



mit freundlicher Genehmigung  
der Fachzeitschrift

**tu** ZEITSCHRIFT  
FÜR TECHNIK  
IM UNTERRICHT



**Neckar-Verlag GmbH**  
**Klosterring 1**  
**78050 Villingen-Schwenningen**  
**[www.neckar-verlag.de](http://www.neckar-verlag.de)**

# Informationen für den Technikunterricht



Die Technikfolgenabschätzung (TA) trägt dazu bei, die Potenziale des wissenschaftlich-technischen Wandels zu nutzen und Risiken minimieren oder vermeiden zu können. In dieser Rubrik greifen wir regelmäßig aktuelle Publikationen des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) auf, die wir der Leserschaft der **tu** als Themen für den Technikunterricht in besonderem Maße empfehlen. Mehr zum TAB und zum Download aller hier zusammengefassten Studien auf [www.tab-beim-bundestag.de](http://www.tab-beim-bundestag.de).

Die Technikfolgenabschätzung (TA) trägt dazu bei, die Potenziale des wissenschaftlich-technischen Wandels zu nutzen und Risiken minimieren oder vermeiden zu können. In dieser Rubrik greifen wir regelmäßig aktuelle Publikationen des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) auf, die wir der Leserschaft der **tu** als Themen für den Technikunterricht in besonderem Maße empfehlen. Mehr zum TAB und zum Download aller hier zusammengefassten Studien auf [www.tab-beim-bundestag.de](http://www.tab-beim-bundestag.de).



vor dem Hintergrund aktueller Herausforderungen und systemischer Krisen tragfähige Resilienzstrategien für diese drei Infrastruktursysteme entwickelt werden können.

Hier werden die Ergebnisse zu den Bereichen Energie und Verkehr/Mobilität zusammengefasst, weil sie im Technikunterricht besonders präsent sind.

## Infrastruktursystem Energie<sup>3)</sup>

Um die klima- und energiepolitischen Ziele zu erreichen, soll die Nutzung erneuerbarer Energien (vor allem Solar- und Windkraft) massiv ausgeweitet werden. Die Infrastruktur muss dafür in den Bereichen Netzausbau, weitere Elektrifizierung und Sektorkopplung ausgebaut werden. Als Energieträger und industrieller Rohstoff für die Energiewirtschaft und zur Dekarbonisierung von Industrie, Luftfahrt und Schifffahrt soll nach dem Wegfall fossiler Stoffe Wasserstoff eingesetzt werden.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, werden im Report bei der Analyse des Energiesystems fünf Wertschöpfungsbereiche unterschieden:

- Vorgelagerte Prozesse, also die Produktion von Anlagen und Infrastrukturkomponenten, die für die Gewinnung, Umwandlung und Speicherung von Energie sowie ihre Verteilung und ihren Verbrauch notwendig sind,
- Erzeugung und Umwandlung von Energie,
- Speicherung von Energie,
- Transport und Verteilung und
- der Verbrauch.

Das TAB identifiziert drei **Trendcluster** beim Infrastruktursystem Energie: die *Digitalisierung der Netz- und Verbrauchssteuerung*, die *Dekarboni-*

## Foresight-Report 2024

Der Begriff „Foresight“ steht international für den Versuch, offene und daher unsichere Zukunftsentwicklungen auf Basis fundierter wissenschaftlicher

und Experten (*Delphi-Ansatz*) und dem Entwickeln, Durchspielen und Auswerten von Szenarien.

Im Juni 2024 erschien im Rahmen der erweiterten Foresight-Aktivitäten des TAB<sup>1)</sup> die erste Ausgabe des Foresight-

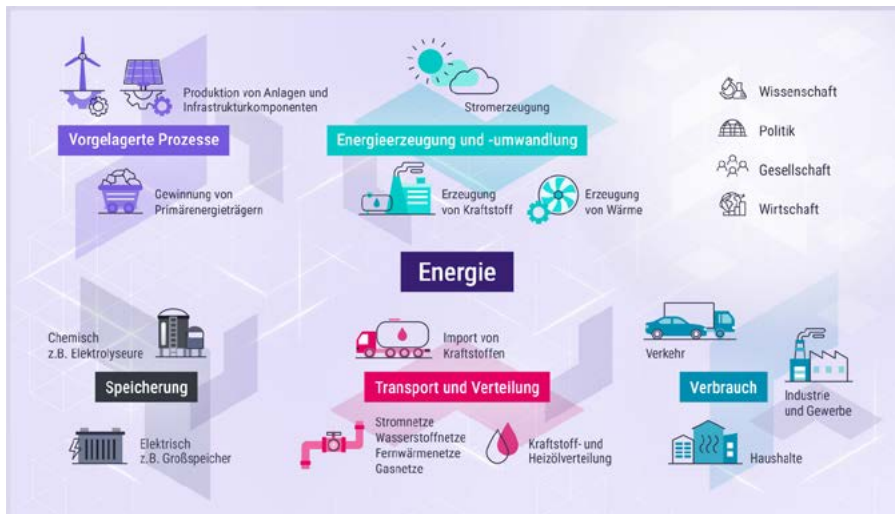


Abb. 1: Systembild des Infrastruktursystems Energie (<https://foresight.tab-beim-bundestag.de/reports/energie/infrastruktursystem-energie/>).

Kenntnisse und methodischer Vorgehensweise zu reflektieren. Man bedient sich dazu u. a. dem systematischen Auswerten von als wichtig eingestuft Quellen (*Horizon Scanning*), der Zukunftsbefragung von Expertinnen

Reports, der nun jährlich erscheinen wird. Der Fokus des Foresight-Reports<sup>2)</sup> 2024 liegt auf den kritischen Infrastrukturen Energie, Landwirtschaft und Ernährung sowie Verkehr und Mobilität. Mit seiner Hilfe sollen

<sup>1)</sup> <https://www.tab-beim-bundestag.de/foresight.php>

<sup>2)</sup> Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2024): Foresight-Report 2024. Mit Fokus auf die Infrastruktursysteme Energie, Landwirtschaft und Ernährung sowie Verkehr und Mobilität (Autor/innen: Bledow, N.; Eickhoff, M.; Evers-Wölk, M.; Kahlisch, C.; Kehl, C.; Nolte, R.; Rioussset, P.). Berlin. <https://foresight.tab-beim-bundestag.de/>

