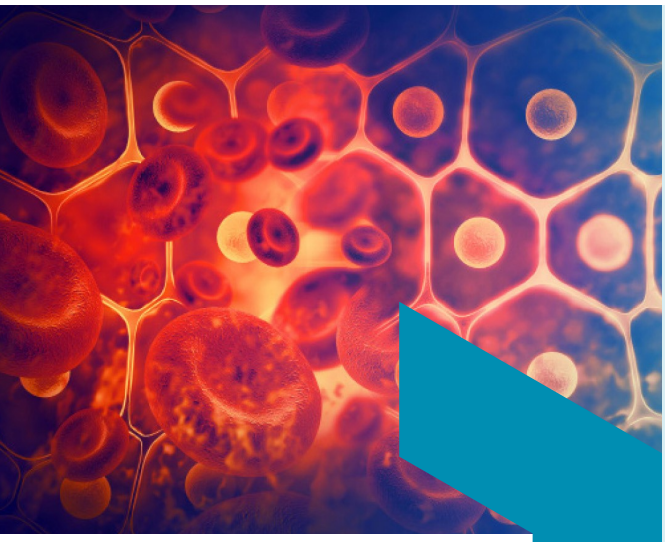
Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag



Themenkurzprofil Nr. 90
Juli 2026

Mikrorobotik für medizinische Anwendungen

Stephan Richter

In Kürze

Die medizinische Mikrorobotik gilt als vielversprechender Ansatz für zukünftige hochpräzise Diagnostik und minimalinvasive Therapien. Mikroroboter sind mikroskalige Systeme, die verschiedene Energieformen in kontrollierte Bewegungen umwandeln und gezielt medizinische Aufgaben im Körper ausführen können. Trotz bedeutender Fortschritte in den vergangenen zwei Jahrzehnten befindet sich das Forschungsfeld noch überwiegend in der präklinischen Phase.

Die Systeme basieren auf dem Prinzip Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe (EVA-Prinzip) und reagieren auf physikalische, chemische oder biologische Signale. Für den Antrieb werden insbesondere magnetische, chemische und biohybride Konzepte genutzt. Als technologisch am weitesten entwickelt gelten magnetisch gesteuerte Mikroroboter.

Besonders große Anwendungspotenziale werden in der zielgerichteten Wirkstofffreisetzung, der regenerativen Medizin, bei minimalinvasiven Eingriffen sowie der Diagnostik und Bildgebung gesehen. Durch die präzise Ansteuerung des jeweiligen Zielobjekts und den minimalinvasiven Ansatz könnten Diagnostik und Behandlungen verbessert sowie Nebenwirkungen reduziert werden.

Vor einer klinischen Anwendung müssen jedoch zentrale Herausforderungen gelöst werden. Dazu zählen die sichere Steuerung und Navigation im Körper, die Biokompatibilität der verwendeten Materialien sowie der biologische Abbau oder die Rückgewinnung der Systeme. Auch regulatorische Anforderungen, Haftungsfragen und die gesellschaftliche Akzeptanz sind bislang nicht abschließend geklärt. Die medizinische Mikrorobotik besitzt damit ein hohes Innovationspotenzial, erfordert jedoch weiteres technologisches, regulatorisches und gesellschaftliches Engagement.

Hintergrund und Entwicklungsstand

Die Mikrorobotik in der Medizin hat sich in den vergangenen Jahrzehnten von einer visionären Idee zu einem vielversprechenden Ansatz für zukünftige hochpräzise Diagnostik und minimalinvasive Therapien entwickelt. Das zentrale Versprechen des Einsatzes von Mikrorobotern in der Medizin besteht darin, diagnostische und therapeutische Verfahren schonender und präziser zu gestalten sowie ganz neue Behandlungsansätze zu ermöglichen, die mit herkömmlichen Methoden nur schwer oder gar nicht umsetzbar wären.

