöglichen. In der vorläufigen Einigung zum EU AI Act sind zum Beispiel die Einrichtung von sogenannten Sandboxes, die die Erprobung von KI-Systemen unter realen Bedingungen ermöglichen, vorgesehen. Dieser Ansatz könnte im Falle einer praxisnahen Umsetzung für die unternehmerische KI-Entwicklung ein wichtiges Element werden. Auf der anderen Seite zeigt sich in der vorläufigen Einigung zum EU-AI-Act, dass dieser für die europäische KI-Entwicklung auch einen zusätzlichen bürokratischen Aufwand bedeutet. Vor allem die umfassenden Prüf- und Folgeabschätzungen für die betroffene KI-Systeme könnten innovationshemmend wirken. Die nächsten Schritte zur Finalisierung des EU AI Acts, die nun in Form der technischen Ausarbeitung des Textes erfolgen, werden deshalb eine wichtige Rolle spielen. Unabhängig davon ist die internationale Anschlussfähigkeit der europäischen KI-Regulierung unter geopolitischen Gesichtspunkten ein wichtiger Faktor. Die Diskussionen, der G7-Staaten im Rahmen des Hiroshima-KI-Prozesses, sind dafür Schritte in die richtige Richtung. Sie zeigen, dass es auf Grundlage gemeinsamer Überzeugungen im Bereich Demokratie und Menschenrechte möglich ist, die digitale Souveränität zu wahren.

Fazit

Künstliche Intelligenz (KI) ist eine Schlüsseltechnologie der Gegenwart. Sie hat das Potenzial, in vielen Bereichen unseres Lebens disruptive Veränderungen zu bewirken, von der Wirtschaft bis zur Gesellschaft. Mit dem technologischen Fortschritt in der KI-Entwicklung Schritt zu halten, ist daher eine große gesellschaftliche Herausforderung. Deutschland zählt aus der globalen Perspektive zu den führenden KI-Entwicklungsnationen. Es verfügt über eine starke Forschungslandschaft, eine anpassungsfähige Wirtschaft und gute technische Infrastrukturen. Allerdings droht Deutschland abgehängt zu werden durch die enorme Geschwindigkeit der KI-Entwicklung der Systemrivalen USA und China.

Es sind aber auch gerade die geopolitischen Dynamiken des Systemwettbewerbs, die für die deutsche KI-Entwicklung Chancen ermöglichen. Im Bereich der generativen KI zeigt sich neben der Notwendigkeit, der auszubauenden Rechenleistung die wachsende Bedeutung deutschsprachiger Sprachdaten. Gelingt es, ausreichend davon für die heimische KI-Entwicklung bereitzustellen, könnte daraus ein Wettbewerbsvorteil entstehen. Dafür braucht es eine stärkere Verzahnung der laufenden Digitalisierungsprozesse in Deutschland unter dem Aspekt der Datenerschließung für generativer KI. Hier sind politische Initiativen notwendig, um die relevanten Akteure zusammenzubringen und eine erste Identifikation der dafür öffentlich verfügbaren und nutzbaren Daten vorzunehmen.

Die Unterstützung von Investitionen internationaler Unternehmen in den Aufbau von Chipproduktionskapazitäten in Deutschland ist aus geostrategischer Sicht mit Blick auf die aktuellen geopolitischen Spannungen zwischen den USA und China und die daraus erwachsenden Unsicherheiten für die globale Chipproduktion sinnvoll. Es ist für Deutschland eine Chance, als globaler Chipproduktionsstandort an Gewicht zu gewinnen. Es gilt aber auch, die Rahmenbedingungen so weiterzuentwickeln, dass es mittel- bis langfristig keiner weiteren direkten Subventionen für diesen Bereich mehr bedarf. Alternativen wären beispielsweise die Reduktion von Steuerbelastung, der systematische Ausbau von notwendigen Infrastrukturen, Vereinfachung von

Genehmigungsverfahren, die Verbesserung der Bildungsqualität sowie die Förderung der entsprechenden Forschung und Entwicklung.

Die Bedeutung von Quantencomputern liegt in ihrem strategischen Wert für die KI-Entwicklung. Das Rechenpotenzial, das von ihnen ausgeht, wird für die KI-gestützte Grundlagenforschung in vielen Bereichen entscheidend sein. Gegenwärtig ist noch völlig offen, welche Quantencomputertechnologie sich durchsetzt, was eine Chance darstellt. Neben der allgemeinen Förderung dieses Forschungsbereichs sollte deshalb auch ein konkreter Technologiepfad der Quantencomputertechnologie, in dem Deutschland besonders vielversprechende Entwicklungen aufweist, gezielt unterstützt werden.