<sup>3)</sup> <https://foresight.tab-beim-bundestag.de/reports/energie/infrastruktursystem-energie/>.

sierung des Energiesystems und der Ausbau von *Power-to-X-Infrastrukturen*, also von Systemen, mit denen Strom möglichst aus regenerativen Energieträgern in andere Energieträger umgewandelt wird. Beispiele für Entwicklungen im Bereich Digitalisierung sind die Verbreitung intelligenter Messgeräte und von intelligenten Netzsystemen. Zunehmend kommt auch ‚künstliche Intelligenz‘ (KI) zum Einsatz. Ein Beispiel stellt eine speziell auf die Resilienz des Energiesystems hin ausgerichtete KI-Anwendung dar, die historische Daten von Versorgungsunternehmen über die Leistung von Energieanlagen mit globalen Klimamodellen verknüpft. Die Anwendung soll die Wahrscheinlichkeit von Netzausfällen aufgrund extremer Wetterereignisse wie Schneestürme oder Waldbrände berechnen. Im Bereich Dekarbonisierung werden erneuerbare Energien und Stromnetze ausgebaut, um die wachsenden Strombedarfe zu decken. Außerdem wird an innovativen Werkstoffen für erneuerbare Energieanlagen sowie an Technologien zur weltraumbasierten Energieproduktion geforscht. Im Bereich Power-to-X werden die Energiespeicherkapazitäten ausgebaut. Die Verbreitung von Wärmepumpen sowie die oben angesprochene Wasserstofftechnik stellen zentrale Entwicklungen dar. An Bedeutung gewinnt außerdem das bidirektionale Laden von Akkumulatoren.

Mit diesen Entwicklungen steigt aber auch das Risiko für spezifische Gefährdungen. Wahrscheinlicher werden Cyberangriffe, die Beherrschbarkeit der zunehmend komplexen Systeme nimmt ab und die Gefahren durch sogenannte Pfadabhängigkeiten bei der Entwicklung nehmen zu. Der Grundgedanke dahinter ist, dass am Markt erfolgreiche Innovationen die weitere Entwicklung so beeinflussen können, dass sich in der Folge neue, zweckmäßigere Lösungen nicht zwangsläufig durchsetzen, sondern dass dem etablierten Konzept gefolgt wird. Eine Pfadabhängigkeit ist bei den Beherrschungskräften für die Beibehaltung des fossilen Energiesystems erkennbar, kann sich aber auch im Rahmen des

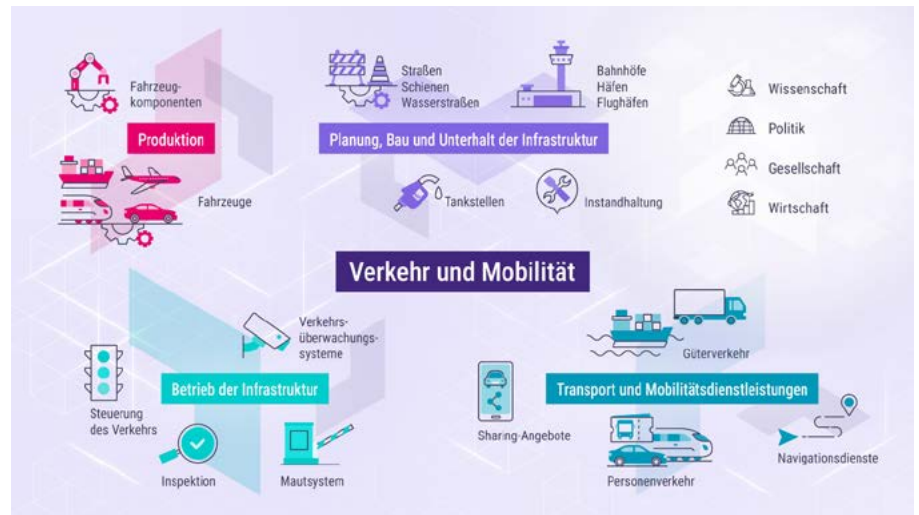


Abb. 2: Systembild des Infrastruktursystems Verkehr und Mobilität (<https://foresight.tab-beim-bundestag.de/reports/verkehr-und-mobilitat/infrastruktursystem-verkehr-und-mobilitat/>).

Ausbaus erneuerbarer Energien herausbilden und ein langfristiges Festlegen auf bestimmte Entwicklungspfade bewirken.

### Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität<sup>4)</sup>

Eine funktionsfähige Gesellschaft ist auf ein Verkehrssystem mit ausreichender Kapazität angewiesen. Sowohl für die Versorgung der Bevölkerung mit Energie, Gesundheit und Nahrungsmitteln als auch für eine leistungsfähige Wirtschaft und die individuelle Teilhabe am Arbeits- und Sozialleben ist eine effiziente Beförderung von Personen und Gütern unabdingbar. Eine der Voraussetzungen dafür ist eine leistungsfähige Verkehrsinfrastruktur, die kontinuierlich bedarfsorientiert weiterentwickelt wird.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, sind die relevanten Systembereiche bei Verkehr und Mobilität

- die Produktion von Verkehrsmitteln,
- Planung, Bau und Unterhalt der Infrastruktur,
- der Betrieb der bestehenden Infrastruktur,
- Transport- und Mobilitätsdienstleistungen.

Von besonderer Bedeutung sind aktuell Planung, Bau und Unterhalt der Infrastruktur. Zur *materiellen Verkehrsinfrastruktur* gehören die Verkehrswege Straße, Schiene und Wasserstraße und Systeme wie Bahnhöfe und (Flug-)Häfen, Tankstellen, Beleuchtung, Ampeln, Leit- und Verkehrsüberwachungssysteme. Für Betrieb und Instandhaltung ist u. a. eine leistungsfähige Bauindustrie erforderlich. Zudem werden auch *immaterielle Komponenten* wie Verkehrsrecht und -regelungen, Verkehrsüberwachung und -steuerung sowie Infrastrukturplanungs- und -managementsysteme zur Verkehrsinfrastruktur gezählt. Während die Verkehrsentwicklungsplanung, also die Formulierung von Zielen und Maßnahmen im Bereich der Verkehrs- und Infrastrukturentwicklung, Sache der Kommunen ist, obliegt deren Pflege und Durchsetzung in der Regel staatlichen Behörden und Vollzugsorganen.