Medizinische Mikroroboter werden als mikroskalige Systeme[1] verstanden, die in der Lage sind, unterschiedliche Energieformen, unter anderem chemische, elektrische oder magnetische Energie, in kontrollierte mechanische Bewegung umzuwandeln, um gezielt medizinische Aufgaben in komplexen biologischen Umgebungen auszuführen (Lee et al. 2023). Die konzeptionellen Grundlagen reichen zurück bis ins Jahr 1959, als der US-amerikanische Physiker Richard Feynman in seinem visionären Vortrag „There's Plenty of Room at the Bottom" eine mögliche bioinspirierte Miniaturisierung von „computing machines" skizzierte (Feynman 1992; Ju et al. 2025). Populärkulturelle Impulse, wie der Film „Fantastic Voyage" (1966), trugen zusätzlich zur Vorstellungskraft bei (Ju et al. 2025). Während die Forschung und Entwicklung (FuE) im Bereich der medizinischen Mikrorobotik bis zur Jahrtausendwende überwiegend konzeptuell und theoretisch geprägt war, konnten danach zunehmend experimentelle Fortschritte erzielt werden (Ju et al. 2025; Iacovacci et al. 2024). Als eine der ersten In-vivo-Demonstrationen im Tiermodell gilt der Einsatz von Mikrorobotern zur gezielten Wirkstofffreisetzung im Magen von Mäusen (Gao et al. 2015).

Derzeit liegt der FuE-Fokus im Bereich der medizinischen Mikroroboter auf Machbarkeitsstudien (Design-by-Technology-Ansatz), jedoch gelingt nur selten der Schritt in die klinische Erprobung (Lee et al. 2023). Ein wesentlicher Grund dafür sind die eingesetzten Materialien oder robotischen Antriebskonzepte, die aufgrund ihrer toxischen Eigenschaften nicht für klinische Anwendungen geeignet sind. Um die Übertragbarkeit in klinische Anwendungen zu verbessern, schlagen Forschende einen Design-by-Problem-Ansatz vor, bei dem konkrete medizinische Herausforderungen als Ausgangspunkt für die Entwicklung klinisch relevanter Mikroroboter dienen (Lee et al. 2023).

In Ländern wie China und Japan sollen erste Forschungsanwendungen am Menschen stattfinden. In Deutschland werden klinische Tests frühestens innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre erwartet (Hörndlein 2025a).

Funktionsprinzip medizinischer Mikroroboter

Die Funktionsweise medizinischer Mikroroboter basiert auf dem aus der klassischen Robotik übernommenen EVA-Prinzip. Der Roboter empfängt Daten (physikalische, chemische oder biologische Signale), verarbeitet sie mittels eines festgelegten Programms oder einer Prozessregel und führt je nach Aufgabe eine Aktion aus (Schürle-Finke 2025).

Die im ersten Prozessschritt eingehenden Signale können aus dem Körper selbst stammen, etwa das Vorhandensein bestimmter Enzyme oder Entzündungen in der Nähe eines Tumors. Sie können aber auch von außen stammen und beispielsweise durch Magnetfelder oder Ultraschall erzeugt werden.

Im zweiten Schritt wird das empfangene Signal ausgewertet. Die Prozessregel legt fest, wie der Mikroroboter auf das eingehende Signal reagieren soll, und bereitet die anschließende Aktion vor. Erkennt der Mikroroboter beispielsweise ein äußeres Magnetfeld, wird die erforderliche Bewegungsrichtung bestimmt und die spätere Bewegung vorbereitet. Wird ein bestimmtes Enzym erkannt, bereitet die Prozessregel die Freisetzung des Wirkstoffs vor. Bei biohybriden Mikrorobotern auf Basis von Bakterien werden zusätzlich natürliche biologische Eigenschaften berücksichtigt. So kann die Prozessregel beispielsweise vorsehen, die Chemotaxis[2]der Bakterien zu nutzen, damit diese gezielt in sauerstoffarme Tumorbereiche wandern. Die Prozessregel entscheidet somit, welche Aktion auf ein bestimmtes Eingangssignal folgen soll, ohne diese bereits auszuführen.

Im dritten Schritt wird dann eine definierte Aktion ausgeführt. Das kann die Freisetzung eines Medikaments direkt im Tumorgewebe sein, die gezielte Bewegung durch ein Blutgefäß oder die Aktivierung eines diagnostischen Signals, das im Ultraschallbild sichtbar wird. Ziel ist immer eine möglichst präzise medizinische Wirkung an genau der Stelle, an der sie benötigt wird. Dadurch sollen Nebenwirkungen reduziert und Therapien deutlich gezielter werden als bei herkömmlichen Medikamenten, die sich oft im gesamten Körper verteilen.