Der mit dem EU AI Act entstehende Rechtsrahmen für KI-Systeme in der EU ist für die deutsche KI-Entwicklung von großer Bedeutung. Mit ihm können Rahmenbedingungen geschaffen werden, die Innovation fördern und Impulse für Abwanderung von KI-Unternehmen in weniger regulierte Wirtschaftsräume unterdrücken. Allerdings zeigt sich in der vorläufigen Einigung zum Ai Act, dass dieser zwar zurecht viel Wert auf sichere KI-Systeme in der EU legt, dabei aber die Wettbewerbs- und Innovationsfähigkeit der europäischen KI-Entwicklung zu wenig berücksichtigt. Ein wichtiger Aspekt sind dabei die mangelnden Fähigkeiten von kleineren Unternehmen oder Start-ups, etwaige aufwendige und teure Berichtspflichten zu erfüllen. Die nun anstehenden technischen Ausarbeitungen auf der Grundlage der vorläufigen Einigung für einen EU AI Act könnten deshalb noch einmal grundsätzliche Fragen aufwerfen.

Für Deutschland ergibt sich aus dem Systemwettbewerb in der globalen KI-Entwicklung ein erheblicher Handlungsdruck, um gegenüber globalen Wettbewerbern nicht weiter zurückzufallen. Die geopolitischen Dynamiken der KI-Entwicklung bieten dafür Chancen, die konsequent genutzt werden sollten. Dafür muss die KI-Entwicklung aber entlang ihrer gegenwärtigen und absehbaren Wertschöpfungskette gänzlich strategisch erfasst, über wirtschaftliche Anreize und einen international anschlussfähigen sowie innovationsfördernden regulativen Rahmen unterstützt werden. Diesen gilt es jetzt zu erarbeiten, bevor wir den Anschluss gänzlich verlieren.

Endnoten

- 1 Norbert Lammert, Wolfgang Koch (2023): Bundeswehr der Zukunft Konrad-Adenauer-Stiftung, Berlin. <https://www.kas.de/de/einzeltitel/-/content/bundeswehr-der-zukunft-5> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 2 Jamie Gaida, Jennifer Wong-Leung, Stephan Robin, and Danielle Cave (2023): The Australian Strategic Policy Institute (ASPI's) Critical Technology Tracker, Top 5 country visual snapshot (Updated 22nd September 2023), https://ad-aspi.s3.ap-southeast-2.amazonaws.com/2023-09/All%20technologies%20by%20top%20%20countries%20and%20tech%20monopoly%20risk.pdf?VersionId=eWpbqW4.kVKOM3f_TUBqOmUb_hwpP5yC (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 3 Bhaskar Chakravorti, Ajay Bhalla, and Ravi Shankar Chaturvedi (2023): Charting the Emerging Geography of AI, Harvard Business Review, <https://hbr.org/2023/12/charting-the-emerging-geography-of-ai> (zuletzt aufgerufen: 21.12.2023).
- 4 Digital Planet, The Fletcher School an Tufts University (2023): The Emerging Geography of AI: Introducing the Top-Ranked AI Nations (TRAIN) Scorecard, <https://digitalplanet.tufts.edu/the-emerging-geography-of-ai/> (zuletzt aufgerufen: 21.12.2023).
- 5 Emma Hankins, Pablo Fuentes Nettel, Livia Martinescu, Gonzalo Grau, Sulamaan Rahim (2023): Government AI Readiness Index 2023. Oxford Insights. <https://oxfordinsights.com/ai-readiness/ai-readiness-index/> (zuletzt aufgerufen: 20.12.2023).
- 6 Serena Cesareo, Joseph White (2023): The Global AI Index. In: Tortoise Media. <https://www.tortoisemedia.com/intelligence/global-ai/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 7 2021-2022 Global Computing Index Assessment Report. In: Business Wire, 15.07.2022. <https://www.businesswire.com/news/home/20220715005001/en/%C2%A0Inspur-Information-Unveils-the-IDC-White-Paper-2021-2022-Global-Computing-Power-Index-Assessment> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023). The "Global Computing Power Index Evaluation Report" is jointly compiled by Tsinghua University and the International Data Corporation IDC and other institutions with a view to conducting a comprehensive evaluation of the computing power, computing efficiency, application level and infrastructure of 15 major economies around the world. <http://www.ourjiangsu.com/a/20220322/1647931322780.shtml> (zuletzt aufgerufen: 02.11.2023).
- 8 Nathan Benaich, Ian Hogarth (2022): State of AI Report 2022. <https://www.stateof.ai/2022>, S. 49 (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 9 Alexi Mostrous, Joseph White, and Serena Cesareo (2023): The Global Artificial Intelligence Index. In: Tortoise Media. <https://www.tortoisemedia.com/2023/06/28/the-global-artificial-intelligence-index/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 10 Nathan Benaich, Ian Hogarth (2022): State of AI Report 2022. <https://www.stateof.ai/2022>, S. 47 (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).