Laut Foresight-Report prägen drei **Trendcluster** das Infrastruktursystem: *alternative Antriebe*, *vernetzte Mobilitätslösungen* sowie *automatisiertes und autonomes Fahren*.

Geforscht wird beispielsweise an neuen Batteriekonzepten, an Schiffen mit Windzusatzantrieb, an vollintegrierten Mobility-as-a-Service-Angeboten sowie an autonomen Logistikkösungen für die ‚letzte Meile‘.

<sup>4)</sup> <https://foresight.tab-beim-bundestag.de/reports/verkehr-und-mobilitat/infrastruktursystem-verkehr-und-mobilitat/>

Die Transformation des Verkehrs- und Mobilitätssystems ist aufgrund langwirkender institutioneller und technischer Pfadabhängigkeiten besonders herausfordernd. Auch die gesellschaftliche Polarisierung in Bezug auf die Umstellung auf nachhaltige Mobilitätsformen kann das Erreichen der Transformationsziele gefährden.

Der Verkehrssektor trägt rund 20 % zu den Treibhausgasemissionen Deutschlands bei und ist damit ein wesentlicher CO<sub>2</sub>-Emittent. Seit Jahren steigt die Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr an, im Personenverkehr zwischen 1991 und 2019 um fast 34 %, im inländischen Güterverkehr um 75 %. Obwohl politisch anders beabsichtigt, werden im Personenverkehr 84,4 % und im Güterverkehr 71 % der Verkehrsleistung auf der Straße abgewickelt. Der Pkw-Bestand wächst nicht nur, es gibt auch eine steigende Nachfrage nach immer ressourcenintensiveren Fahrzeugen. All das trägt wesentlich dazu bei, dass der Verkehrssektor die jährlichen Einsparziele bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen seit Jahren verfehlt.

Für eine klimaneutrale Gestaltung des Verkehrs ist vor allem eine Umstellung der mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeuge auf *alternative Antriebe* unabdingbar. Da das Schienennetz bereits überwiegend elektrifiziert ist (61 % des Streckennetzes und 90 % der Verkehrsleistung auf der Schiene), stehen bei der weiteren Umstellung der Pkw-, Lkw-, Schiffs- und Flugverkehr im Fokus. Im Pkw-Bereich umfassen die Förderaktivitäten neben der stetigen Verschärfung der Flottengrenzwerte für Pkw und Lkw auf EU-Ebene vor allem den Ausbau der Ladeinfrastruktur mit ausreichender Kapazität und in ausreichender Dichte. Die Zahl der öffentlichen Ladestationen nahm von 2017 bis 2023 von rund 9.000 auf über 90.000 zu. Daneben werden innovative Ladekonzepte wie beispielsweise induktives oder automatisiertes Laden erforscht.

Seit 2019 ist ein deutlicher Anstieg bei der Anzahl der zugelassenen reinen Elektroautos in Deutschland festzu-

stellen. Allein zwischen 2022 bis 2023 hat sich deren Zahl von rund 600.000 auf über 1,3 Mio. mehr als verdoppelt. Für 2024 wird jedoch mit einem Einbruch bei den Neuzulassungen gerechnet, nicht zuletzt wegen des Wegfalls der Kaufprämien für E-Autos. Ihr Anteil am Pkw-Bestand liegt in Deutschland mit rund 2,1 % in einem sehr niedrigen Bereich.

Auf kommunaler Ebene findet zudem eine Förderung nachhaltiger Mobilitätsformen statt. Diese Bemühungen werden gesellschaftspolitisch kontrovers diskutiert, u. a. weil damit eine wachsende Konkurrenz um Flächen-nutzung vor allem in dichter besiedelten Gebieten verbunden ist. Dort steigt die Vielfalt an Mobilitätsoptionen und es ist eine zunehmende Nachfrage nach nachhaltigen Mobilitätsangeboten bei urbanen Bevölkerungsgruppen zu beobachten. Diese äußert sich beispielsweise in einem weit überproportionalen Anstieg der mit dem Fahrrad zurückgelegten Wege und Kilometer, ein Trend, der durch die zunehmende Reichweite von Pedelecs und E-Bikes weiter unterstützt werden könnte.

Im Luft-, Schiffs- und Schwerlastverkehr ist die Umstellung auf alternative Antriebe weniger weit vorangeschritten. Von den 3,94 Mio. in Deutschland zugelassenen Nutzfahrzeugen (Lkw und Sattelzugmaschinen) verfügen beispielsweise bislang 1,73 % über eine alternative Antriebsart. Dies hat hauptsächlich damit zu tun, dass batterieelektrische Antriebe bislang für den Langstreckenbetrieb schwerer Fahrzeuge wenig geeignet sind.

Die Batterie ist das neuralgische Bauteil eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs. Seit den 1990er Jahren haben sich Lithium-Ionen-Batterien durchgesetzt und eine kontinuierliche Weiterentwicklung erfahren. Sie bieten heute relativ hohe masse- und volumenbezogene Energiedichten, Reichweiten von mehreren hundert Kilometern sind Standard. Ihre Lebensdauer ist mit zehn Jahren im Vergleich mit anderen Batteriesystemen hoch. Nachteile liegen in der Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen wie Lithium, Nickel und Kobalt, die

hauptsächlich aus dem Ausland importiert werden müssen, sowie in der Brandgefahr.

Weltweit wird daher intensiv an alternativen Batteriekonzepten geforscht, mit höherer Energiedichte (und damit größerer Reichweite) und weniger kritischen und teuren Werkstoffen. Eine vielversprechende Alternative ist die Feststoffbatterie, bei der der flüssige Elektrolyt durch Polymere, Keramiken oder hybride Lösungen ersetzt wird. Sie basieren zwar meist auch auf Lithium, versprechen aber eine höhere Sicherheit und deutlich höhere Reichweiten. Daneben wird an Post-Lithium-Systemen geforscht, bei denen Lithium durch billigere und häufiger vorkommende Materialien ersetzt wird. Hier stehen insbesondere Natrium-Ionen-Batterien im Fokus.