1 Mikroroboter sind mikroskalige Systeme mit charakteristischen Abmessungen von wenigen Mikrometern (µm) bis zu etwa einem Millimeter. Zum Vergleich: Ein menschliches Haar ist etwa 50 bis 100 µm breit, während ein rotes Blutkörperchen einen Durchmesser von rund 8 µm besitzt. Mikroroboter operieren somit in einer Größenordnung, die mit biologischen Zellen und Gewebestrukturen vergleichbar ist.

2 Chemotaxis ist die gerichtete Bewegung von Zellen oder Organismen entlang eines Konzentrationsgefälles chemischer Stoffe. Dabei erkennen spezifische Rezeptoren chemische Signale und lösen eine Bewegung auf den Reiz zu oder von ihm weg aus.

Antriebsmechanismen von Mikrorobotern

Um eine präzise medizinische Wirkung im Körper zu erzeugen, müssen Mikroroboter gezielt navigiert und angetrieben werden. Aufgrund ihrer geringen Dimension steht jedoch kein Platz für klassische Motoren zur Verfügung, weshalb spezialisierte Antriebsmechanismen genutzt werden. Man unterscheidet physikalische, chemische und biohybride Antriebsmechanismen (Iacovacci et al. 2024; Ju et al. 2025):

- *Physikalisch angetriebene Mikroroboter* nutzen externe Felder, beispielsweise Magnetismus, Ultraschall oder Licht, zur drahtlosen Energieübertragung und Steuerung (Iacovacci et al. 2024; Ju et al. 2025). Der magnetische Antrieb gilt als die technologisch am weitesten entwickelte Methode (Hörndlein 2025a). Je nach Art des eingesetzten Magnetfeldes kann dies die Mikroroboter in eine bestimmte Richtung lenken oder unterschiedliche Fortbewegungsmechanismen auslösen.

- *Chemisch angetriebene Mikroroboter* wandeln Treibstoffe (chemische Energie) aus ihrer Umgebung direkt in mechanische Bewegung um (Ju et al. 2025). Ein typischer Antrieb ist der Blasenantrieb: Auf Basis von chemischen Reaktionen werden Gasblasen erzeugt, die ausgestoßen werden und einen raketenähnlichen Rückstoß ermöglichen. Ein weiterer Ansatz ist die Selbstphorese, bei der durch Oberflächenreaktionen lokale Konzentrations-, Temperatur- oder Ladungsgradienten erzeugt werden, entlang derer sich der Mikroroboter bewegt. Der Einsatz körpereigener Substrate (Treibstoffe) wie Glukose oder Harnstoff in Kombination mit enzymatischen Reaktionen kann die Biokompatibilität (Hörndlein 2025b) solcher eher zelltoxischen Antriebsmechanismen erhöhen.

- Eine dritte, zunehmend relevante Kategorie stellen *biohybride Antriebssysteme* dar, die lebende Organismen wie Bakterien oder Algen, aber auch Zellen integrieren und deren natürliche Bewegungs- und Orientierungseigenschaften nutzen (Ju et al. 2025). Bakterien wie E. coli nutzen rotierende Flagellen zur Fortbewegung und können zusätzlich durch Chemotaxis navigieren. Spermienzellen werden aufgrund ihrer starken Geißelbewegung häufig als natürliche Antriebseinheiten für Mikroroboter verwendet. Darüber hinaus können kontraktile Muskelzellen auf flexiblen Gerüsten kultiviert werden, um durch rhythmische Kontraktionen Bewegungen zu erzeugen.

Zukünftige Anwendungsfelder medizinischer Mikroroboter

Besondere Potenziale medizinischer Mikroroboter werden in den Anwendungsfeldern zielgerichtete Wirkstofffreisetzung, regenerative Medizin, minimalinvasive Therapie und Mikrochirurgie sowie Diagnostik und Bildgebung gesehen.