- 11 Volker Brühl (2023): Künstliche Intelligenz – wo stehen wir in Deutschland? In: Wirtschaftsdienst, Zeitgespräch 103. Jahrgang, 2023, Heft 8, S. 521–524. JEL: O30, O40, <https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2023/heft/8/beitrag/kuenstliche-intelligenz-wo-stehen-wir-in-deutschland.html> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 12 https://tracxn.com/d/companies/openai/_kElhSG7uVGefk1i71Co9-nwFtmtYMT7f-YHMn4TFBg (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 13 Ecosystem graphs (2023): Ecosystem graphs is a framework to document the foundation models ecosystem, namely both the assets (datasets, models, and applications) and their relationships. <https://crfm.stanford.edu/ecosystem-graphs/index.html?mode=home> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 14 Hugging Face (2023). <https://huggingface.co/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 15 Paul Triolo, Anarkalee Perera (2023): This is the state of generative AI in China, The China Project. <https://thechinaproject.com/2023/09/20/this-is-the-state-of-generative-ai-in-china/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 16 Zeyi Yangarchive (2023): Inside the ChatGPT race in China, MIT Technology Review. <https://www.technologyreview.com/2023/02/15/1068624/chatgpt-race-china-baidu-ai/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 17 Große KI-Modelle für Deutschland (2023): Machbarkeitsstudie zu LEAM – Large European AI Models, Akademie für Künstliche Intelligenz AKI gGmbH im Bundesverband KI, Auftraggeber Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. https://leam.ai/wp-content/uploads/2023/01/LEAM-MBS_KIBV_webversion_mitAnhang_V2_2023.pdf (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 18 Kate Birch (2023): China and the race to launch genAI models to rival ChatGPT, BusinessChief. <https://businesschief.asia/technology/how-china-is-racing-to-launch-genai-models-to-rival-chatgpt> (zuletzt aufgerufen: 12.10.2023).
- 19 openGPT-X (2023): Multilingual. Open. European. <https://opengpt-x.de/en/> (zuletzt aufgerufen: 25.10.2023).
- 20 Marius Sandbu (2023): Benchmarking LLMs and what is the best LLM? <https://msandbu.org/benchmarking-llms-and-what-is-the-best-llm/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 21 Open Compass (2023): Large Model Evaluation. <https://opencompass.org.cn/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 22 Karolina Luzniak (2023). Is Llama 2 Better Than GPT Models? 6 Main Differences Between Llama 2 vs. GPT-4 vs. GPT-3.5. <https://neoteric.eu/blog/6-main-differences-between-llama2-gpt35-and-gpt4/> (zuletzt aufgerufen: 09.01.2024).
- 23 <https://odsc.medium.com/baidu-claims-its-llm-ernie-3-5-beats-openais-chatgpt-on-some-metrics-85906e2a85de> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 24 Zhengyuan Yang, Linjie Li, Kevin Lin, Jianfeng Wang, Chung-Ching Lin, Zicheng Liu, and Lijuan Wang (2023): The Dawn of LMMs: Preliminary Explorations with GPT-4V(ision), arXiv:2309.17421 [cs.CV], <https://arxiv.org/abs/2309.17421> (zuletzt aufgerufen: 12.10.2023).