Im Schifffahrtsbereich, der als besonders schwierig zu dekarbonisieren gilt, dominiert bei den alternativen Antrieben derzeit das zwar emissionsärmere, aber fossile Flüssigerdgas (LNG). Elektrische Antriebe dürften zukünftig vor allem in der Binnenschifffahrt Verbreitung finden. Benötigt werden daneben Antriebskonzepte auf Basis von Biomasse (B-Fuels) oder grünem Wasserstoff (E-Fuels); Letztere sind meist erst als Prototypen verfügbar.

Die erforderliche Infrastruktur für Herstellung, Transport und Speicherung von Wasserstoff, der als Grundstoff für die Produktion von E-Fuels sowohl für die Dekarbonisierung des Luft- wie Schiffsverkehrs benötigt wird, steckt noch in den Kinderschuhen, wird jedoch mithilfe starker politischer Förderung sukzessive ausgebaut.

## Perspektiven künstlicher Intelligenz in der Diagnose und Therapie seltener Krebserkrankungen<sup>5)</sup>

Marc Bovenschulte

In der Diagnostik und Therapie von Krankheiten wurden in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht. In nicht unerheblichem Umfang ist das der zunehmenden Verfügbarkeit digitaler Gesundheitsdaten und auch Verfahren mittels künstlicher neuronaler Netze zu verdanken, die auch als künstliche Intelligenz (KI) bezeichnet werden. Grundsätzlich sind sogenannte lernende Systeme auf große Datenbestände angewiesen. Trotzdem gelingt es zunehmend, KI-Systeme gerade für Menschen zu nutzen, die an seltenen Krebserkrankungen leiden.

geringen Fallzahlen pro Krebstypus ergeben. Dazu gehören ein deutlich begrenztes Fachwissen in der Fläche, späte oder falsche Diagnosestellungen, eine begrenzte Anzahl zugelassener Therapieansätze, die geringe wirtschaftliche Attraktivität der Entwicklung neuer Therapeutika, Schwierigkeiten bei der Durchführung aussagekräftiger klinischer Studien und der Mangel an Gewebekbanken (The Rare Cancers Working Group o. J.).

KI-Ansätze spielen in folgenden Bereichen der Medizin aktuell eine relevante Rolle:

- Diagnose
- Auswahl geeigneter Therapiemaßnahmen
- Prognose des Krankheitsverlaufs

rung“ (Bundesregierung 2018, S. 8 f.). Auf künstlichen neuronalen Netzen und sogenanntem tiefen Lernen beruhende Anwendungen können helfen, Muster und Zusammenhänge zu identifizieren, die für Menschen nur schwer oder gar nicht zu erkennen sind (Goodfellow et al. 2016). Allerdings sind Systeme des tiefen Lernens oftmals eine Blackbox, da auch für Expertinnen und Experten kaum nachvollziehbar ist, auf welcher Daten- und Verarbeitungsgrundlage die Ergebnisse erzielt werden.

Für manche Anwendungsfälle wie maschinelle Textübersetzungen ist diese mangelnde Erklärbarkeit unkritisch, für andere wie das autonome Fahren oder in der Medizin hingegen nicht (Schaaf/Wagner o. J.). Für Anwendungen in der Medizin zeigen erste Studien folgerichtig, dass bei Ärztinnen und Ärzten das Bedürfnis ausgeprägt ist, die Ergebnisse eines KI-Systems nachvollziehen zu können (Samhammer et al. 2023b, S. 13).

### Künstliche Intelligenz in Diagnostik und Therapie

KI-Systeme im medizinischen Bereich werden darauf trainiert, unterschiedliche Daten wie Röntgenbilder, molekularbiologische Informationen, Sequenzinformationen aus DNA-Analysen, Literaturdatenbanken etc. auszuwerten, miteinander zu vergleichen, in Beziehung zu setzen und daraus Schlüsse zu ziehen.

Ein vergleichsweise gut etabliertes Anwendungsgebiet für KI-Ansätze ist die Befundung der Ergebnisse bildgebender Verfahren, z. B. Röntgen-, Computer-, Magnetresonanztomografie – auch als CAD-Systeme (Computer-Aided Diagnostics) bezeichnet. Dabei führt das CAD-System ergänzend zum Menschen eine Analyse der Bildinhalte durch und vergleicht die darin enthaltenen Muster mit den Mustern aus Vergleichs- bzw. Referenzdaten, um auffällige Bereiche hervorzuheben.

Eine sichere Detektion und die Klassifizierung von seltenen Tumoren sind



Abb. 3: Neue Wege für die Diagnose und die Therapie von seltenen Krebserkrankungen.

### Hintergrund und Entwicklungsstand

Von seltenen Krebserkrankungen wird gesprochen, wenn weniger als sechs von 100.000 Menschen neu erkranken. Für Deutschland sind das weniger als 5.000 neu erkrankte Menschen pro Jahr (DKFZ o. J.).

Mit diesen sind verschiedene Herausforderungen verbunden, die sich oftmals allein schon aus den vergleichsweise

- therapeutische Begleitung der Patientinnen und Patienten
- Entwicklung von Medikamenten
- neuartige, personalisierte Therapieansätze.

In Abbildung 3 sind die zentralen Entwicklungsbereiche dargestellt.

Als Grundsatz staatlicher Forschungsförderung in diesem Bereich gilt die Formel „Personalisierung und Digitalisie-

<sup>5)</sup> Der Text geht zurück auf das Themenkurzprofil Nr. 71 – Abruf: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000172201> oder <https://doi.org/10.5445/IR/1000172201>

nur möglich, wenn das System auf Vergleichsdaten seltener Krebserkrankungen zugreifen kann. Die geringen Fallzahlen können eine (technische) Hürde darstellen. KI-Systeme, die auf tiefem Lernen basieren, bauen in ihrer Zielsetzung auf bisherigen CAD-Systemen auf, erweitern sie jedoch aufgrund des lernenden Charakters der künstlichen neuronalen Netze. In einer Studie zur Detektion eines Tumors im Bauchraum war eine KI im Vergleich mit der klassischen Befundung fast doppelt so gut in der Lage, den Grad der Aggressivität der Erkrankung anhand von Computertomografiebildern einzuschätzen. Durch die Erkennung von Details, die für das bloße Auge unsichtbar sind, erreichte die KI eine Genauigkeit von 82 % gegenüber 44 % bei der routinemäßig verwendeten Laboranalyse (Arthur et al. 2023).