- Besonders intensiv wird die *zielgerichtete Wirkstofffreisetzung* erforscht (Iacovacci et al. 2024; Ju et al. 2025; Landers et al. 2025). Dabei transportieren Mikroroboter Wirkstoffe gezielt zum jeweiligen Wirkort und setzen diese dort kontrolliert frei. Dies kann die Wirksamkeit der Behandlung erhöhen und gleichzeitig Nebenwirkungen reduzieren, da der Wirkstoff nicht den gesamten Körper belastet. Mikroroboter können dabei auch schwer zugängliche Orte erreichen, beispielsweise enge Blutgefäße. Wissenschaftler/innen der ETH Zürich entwickelten einen magnetisch kugelförmigen Mikroroboter, der sich mittels Magnetfeldern präzise durch Blutgefäße navigieren und gleichzeitig bildgebend verfolgen lässt (Landers et al. 2025). Der Mikroroboter kann verschiedene Wirkstoffe, darunter Thrombolytika, Antibiotika und Krebsmedikamente, transportieren und durch magnetisch induzierte Erwärmung kontrolliert freisetzen.



- Auch in der *regenerativen Medizin* könnten Mikroroboter neue Möglichkeiten eröffnen, indem sie als Transport- und Positionierungshilfen für Zellen oder künstliche Gewebestrukturen eingesetzt werden. Beispielsweise wird an magnetisch steuerbaren Mikrorobotern geforscht, die zukünftig Stammzellen gezielt an geschädigte Knorpelbereiche im Knie bringen sollen, um die Geweberegeneration zu unterstützen (Ju et al. 2025). Weitere Forschungsansätze beschäftigen sich mit der möglichen Wiederherstellung von Nervenverbindungen nach Rückenmarksverletzungen durch den gezielten Transport von Zellen mittels Mikroroboter (Schmid 2026; Ye et al. 2026) sowie von regenerationsfördernden Substanzen (vergleiche den vorigen Aufzählungspunkt) (Ju et al. 2025).

- Mikroroboter gelten als vielversprechende Werkzeuge der *minimalinvasiven Therapie und Mikrochirurgie*. Sie können hochpräzise Eingriffe auf Gewebe- und Zellebene ermöglichen und damit neue chirurgische Behandlungsmöglichkeiten eröffnen. So wird beispielsweise untersucht, wie Mikroroboter zur Auflösung von Blutgerinnseln oder zum gezielten Verschluss von

Blutgefäßen eingesetzt werden können, um die Blutversorgung von Tumoren zu unterbrechen (Ju et al. 2025). In der Mikrochirurgie werden spezielle Mikrogreifer für die Entnahme von Gewebeproben oder Zellen an schwer erreichbaren Körperregionen erforscht (Ju et al. 2025). Darüber hinaus werden neuartige Konzepte untersucht, bei denen Mikroroboter Tumorzellen gezielt schädigen und so deren kontrolliertes Absterben auslösen (Ju et al. 2025).

- Im Bereich *Diagnostik und Bildgebung* können Mikroroboter als mobile Sensoren dienen, die Messungen hochauflösend, direkt im Körper vornehmen. Darüber hinaus können Mikroroboter bestimmte biologische Marker nachweisen, indem sie auf Veränderungen ihrer Umgebung reagieren. Die Konzentration von Molekülen, wie DNA, RNA oder Proteine, könnte sich dabei über Veränderungen ihres Bewegungsverhaltens bestimmen lassen. Um ihre Position im Körper jederzeit verfolgen zu können, werden etablierte bildgebende Verfahren wie Ultraschall, Magnetresonanztomografie oder neuere Methoden wie das Magnetic Particle Imaging eingesetzt.

Marktpotenzial und Markteintrittsbarrieren

Der globale Markt für medizinische Mikroroboter wurde 2024 auf rund 900 Mio. US-Dollar geschätzt und soll Prognosen zufolge bis 2035 auf etwa 3,5 Mrd. US-Dollar anwachsen. Dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von rund 12,9 % (WiseGuy Reports 2026). Zu den wesentlichen Markteintrittsbarrieren zählen der noch frühe präklinische Entwicklungsstand der Technologie, der häufig auf eine unzureichende Biokompatibilität oder potenzielle Toxizität der Systeme zurückzuführen ist. Weitere Herausforderungen ergeben sich aus hohen Entwicklungs- und Herstellungskosten, der Komplexität der Fertigung, die sich nur schwer skalieren lässt – Ausschussraten bei der Fertigung liegen teilweise über 30 % –, sowie langwierigen Zulassungsverfahren aufgrund der hohen Anforderungen der Verordnung (EU) 2017/745[3] (Gupta 2026; Probity Market Insights o. J.; WiseGuy Reports 2026).