- 25 A. Löser und V. Tresp et al. (2023): Große Sprachmodelle – Grundlagen, Potenziale und Herausforderungen für die Forschung. Whitepaper aus der Plattform Lernende Systeme, München. https://doi.org/10.48669/pls_2023-3. (zuletzt aufgerufen: 09.01.2024)
- 26 Cloudscene (17 September 2023). Number of data centers worldwide in 2023, by country [Graph]. In: Statista, 4.10.2023. <https://www.statista.com/statistics/1228433/data-centers-worldwide-by-country/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 27 Große KI-Modelle für Deutschland (2023): Machbarkeitsstudie zu LEAM – Large European AI Models, Akademie für Künstliche Intelligenz AKI gGmbH im Bundesverband KI, Auftraggeber Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, https://leam.ai/wp-content/uploads/2023/01/LEAM-MBS_KIBV_webversion_mitAnhang_V2_2023.pdf S. 147 (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 28 Nathan Benaich, Ian Hogarth (2023): State of AI Report Compute Index. <https://www.stateof.ai/compute> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 29 R. Hintemann, S. Hinterholzer und H. Seibel (2023): Bitkom-Studie Rechenzentren in Deutschland: Aktuelle Marktentwicklungen – Update 2023. Berlin: Borderstep Institut. <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2023-05/BitkomStudieRechenzentreninDeutschland2023.pdf> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 30 Anna Tong, Max A. Cherney, Christopher Bing, and Stephen Nellis (2023): Exclusive: ChatGPT-owner OpenAI is exploring making its own AI chips. <https://www.reuters.com/technology/chatgpt-owner-openai-is-exploring-making-its-own-ai-chips-sources-2023-10-06/> (zuletzt aufgerufen: 11.10.2023).
- 31 Cerebras: Der größte Prozessor aller Zeiten – mit Billionen Transistoren (2023). <https://winfuture.de/news,110749.html> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 32 Deep Thought, Deep Learning and the World's Total Computing Resources (2023). https://thechipletter.substack.com/p/deep-thought-deep-learning-and-the?utm_source=substack&utm_medium=email (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 33 Computer History Museum (2023): <https://www.computerhistory.org/siliconengine/moores-law-predicts-the-future-of-integrated-circuits/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 34 Karl Rupp (2018): 42 Years of Microprocessor Trend Data. <https://www.karlrupp.net/2018/02/42-years-of-microprocessor-trend-data/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 35 TrendForce (15 December 2022): Integrated circuit (IC) design companies revenue worldwide from 2017 to 2022, by quarter (in million U.S. dollars) [Graph]. In: Statista, 13.09.2023. <https://www.statista.com/statistics/946425/worldwide-fabless-integrated-circuit-design-houses/> (zuletzt aufgerufen: 13.09.2023).
- 36 Yole Développement (26 April 2022): Leading processor foundries from 2018 to 2021, by revenue (in billion U.S. dollars) [Graph]. In: Statista, 13.09.2023. <https://www.statista.com/statistics/1307996/leading-processor-foundries-revenue/> (zuletzt aufgerufen: 13.09.2023).
- 37 Taiwan's dominance of the chip industry makes it more important (2023). <https://www.economist.com/special-report/2023/03/06/taiwans-dominance-of-the-chip-industry-makes-it-more-important> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).

- 38 How ASML became chipmaking's biggest monopoly (2023). <https://www.economist.com/business/2020/02/29/how-asml-became-chipmakings-biggest-monopoly> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 39 Felix Richter (2023): Amazon Maintains Lead in the Cloud Market. In: Statista, 8.7.2023. <https://www.statista.com/chart/18819/worldwide-market-share-of-leading-cloud-infrastructure-service-providers/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 40 Junhua Zhang (2023): The U.S.-China chip race heats up, Geopolitical Intelligence Services AG. <https://www.gisreportsonline.com/r/us-china-chip-race/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 41 James Shotter, Qianer Liu, and Ryan McMorro (2023): China thwarts Intel's \$5.4bn Israeli chipmaker purchase. In: Financial Times. <https://www.ft.com/content/416091c1-0762-4530-a6d7-c89528734047> (zuletzt aufgerufen: 25.10.2023); vgl. ebenso hier: Matthias Sander (2023): China verfolgt im Chip-Konflikt mit den USA eine clevere Strategie. Aber das könnte langfristig nicht genügen. In: Neue Zürcher Zeitung. <https://www.nzz.ch/meinung/jahrestag-us-sanktionen-chips-gegen-china-ld.1754576> (zuletzt aufgerufen: 01.12.2023).
- 42 Julie Zhu, Kevin Huang, Yelin Mo, and Roxanne Liu (2023): Exclusive: China to launch \$40 billion state fund to boost chip industry. In: Reuters, 5.09.2023. <https://www.reuters.com/technology/china-launch-new-40-bln-state-fund-boost-chip-industry-sources-say-2023-09-05/> (zuletzt aufgerufen: 02.11.2023).
- 43 Qianer Liu and Hannah Murphy (2023): China's internet giants order \$5bn of Nvidia chips to power AI ambitions. In: Financial Times. <https://www.ft.com/content/9dfee156-4870-4ca4-b67d-bb5a285d855c> (zuletzt aufgerufen: 11.10.2023).
- 44 Susanne Braun (2023): Strengere US-Exportregeln für KI - KI-Chips im Export: Chips Act wird verschärft. In: Elektronik Praxis, 20.10.2023. <https://www.elektronikpraxis.de/ki-chips-im-export-chips-act-wird-verschaerft-a-3009d1d7b44a495b4c3994e6fb2a5436/> (zuletzt aufgerufen: 02.11.2023).
- 45 Achim Haug, Christina Otte (2023): Neue Halbleiterprojekte in Asien, der EU und USA angekündigt. In: Germany Trade and Invest, 19.9.2023. <https://www.gtai.de/de/trade/china/specials/neue-halbleiterprojekte-in-asien-der-eu-und-usa-angekuendigt-1034572> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 46 EU Kommission (2023): European Chips Act. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_en (zuletzt aufgerufen: 25.10.2023).
- 47 Achim Haug, Christina Otte (2023): Neue Halbleiterprojekte in Asien, der EU und USA angekündigt. In: Germany Trade and Invest, 19.9.2023. <https://www.gtai.de/de/trade/china/specials/neue-halbleiterprojekte-in-asien-der-eu-und-usa-angekuendigt-1034572> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 48 Evi Seibert (2023): Bedenken gegen TSMC-Förderung – „Eine ungewisse Wette auf die Zukunft“. In: Tagesschau.de, 9.8.2023. <https://www.tagesschau.de/tsmc-chip-hersteller-dresden-100.html> (zuletzt aufgerufen: 25.10.2023).