Darüber hinaus kann die KI in den Daten Hinweise auf neue Biomarker finden, die das Tumorscreening, die Detektion und Diagnose sowie die Art der therapeutischen Maßnahmen unterstützen, um die beste Behandlung für die einzelnen Patienten zu finden. In der Therapie werden darüber hinaus auf maschinellem Lernen beruhende prädiktive Modellierungstechniken eingesetzt, um den Verlauf seltener Krankheiten vorherzusagen, sodass eine gezieltere Behandlung möglich ist (Völkel/Wagner 2023, S. 1034). Auch bei der Entwicklung von Arzneimitteln für seltene Krankheiten hat sich die KI als vielversprechend erwiesen, indem sie anhand von (molekularen) Eigenschaften Untergruppen von Patienten identifiziert, die am ehesten auf eine bestimmte Therapieform ansprechen (Liao et al. 2022; Visibelli et al. 2023, S. 1).

### Künstliche Intelligenz und Datennutzung

Bei der Behandlung seltener Krebserkrankungen haben Fallbeschreibungen und Therapiedokumentationen einzelner Patienten auch heute schon eine große Bedeutung, weil damit der Mangel an empirischen Daten und an Behandlungsleitlinien zumindest ansatzweise kompensiert werden kann. Auch spezifische einheitliche und übergrei-

fende Register, wie beispielsweise für seltene Prädispositionssyndrome von Krebs, bieten hier eine wertvolle Informationsquelle (Dutzmann et al. 2023). Als wertvolle Quellen werden Register, Leitlinien, wissenschaftliche Literatur, Daten aus der Bildgebung, molekularen Markern, aus genetischen und physiologischen Analysen gesehen. Auch für die prädiktive Modellierung und Früherkennung kann KI zur Analyse von Daten aus einer Vielzahl von Quellen, wie elektronischen Gesundheitsakten, genetischen Informationen und Umweltdaten, eingesetzt werden, um das individuelle Krebsrisiko vorherzusagen und Präventionsstrategien entsprechend anzupassen (Cabral et al. 2023, S. 3432).

Zielpunkt einer solch umfassenden Zusammenführung von diagnostischen, therapeutischen und sonstigen Patientendaten könnte die Erstellung eines digitalen Zwillings sein, der individuelle Patientinnen und Patienten in allen relevanten Parametern und Faktoren virtuell dynamisch abbildet und die Modellierung einer Behandlung erlaubt (Biller-Adorno et al. 2023).

Grundsätzlich profitiert diese Entwicklung davon, dass durch die zunehmende Digitalisierung des Gesundheitswesens prinzipiell immer größere Datenmengen digital vorliegen. Sie können einerseits für das Training der Systeme und andererseits als Referenzdaten für die Diagnostik genutzt werden (Pawar 2023).

### Künstliche Intelligenz und personalisierte Medizin

Personalisierte Behandlungsansätze erfordern die Entwicklung und Verfügbarkeit molekularbiologischer Therapieformen, bei denen an genetischen bzw. molekularen Ursachen der Erkrankungen angesetzt wird. Gegenwärtig wird an der Berliner Charité ein gemäß dem individuellen genetischen Profil eines Tumors individuell entwickelter mRNA-Impfstoff getestet. Er wird nach dem operativen Entfernen des Tumors – in diesem Fall schwarzer Hautkrebs – verabreicht, um eine Neuerkrankung zu verhindern (Dittrich 2024).

Vor dem Hintergrund des Booms der Nutzung von Large Language Models (LLM) wie z. B. ChatGPT wird untersucht, wie diese generativen KI-Anwendungen in der Präzisionsmedizin genutzt werden können. Hintergrund ist, dass sich mit dem Wissen um die Biologie eines Tumors auch die Möglichkeiten zu seiner Behandlung verbessern. Therapieformen sind beispielsweise der Einsatz von spezifischen Antikörpern, gentechnisch veränderte Körperzellen von Patientinnen und Patienten oder die Gabe von niedermolekularen Hemmstoffen. In einem Experiment wurden an der Charité für zehn fiktive Patienten molekulare Tumorprofile angelegt. Auf dieser Basis wurde an vier LLM der Auftrag formuliert, ausgehend von den einzelnen fiktiven molekularen Tumorprofilen die Literatur zu analysieren und Therapieempfehlungen abzuleiten.

Im Ergebnis lieferten die LLM zum Teil brauchbare Vorschläge und Hinweise. Sie reichen bisher jedoch nicht an die Qualität der Analysen menschlicher Expertinnen und Experten heran. Gravierend ist, dass erfundene (halluzinierte) Informationen integriert wurden und eine geringe Konsistenz der Ergebnisse verschiedener Modellversionen der LLM besteht. Allerdings erzielten die LLM in zwei Fällen einzigartige Therapieansätze, die auch von Fachleuten nicht in Betrachtung gezogen wurden (Benary et al. 2023).

Für reale medizinische Anwendungen sind derartige Ergebnisse inakzeptabel. In der Wirkstoffentwicklung kann das Halluzinieren jedoch auch Vorteile bieten. So wurden an der Stanford Medicine und der McMaster University Wirkstoffe für antibiotikaresistente Keime mit der kontrolliert halluzinierenden generativen KI „SynthoMol“ entwickelt, inklusive der nötigen Syntheseschritte (Tomba 2024).

Die bisherigen Erfahrungen mit KI-Anwendungen in der allgemeinen Onkologie sind ambivalent. Es sind durchaus positive Entwicklungen insbesondere in der Tumorerkennung bzw. -klassifizierung und in der Therapie erkennbar. In einer Expertenumfrage im Bereich der Onkologie schätzten die meisten Befragten, dass die KI eine entschei-

dende Rolle bei der Vorhersage, Früherkennung, Einstufung und Klassifizierung von Krebs spielen und damit eine zuverlässigere Diagnose ermöglichen und die Nachsorgeleistungen verbessern wird (Cabral et al. 2023, S. 3442). Demgegenüber steht, dass es sich nur bei wenigen praktischen Erfahrungen um eine breite empirische Evidenz handelt. Vielmehr sind es experimentelle Anwendungen und Ergebnisse aus Pilotstudien. Außerdem sind nur wenige KI-Anwendungen für den Einsatz in der Praxis zugelassen (z. B. Systeme für die Auswertung bildgebender Verfahren; vgl. Zhang et al. 2023, S. 1781).