Gesellschaftliche und politische Relevanz

Medizinische Potenziale und gesundheitspolitische Chancen

Der medizinischen Mikrorobotik wird das Potenzial zugesprochen, die medizinische Versorgung perspektivisch zu verbessern. Medizinische Mikroroboter gelten als Enabler für den Übergang von der herkömmlichen Systemtherapie hin zu einer auf Patient/innen und die Lokalisation der Krankheit zugeschnittenen Behandlung (Iacovacci et al. 2024; Ju et al. 2025; Nelson et al. 2010; SPECTARIS 2025). Hochpräzise lokale Therapien könnten Behandlungsergebnisse verbessern und mit bisherigen Behandlungen verbundene Nebenwirkungen reduzieren. Langfristig könnten auch gesundheitspolitische Vorteile entstehen, etwa durch eine therapiespezifische Reduzierung von Genesungszeiten und somit der Gesundheitskosten (Nelson et al. 2010).

Damit die Potenziale medizinischer Mikroroboter für die Diagnose und Therapie ausgeschöpft werden können, ist zunächst der Nachweis ihrer Sicherheit und Leistungsfähigkeit erforderlich. Dieser muss in präklinischen Untersuchungen und anschließend in klinischen Studien am Menschen erbracht werden. Entsprechende Evidenz liegt bislang noch nicht in ausreichendem Maße vor. Erst auf dieser Grundlage sind eine Marktzulassung und ein regulärer Einsatz medizinischer Mikroroboter zur Diagnose und Behandlung möglich.

Die Akzeptanz dieser neuen technologischen Ansätze wird eine entscheidende Rolle für den Einsatz zunächst im Rahmen klinischer Studien und später auch für den regulären Einsatz spielen. Die Vorstellung von Robotern im Körper kann sowohl Begeisterung als auch Unsicherheit oder Ängste hervorrufen. Für die medizinische Mikrorobotik gibt es bislang keine Untersuchungen, die deren Akzeptanz anwendungsspezifisch beleuchten. Wie auch bei anderen Robotikanwendungen in der Medizin (Becker 2018) ist jedoch davon auszugehen, dass offene Fragen bzw. Unsicherheiten hinsichtlich der Sicherheit, der Kontrolle und möglicher Risiken die öffentliche Wahrnehmung maßgeblich beeinflussen. Daher sind transparente Kommunikationsstrategien, die frühzeitige Einbindung relevanter Stakeholder und partizipative Ansätze in Forschung und Technologieentwicklung wichtige Voraussetzungen für gesellschaftliche Akzeptanz und Vertrauen.

Biotechnologische und medizinische Herausforderungen

Eine wesentliche Voraussetzung für die sichere klinische Anwendung von medizinischen Mikrorobotern liegt in der präzisen Steuerung und Navigation der Systeme innerhalb des Körpers (Iacovacci et al. 2024; Ju et al. 2025). Risiken wie Fehlsteuerungen, Off-Target-Effekte oder unbeabsichtigte Gewebeschäden stellen nicht nur technische, sondern auch sicherheitsrelevante Probleme dar. Für einen klinischen Einsatz sind daher robuste Kontroll-, Überwachungs- und gegebenenfalls Abschaltmechanismen erforderlich, die eine Intervention bei unerwarteten Situationen ermöglichen. Zukünftige Entwicklungsansätze sollten eine präzise Navigation ermöglichen und hochauflösende Echtzeittrackingverfahren integrieren.

3 Verordnung (EU) 2017/745 vom 5. April 2017 über Medizinprodukte, zur Änderung der Richtlinie 2001/83/EG, der Verordnung (EG) Nr. 178/2002 und der Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 und zur Aufhebung der Richtlinien 90/385/EWG und 93/42/EWG



Eine weitere Voraussetzung ist die Biokompatibilität bzw. Biodegradierbarkeit mikrorobotischer Systeme (Iacovacci et al. 2024; Ju et al. 2025). Die Auswahl geeigneter Materialien ist hierbei von entscheidender Bedeutung. Die verwendeten Biomaterialien müssen nicht nur biokompatibel und – je nach Anwendung – biologisch abbaubar sein, sondern zugleich funktionale Eigenschaften besitzen, beispielsweise für den Wirkstofftransport. Die Bewertung der Biokompatibilität erfordert umfassende Untersuchungen möglicher Toxizitätseffekte auf Zell-, Gewebe- und Organebene.