- 49 Christian Speicher (2023): Quantencomputer bedrohen die Sicherheit im Internet. Muss man sich heute schon Sorgen machen? Chinesische Forscher sagen: Ja. In: Neue Züricher Zeitung, 10.01.2023. <https://www.nzz.ch/wissenschaft/quantencomputer-ist-die-rsa-verschluesselung-heute-schon-bedroht-id.1720327> (zuletzt aufgerufen: 02.11.2023).
- 50 <https://www.nist.gov/news-events/news/2022/07/nist-announces-first-four-quantum-resistant-cryptographic-algorithms> (zuletzt aufgerufen: 02.11.2023).
- 51 McKinsey & Company (24. April, 2023). Öffentliche Fördergelder für Quanten-Computing in ausgewählten Ländern weltweit bis zum Jahr 2022 (in Milliarden US-Dollar) [Graph]. In: Statista, 02.11.2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1196176/umfrage/oeffentliche-gelder-fuer-quanten-computing-weltweit-nach-land/> (zuletzt aufgerufen: 02.11.2023).
- 52 McKinsey & Company (24. April 2023). Verteilung der angekündigten öffentlichen Fördergelder für Quanten-Computing in der EU nach Geldgeberländern bis zum Jahr 2022 [Graph]. In: Statista, 2.11.2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1326624/umfrage/verteilung-der-oeffentlichen-gelder-fuer-quanten-computing-in-der-eu/> (zuletzt aufgerufen: 02.11.2023).
- 53 McKinsey & Company (24. April, 2023). Anteil von Patenten im Bereich Quantentechnologie nach Ländern im Zeitraum 2000 bis 2022 [Graph]. In: Statista, 02.11.2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1409397/umfrage/patente-quantentechnologie-nach-laendern/> (zuletzt aufgerufen: 02.11.2023).
- 54 Elliott Mason (2022): Quantum patent trends update: 2022, QED-C. <https://quantumconsortium.org/blog/quantum-patent-trends-update-2022/> (zuletzt aufgerufen: 05.10.2023).
- 55 BMBF (2023): Handlungskonzept Quantentechnologien der Bundesregierung. https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230426-handlungskonzept-quantentechnologien.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (zuletzt aufgerufen: 02.11.2023).

Impressum

Der Autor

Dr. Christian Hübner
Künstliche Intelligenz
Analyse und Beratung

T +49 30 26996 3264
christian.huebner@kas.de

Herausgeberin:

Konrad-Adenauer-Stiftung e. V. 2023, Berlin

Diese Veröffentlichung der Konrad-Adenauer-Stiftung e. V. dient ausschließlich der Information. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern oder -helfenden zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.

Gestaltung: yellow too Pasiek Horntrich GbR
Satz: KALUZA + SCHMID Studio GmbH



Der Text dieses Werkes ist lizenziert unter den Bedingungen von „Creative Commons Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 international“, CC BY-SA 4.0 (abrufbar unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.de>).

ISBN: 978-3-98574-203-5