Wenngleich bislang KI-Anwendungen in der Onkologie nur in Ausnahmen explizit bei seltenen Krebserkrankungen eingesetzt werden, scheint es, wenn der Mangel an Referenzdaten durch die Nutzung vielfältiger individueller Patienten- und Tumordaten sowie der Therapie mittels personalisierter Medizin überwunden ist, denkbar, dass eine Unterscheidung zwischen häufigen und seltenen Krebserkrankungen aus diagnostischer und therapeutischer Sicht an Relevanz verliert.

## Die Zulassung von KI-basierten Diagnose- und Behandlungsformen

KI-Anwendungen, die Hinweise und Empfehlungen zur Diagnose oder Therapie von Erkrankungen geben sollen, werden als Medizinprodukt eingestuft und unterliegen damit – in Abhängigkeit ihrer Risikoklassen – Qualitäts- und Zertifizierungsverfahren. Da sie durch die zumindest zu Beginn individuelle Nutzung und Verarbeitung der Daten Unikate in ihrer spezifischen Funktionalität darstellen, ist eine Zulassung als Medizinprodukt mit definierten Eigenschaften kaum möglich (Samhammer et al. 2023c, S. 36). Dazu wären klinische Studien mit hohen Fallzahlen erforderlich.

Hier ist ein anpassungsfähiger, pragmatisch nutzbarer Rechtsrahmen erforderlich. Grundsätzlich bestehen nach Ansicht von Derraz et al. (2024) insbesondere zwei Herausforderungen

für eine angemessene Regulierung der KI-basierten Personalisierung in der Onkologie:

- ihr multimodaler (aus unterschiedlichen Quellen stammende Daten) und integrativer Charakter
- das Ausmaß der regulatorischen Änderungen, die erforderlich wären, um dies zu berücksichtigen.

Aufgrund von institutionellen und politischen Widerständen, Eigeninteressen und fehlendem Willen zu einem weitgehenden Pragmatismus erfolgt die Umsetzung einer flexiblen Regulierung bislang nicht oder nur schleppend.

Mit Blick auf internationale Tendenzen ist ein hybrider Regulierungsansatz wahrscheinlich: „Derzeit sieht es auf internationaler Ebene so aus, als ob der angewandte Regulierungsansatz eine Kombination aus unflexiblen Rahmenregelungen, die ursprünglich für Produkte mit definierten Eigenschaften entwickelt wurden, und aus neuen Rahmenregelungen, die speziell für KI als Technologie entwickelt werden, sein wird.“ (Derraz et al. 2024, S. 3; Übersetzung durch den Autor) Ergänzend besteht das Problem, dass lernende KI-Anwendungen durch den Nutzungsprozess nicht mehr der zugelassenen Zertifizierung entsprechen, sodass jede Anwendung faktisch wieder neu zertifiziert werden müsste (vgl. Samhammer et al. 2023c, S. 36). Die durch den nutzungsimmanenten Lernprozess erworbenen Funktionen bzw. Fähigkeiten wären folglich in zu definierenden Abständen neu zu zertifizieren oder im Sinne eines TÜV-Konzepts zumindest zu überprüfen.

Die Validierung von KI-Anwendungen, die auf LLM beruhen, ist wegen des Halluzinierens und der nahezu unendlichen Bandbreite an Dateninputs und -outputs eine besondere Herausforderung. In der EU sind LLM-Systeme, die explizit medizinische Empfehlungen geben, grundsätzlich zulassungspflichtig (Derraz et al. 2024, S. 2).

Eine weitere Schwierigkeit ist, dass Patientinnen und Patienten frei verfügbare und nicht speziell für die medizinische Nutzung zugelassene

KI-Anwendungen wie Chatbots für individuelle Auskünfte mit Blick auf ihre (seltenen) Krebserkrankungen nutzen, so wie sie es bisher schon mit Internetsuchmaschinen getan haben („Dr. Google“). Eine Studie zeigt, dass die Qualität der Ergebnisse stark von der Art und Weise der gestellten Fragen (Prompts) abhängig ist. Im Schnitt entsprach rund ein Drittel der Antworten und Vorschläge nicht den gängigen Leitlinien zur Krebsbehandlung und 12,5 % der Ergebnisse waren halluziniert (Chen et al. 2023, S. 1460).

## Rechtliche und ethische Fragestellungen

Die Bewertung des Einsatzes von KI-Anwendungen für die Bekämpfung von seltenen Krebserkrankungen berührt grundsätzlich alle Fragestellungen, die auch für sonstige KI-Anwendungen in der Medizin oder der Onkologie gelten.

In seiner Stellungnahme „Mensch und Maschine – Herausforderungen durch Künstliche Intelligenz“ formuliert der Deutsche Ethikrat (2023) drei unterschiedliche weit gehende weitgehende Ausprägungen der KI-Anwendungen für die medizinische Versorgung: eine enge, mittlere und weitreichende Ersetzung menschlicher Entscheidung. Praktisch alle KI-Anwendungen, die heute in der medizinischen Versorgung zur Bekämpfung von (seltenen) Krebserkrankungen eingesetzt werden, fallen in die Kategorie der engen Ersetzung. Dabei unterstützen KI-Anwendungen das medizinische Personal und erhöhen beispielsweise die Präzision von Diagnosen. Den *potenziellen* Chancen eines solchen Einsatzes stehen *mögliche* Risiken wie der schleichende Kompetenzverlust und eine nachlassende Sorgfaltspflicht des medizinischen Personals entgegen, da es sich zunehmend auf die Ergebnisse der KI verlassen könnte. Der KI-Anwendung bleibt die Funktion eines Zweitgutachtens, die Entscheidungshoheit verbleibt beim medizinischen Fachpersonal (Deutscher Ethikrat 2023, S. 203).