Ein weiterer Aspekt betrifft das Langzeitverhalten von medizinischen Mikrorobotern im Körper (Iacovacci et al. 2024; Ju et al. 2025). Es muss – je nach Anwendungsfall – geklärt werden, ob die Systeme vollständig biologisch abgebaut werden können, dauerhaft im Organismus verbleiben oder nach Abschluss ihrer Aufgabe gezielt entfernt werden sollen. Die Entwicklung geeigneter Strategien für Degradation, Clearance und Retrieval ist daher ebenfalls ein wichtiges Forschungsfeld.

Regulatorische Herausforderungen

Der regulatorische Rahmen für die Bewertung medizinischer Mikroroboter wird in Deutschland und Europa derzeit insbesondere durch das Medizinprodukterecht bestimmt sowie im Anwendungsfeld der zielgerichteten Wirkstofffreisetzung auch durch das Arzneimittelrecht. Diese Regelwerke sind jedoch primär auf konventionelle Medizinprodukte bzw. Arzneimittel ausgerichtet, ihre Anwendbarkeit auf medizinische Mikroroboter ist bislang noch nicht eindeutig geklärt. Je nach Ausgestaltung und Anwendungszweck könnten wirkstofffreisetzende medizinische Mikroroboter auch als Kombinationsprodukte mit besonderen Risikoprofilen eingestuft werden (Ju et al. 2025). Dies könnte bestehende Bewertungs- und Zulassungsverfahren vor neue Herausforderungen stellen.

Neben den beschriebenen Fragen zu den Voraussetzungen für eine sichere klinische Anwendung ergeben sich auch Governancefragen hinsichtlich der Haftung und Verantwortlichkeit bei Fehlfunktionen, Fehlsteuerungen oder unerwarteten Behandlungsergebnissen. Die Zuordnung der Verantwortung zwischen Mikrorobotikherstellern, Zulieferfirmen von Biomaterialien und Therapeutika sowie medizinischem Personal und Gesundheitseinrichtungen ist bislang nicht abschließend geklärt. Sie wird in der Fachliteratur als wichtige offene Fragestellung für die zukünftige Einführung medizinischer Mikroroboter diskutiert (Ju et al. 2025; Iacovacci et al. 2024).

Mögliche vertiefte Bearbeitung des Themas

Die medizinische Mikrorobotik befindet sich trotz erheblicher Fortschritte weiterhin in einem frühen FuE-Stadium. Viele der anvisierten Anwendungen, etwa für gezielte Wirkstofffreisetzung, Tumortherapie oder minimalinvasive Eingriffe, werden voraussichtlich erst mittel- bis langfristig klinisch einsetzbar sein. Ein TA-Kompakt könnte dazu beitragen, FuE-Bedarfe dezidierter zu identifizieren und die Voraussetzungen für eine sichere, wirksame und gesellschaftlich akzeptierte Einführung medizinischer Mikroroboter zu schaffen. Anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele könnten der Entwicklungsstand, die technologische Reife sowie die Herausforderungen der klinischen Translation dargestellt werden. Besondere Aufmerksamkeit sollte auf technische und sicherheitsbezogene Fragestellungen in den Kontexten Biokompatibilität, sichere Steuerung und Navigation im Körper sowie Strategien für biologische Abbaubarkeit oder des aktiven Rücktransports der Mikroroboter gelegt werden. Zudem sollten regulatorische Herausforderungen untersucht werden. Dabei wäre zu prüfen, inwieweit das bestehende Medizinprodukte- und gegebenenfalls auch das Arzneimittelrecht für mikrorobotische Systeme geeignet ist oder ob spezifische Anforderungen für Sicherheits- und Wirksamkeitsbewertung, Zulassung, Qualitätskontrolle und Marktüberwachung erforderlich werden. Ergänzend könnten gesellschaftliche und gesundheitspolitische Aspekte betrachtet werden, etwa Fragen zur Akzeptanz sowie Anforderungen an transparente Kommunikation und Technologiegestaltung.

Literatur

- Becker, H. (2018): Robotik in der Gesundheitsversorgung: Hoffnungen, Befürchtungen und Akzeptanz aus Sicht der Nutzerinnen und Nutzer. In: Bendel, O. (Hg.): Pflegeroboter. Wiesbaden, S. 229–248, https://doi.org/10.1007/978-3-658-22698-5_13

- Feynman, R. P. (1992): Theres plenty of room at the bottom. In: Journal of Microelectromechanical Systems 1(1), S. 60–66, https://doi.org/10.1109/84.128057
- Gao, W. et al. (2015): Artificial micromotors in the mouse's stomach: a step toward in vivo use of synthetic motors. In: ACS Nano 9(1), S. 117–123, https://doi.org/10.1021/nn507097k
- Hörndlein, J. (2025a): Medizintechnik: Roboter im Blut. VDE dialog, https://dialog.vde.com/de/vde-dialog-ausgaben/2025-01-roboter/2025-01-nanoroboter (24.6.2026)
- Hörndlein, J. (2025b): Mikro- und Nanorobotik im Körper: Gezielter behandeln. VDE dialog, https://dialog.vde.com/de/vde-dialog-ausgaben/2025-01-roboter/2025-01-interview-bakenecker (24.6.2026)
- Iacovacci, V. et al. (2024): Medical Microrobots. In: Annual review of biomedical engineering 26(1), S. 561–591, https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-081523-033131
- Intel Market Research (2026): Europe Micro Robots Market Growth. Analysis, Dynamics, Key Players and Innovations, Outlook and Forecast 2026-2034. https://www.intelmarketresearch.com/europe-micro-robots-market-market-45476 (24.6.2026)
- Ju, X. et al. (2025): Technology Roadmap of Micro/Nanorobots. In: ACS Nano 19(27), S. 24174–24334, https://doi.org/10.1021/acsnano.5c03911
- Landers, F. C. et al. (2025): Clinically ready magnetic microrobots for targeted therapies. In: Science 390(6774), S. 710–715, https://doi.org/10.1126/science.adx1708
- Lee, J. G. et al. (2023): Microrobots for Biomedicine: Unsolved Challenges and Opportunities for Translation. In: ACS Nano 17(15), S. 14196–14204, https://doi.org/10.1021/acsnano.3c03723
- Nelson, B. J. et al. (2010): Microrobots for minimally invasive medicine. In: Annual review of biomedical engineering 12, S. 55–85, https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-010510-103409
- Probity Market Insights (o. J.): Microbots Market Research Report. Size, Share, Trends, Growth Analysis (2025-2033). Januar 2026, https://www.probitymarketinsights.com/reports/microbots-market (24.6.2026)
- Schmid, F. (2026): Mikroroboter reparieren Rückenmark. ETH Zürich, https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2026/06/mikroroboter-reparieren-ruecken mark.html (24.6.2026)
- Schürle-Finke, S. (2025): Mikroroboter als winzige Helfer im Körper. ETH Zürich, YouTube, https://www.youtube.com/watch?v=wI2ZPkCQ_oY (24.6.2026)
- SPECTARIS (2025): Robotics in healthcare – Application examples, trends and potential. SPECTARIS – German Industry Association for Optics, Photonics, Analytical and Medical Technologies e. V., Messe Düsseldorf GmbH, Berlin/Düsseldorf
- WiseGuy Reports (2026): Global Medical Micro Robots Market Research Report. https://www.wiseguyreports.com/reports/medical-micro-robots-market (24.6.2026)
- Ye, H. et al. (2026): Magnetoelectric microrobots for spinal cord injury regeneration. In: Nature materials 25, S. 1458–1469, https://doi.org/10.1038/s41563-026-02625-3

Herausgeber
Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag (TAB)

Bildnachweis
Mohammed Haneefa Nizamudeen/iStock (S. 1);
SeventyFour/iStock (S. 3); Yuuji/iStock (S. 5)

KI-Hinweis
Zur Erstellung von Zusammenfassungen wissenschaftlicher Publikationen wurde AitisiGPT eingesetzt, für Recherchen ChatGPT. Die Nutzung erfolgte im Rahmen der TAB-Leitlinien für generative KI. Die endgültige Verantwortung für die inhaltliche Richtigkeit, die kritische Reflexion und die Interpretation der Ergebnisse liegt beim Autor.

ISSN: 2629-2874
DOI: 10.5445/IR/1000198764

Horizon SCANNING

Das Horizon-Scanning ist Teil der Foresight-Aktivitäten des TAB und wird vom Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH durchgeführt.
www.tab-beim-bundestag.de/horizon-scanning