Ebenso muss gewährleistet sein, dass die Informationsbedürfnisse der Patientinnen und Patienten gegenüber

den neuen Verfahren im Kontext von Diagnose und Therapie befriedigt werden (Aufklärungsgespräche). Bei der informationellen Selbstbestimmung (Nutzung personenbezogener Daten) stoßen, angesichts des Umgangs der Anbieter mit Daten zum Training von KI-Systemen, KI-Anwendungen an rechtliche Grenzen (Deutscher Ethikrat 2023, S. 199 ff.; Samhammer et al. 2023c, S. 33).

Bei einer mittleren oder gar weitreichenden Ersetzung menschlicher Entscheidung würde die Entscheidungshoheit schrittweise bis hin zur Handlungsautonomie auf die KI-Anwendung übergehen. Das könnte eine Reaktion auf den Personalmangel im medizinischen Bereich sein, was aber rechtlich und ethisch kaum vertretbare Implikationen mit sich bringen würde (Deutscher Ethikrat 2023, S. 217 f.). Die Verantwortung würde dabei nicht aufgehoben, sondern gestreut: Neben dem unmittelbar im Behandlungskontext stehenden medizinischen Fachpersonal wären weitere Akteure wie beispielsweise die Klinikleitung, der Chief Digital Officer und die Hersteller einzubeziehen (ebd., S. 31).

Ein neuralgischer Punkt bei KI-Anwendungen in der Medizin ist die (fehlende) Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse. Es ist davon auszugehen, „dass nicht alle Beteiligten das technische Know-how dafür besitzen und bei steigender Komplexität der Systeme selbst die Entwicklerinnen und Entwickler nicht jeden Schritt der Analyse nachvollziehen können“ (Samhammer et al. 2023a, S. 25). Dementsprechend müssen KI-Anwendungen in der Medizin/Onkologie auch auf die Vertrauenswürdigkeit ihrer Ergebnisse hin entwickelt werden (FDA et al. 2021). Dazu gehört eine Einbeziehung von Zulassungsbehörden und medizinischen Fachgesellschaften bereits in die Entwicklung, die Dokumentation der Auswahl sowie Nutzung von Trainings-, Validierungs- und Testdaten und eine Systemgestaltung, die die menschliche Ergebnisplausibilität als bewusste Wahrnehmung erfordert (Deutscher Ethikrat 2023, S. 216 f.).

Vom Grundsatz her schwierig zu beantworten, gerade im Kontext seltener

Krankheiten, ist die Frage nach einer Beschränkung auf Anwendungen, deren Funktionalität und Mehrwert an Präzision und Effektivität in empirischen Studien nachgewiesen werden konnten (Deutscher Ethikrat 2023, S. 217 f.). Es besteht ein nachvollziehbares Interesse von Patienten, dass ihnen KI-basierte Ansätze zugänglich gemacht werden. Da solche Systeme in die Aus- und Weiterbildung des medizinischen Fachpersonals aufgenommen werden müssten, geschähe das ohne rechtliche Klärung und Absicherung. Das brächte eine spezifische Verantwortung im Hinblick auf eine umfassende sowie angemessene Einbeziehung der Patientinnen und Patienten mit sich.

### Gesellschaftliche und politische Relevanz

Besonders für Patientinnen und Patienten mit seltenen (Krebs-)Erkrankungen ergibt sich ein hohes Potential für Verbesserungen, da viele Mediziner diese so selten in der Praxis zu Gesicht bekommen, dass sie sie unter Umständen gar nicht erkennen und deuten können: „Ein Viertel aller Patient/innen mit seltenen Erkrankungen wartet zwischen 5 und 30 Jahren, bis eine richtige Diagnose gestellt wird.“ (Völkel/Wagner 2023, S. 1034) Der generelle Trend zu einer personalisierten Medizin, die den Einsatz von KI einschließt, wird den Wunsch nach und den Druck auf die Bereitstellung neuer Diagnose- und Behandlungsverfahren erhöhen, weil sie die Zeit bis zur Diagnose verkürzen und die Wirksamkeit der (Einzelfall-)Therapien erhöhen sowie die verbleibende Lebenszeit und -qualität verbessern kann.

Durch eine gezieltere Diagnose und Therapie können unter Umständen die direkten und indirekten Kosten für das Gesundheitssystem reduziert werden. Neben den eigentlichen Kosten für Diagnose und Therapie zählt hierzu auch die potenzielle Verringerung von krankheitsbedingten Produktivitätsverlusten, Fehlzeiten, Arbeitslosigkeit etc. (Völkel/Wagner 2023, S. 1036 f.).

Um das beschriebene Potenzial nutzbar zu machen, ist angesichts des

wissenschaftlich-technischen Fortschritts das ‚Zulassungsregime‘ so anzupassen, dass es dem veränderlichen und Blackboxcharakter von lernenden KI-Anwendungen in der Medizin, auch bei der Bekämpfung von seltenen Krebserkrankungen, Rechnung trägt. Es ist dafür Sorge zu tragen, im Bereich der Daten- und Rechtssicherheit genauso wie bei den medizinischen und individuellen Belangen der Patientinnen und Patienten, dass bei der Nutzung von KI-Anwendungen in der Medizin ein angemessener Ausgleich zwischen den verschiedenen Interessengruppen geschaffen wird.

### Literatur

- ARTHUR, A.; ORTON, M.; EMSLEY, R.; VIT, S.; KELLY-MORLAND ET AL. (2023): A CT-based radiomics classification model for the prediction of histological type and tumour grade in retroperitoneal sarcoma (RADSARC-R): a retrospective multicohort analysis. In: *The Lancet Oncology* 24(11), S. 1277–1286.
- BENARY, M.; WANG, X.; SCHMIDT, M.; SOLL, D. ET AL. (2023): Leveraging Large Language Models for Decision Support in Personalized Oncology. In: *JAMA network open* 6(11), Art. e2343689.
- BILLER-ADORNO, N.; CHRISTEN, M.; KRAUTHAMMER, M.; WITT, C. (2023): Künstliche Intelligenz in der Medizin – Zielvorstellungen für die verantwortliche Nutzung digitaler Zwillinge. Universität Zürich, [https://www.dsi.uzh.ch/dam/jcr:9fbf39e8-f143-44cc-bf7a-d0e3517aa104/paper\\_dsi\\_strategy\\_lab\\_22\\_de.pdf](https://www.dsi.uzh.ch/dam/jcr:9fbf39e8-f143-44cc-bf7a-d0e3517aa104/paper_dsi_strategy_lab_22_de.pdf) (21.6.2024).
- BUNDESREGIERUNG (2018): Rahmenprogramm Gesundheitsforschung der Bundesregierung. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.), [https://www.gesundheitsforschung-bmbf.de/files/Rahmenprogramm\\_Gesundheitsforschung\\_barrierefrei.pdf](https://www.gesundheitsforschung-bmbf.de/files/Rahmenprogramm_Gesundheitsforschung_barrierefrei.pdf) (22.5.2024).



- CABRAL, B.; BRAGA, L.; SYED-ABDUL, S.; MOTA, F. (2023): Future of Artificial Intelligence Applications in Cancer Care: A Global Cross-Sectional Survey of Researchers. In: *Current oncology* 30(3), S. 3432–3446.
- CHEN, S.; KANN, B.; FOOTE, M.; AERTS, H. ET AL. (2023): Use of Artificial Intelligence Chatbots for Cancer Treatment Information. In: *JAMA Oncology* 9(10), S. 1459–1462.
- DERRAZ, B.; BREDI, G.; KAEMPF, C.; BAENKE, F. ET AL. (2024): New regulatory thinking is needed for AI-based personalised drug and cell therapies in precision oncology. *Npj precision oncology* 8, Art. 23.
- DEUTSCHER ETHIKRAT (2023): Mensch und Maschine – Herausforderungen durch Künstliche Intelligenz. Stellungnahme. <https://www.ethikrat.org/fileadmin/Publikationen/Stellungnahmen/deutsch/stellungnahme-mensch-und-maschine.pdf> (21.6.2024).
- DITTRICH, R. (2024): „Das macht uns sehr große Hoffnung!“ Revolutionäre Impfung im Kampf gegen den Krebs. Frankfurter Rundschau, <https://www.fr.de/panorama/heilung-bekaempfung-gesundheit-video-impfung-mrna-impfstoffe-krebs-92895584.html> (21.6.2024).
- DKFZ (DEUTSCHES KREBSFORSCHUNGSZENTRUM) (2021): Seltene Krebserkrankungen – was ist das eigentlich? <https://www.dkfz.de/de/presse/pressemitteilungen/2021/dkfz-pm-21-10-Seltene-Krebserkrankungen.php> (21.6.2024).
- DUTZMANN, C.; PALMAERS, N.; MÜNTNICH, L.; STRÜWE, F. ET AL. (2023): Forschung zu Seltenen Erkrankungen in Deutschland – Das Krebsprädispositionssyndrom-Register. In: *Journal of Health Monitoring* 8(4), S. 19–24.
- FDA (U.S. FOOD & DRUG ADMINISTRATION); HEALTH CANADA; MEDICINES & HEALTHCARE PRODUCTS REGULATORY AGENCY (2021): Good Machine Learning Practice for Medical Device Development: Guiding Principles. <https://www.fda.gov/media/153486/download> (21.6.2024).
- GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. (2016): *Deep learning*. Cambridge/London.
- LIAO, J.; LI, X.; GAN, Y.; HAN, S. ET AL. (2022): Artificial intelligence assists precision medicine in cancer treatment. In: *Frontiers in oncology* 12, S. 1–16.
- PAWAR, R. (2023): Globale Highlights der künstlichen Intelligenz (KI) in der medizinischen Diagnostik im Zeitraum 2022 – 2030. <https://www.researchnester.com/de/reports/artificial-intelligence-ai-in-medical-diagnostics-market/3731> (21.6.2024).
- SAMHAMMER, D.; BECK, S.; BUDDE, K.; BURCHARDT, A. ET AL. (2023c): Rechtliche Konkretisierung. In: SAMHAMMER, D. (Hg.): *Klinische Entscheidungsfindung mit künstlicher Intelligenz. Ein interdisziplinärer Governance-Ansatz*. Berlin/Heidelberg, S. 29–36.
- SCHAAF, N.; WAGNER, P. (o. J.): Blick in die Black Box: Erklärbarkeit maschineller Lernverfahren. Deutsche Gesellschaft für Qualität e. V., <https://www.dgq.de/fachbeitraege/blick-in-die-black-box-erklarbarkeit-maschineller-lernverfahren/> (21.6.2024).
- THE RARE CANCERS WORKING GROUP (o. J.): Our Mission. European Society for Medical Oncology, <https://www.esmo.org/policy/rare-cancers-working-group/about-rare-cancers-working-group/our-mission> (21.6.2024).
- TOMPA, R. (2024): Generative AI develops potential new drugs for antibiotic-resistant bacteria. <https://med.stanford.edu/news/all-news/2024/03/ai-drug-development.html> (21.6.2024).
- VISIBELLI, A.; RONCAGLIA, B.; SPIGA, O.; SANTUCCI, A. (2023): The Impact of Artificial Intelligence in the Odyssey of Rare Diseases. In: *Biomedicine* 11(3), Art. 887.
- VÖLKE, L.; WAGNER, A. (2023): Mit künstlicher Intelligenz schneller zur Diagnose seltener Erkrankungen – ein Gebot der Ethik, Ökonomie und Lebensqualität. In: *Die Innere Medizin* 64(11), S. 1033–1040.
- ZHANG, B.; SHI, H.; WANG, H. (2023): Machine Learning and AI in Cancer Prognosis, Prediction, and Treatment Selection: A Critical Approach. In: *Journal of Multidisciplinary Healthcare* 16, S. 1779–1791.

## Anzeige

## Sammeleinband für Ihre Zeitschriften

Im Sammeleinband mit Stabmechanik können Sie Ihre Zeitschriften im DIN-A4-Format problemlos einhängen, aufbewahren und jederzeit herausnehmen. Der Ordner hat eine Rückenbreite von ca. 8 cm und fasst mind. 12 Ausgaben.



Best.-Nr. 207  
Preis € 9,80



Neckar-Verlag GmbH • 78045 Villingen-Schwenningen  
Telefon +49 (0)77 21 / 89 87-81

