|  |
| --- |
| IU |
| Softrobotik |
| DLBROESR02\_E  Dr. Jamshed Iqbal  Wenn Sie keine Namensnennung wünschen, geben Sie dies bitte unten an:  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |

# Übergeordnete Lernziele

Dieses Studienskript behandelt die grundlegenden Konzepten des noch jungen Feldes der Softrobotik, einschließlich der Analyse und Modellierung von Softrobotern. Ziel ist es, die Studierenden in ein relativ neues Gebiet der Robotik einzuführen, indem ein breites Spektrum an Wissen vermittelt wird, das von den theoretischen Grundlagen der Softrobotik bis hin zu ihren aktuellen realen Anwendungen reicht.

Der erste Teil von **Softrobotik** befasst sich mit Aktoren und Sensoren für Softroboter. Verschiedene Materialien und Technologien zur Verformung dieser Roboter werden diskutiert. Anschließend werden Modellierungstechniken und Steuerungsstrategien für Softroboter besprochen.

Der abschließende Teil des Kurses bietet einen Überblick über einige der Anwendungsbereiche von Softrobotern in verschiedenen aufstrebenden Bereichen, einschließlich biomedizinischer, Unterwasser-, Luft- und chemischer Anwendungen. Nach erfolgreichem Abschluss des Kurses sollten die Studierenden in der Lage sein, zu erkennen, wo Softroboter eine bessere Lösung bieten als konventionelle Roboter mit starren Gliedern, gängige Softroboter-Strukturen zu analysieren und die beste Wahl der Softroboter-Technologie für eine bestimmte Anwendung zu beurteilen.

# Lektion 1 – Einführung

**Lernziele**

Nach der Bearbeitung dieser Lektion …

… kennen Sie die Unterschiede zwischen starren und Softrobotern.

… können Sie die Herausforderungen bei der Entwicklung, der Steuerung und dem Einsatz von Softrobotern benennen.

… kennen Sie die neuesten Trends in der Forschung und Entwicklung der Softrobotik.

… wissen Sie über den breiteren Anwendungskontext der Softrobotik Bescheid.

# 1. Einführung

## Einführung

Die Robotik hat sich rasant entwickelt und eine Vielzahl von Anwendungen hervorgebracht, bei denen Roboter die Technologie verändert oder traditionelle Prozesse umgestaltet haben. Dies ist dank innovativer und neuartiger Roboter möglich geworden.

## 1.1 Softroboter

In der Regel wird ein Roboter aus einem starren Material gefertigt, das nur wenig oder gar nicht nachgibt. Aufgrund ihrer robusten Bauweise (normalerweise aus Stahl oder Gusseisen) eignen sich diese Roboter gut für schwere Arbeiten. Im Gegensatz dazu hat die Robotik-Forschungsgemeinschaft in jüngster Zeit die Verwendung weicher, von der Natur inspirierter Materialien für die Entwicklung integrierter Roboter erforscht. Das Hauptziel dieser Bemühungen ist die Nutzung der Robustheit und Vielseitigkeit biologischer Organismen und die Ermöglichung sicherer Interaktionen zwischen Mensch und Maschine.

Wissenschaftler:innen und Robotiker:innen haben nützliche Informationen aus natürlichen Mechanismen extrahiert, um die nächste Generation der Robotik zu entwickeln – die **Softrobotik**. Abgesehen von Knochen und Zähnen lässt sich aus den Beobachtungen an Muskeln und Knorpeln schließen, dass die Natur flexible und weiche Materialien bevorzugt. Der Begriff „Weichheit“ umfasst die Nachgiebigkeit in Bezug auf das Material sowie die Struktur des Roboters selbst (Wang et al., 2017).

**Softrobotik**

Dies ist ein neuer Bereich der Robotik, der sich mit neuen Lösungen für die Interaktion mit der Umwelt befasst und dabei die inhärente und/oder strukturelle Nachgiebigkeit nutzt.

Softroboter erweitern die Gestaltungsmöglichkeiten konventioneller Roboter in einem angewandten Kontext. Softroboter sind eine naheliegende Wahl für eine Vielzahl von Anwendungen, bei denen kollaborative Roboter oder Industrieroboter nicht sicher eingesetzt werden können. Die folgende Abbildung zeigt einen konventionellen Robotermanipulator mit starren Gliedern und einen Softroboter. Der Manipulator ist ein vertikal gelenkiger anthropomorpher Roboter, der hier mit der zugehörigen Elektronik, den Aktoren (Gleichstrommotoren) und den Sensoren (Motordrehgeber, Kraftmesswiderstand und Kamera) dargestellt ist.

|  |
| --- |
| Ein Bild, das Text, Im Haus, Screenshot, Gerät enthält.  Automatisch generierte Beschreibung |
| (a) |
| https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Soft_Robotics.png |
| (b) |
| Abbildung: Roboter (a) Konventionell starr (b) Soft |

Quelle:

a) Manzoor et al. (2014). Mit Genehmigung verwendet.

b) Oregon State University (2023). CC BY SA 2.0.

Während herkömmliche Roboter starre Komponenten (Sensoren, Aktoren, Drehmoment-/Kraftübertragungsmechanismen usw.) verwenden, kommen bei Softrobotern biegsame und nachgiebige Materialien, Oberflächen und Strukturen zum Einsatz. Zu diesen Materialien gehören unter anderem Silikon, Polymere, Elastomere, intelligente Materialien, Gele und Formgedächtnislegierungen (engl. Shape-Memory Alloy, SMA). Vier gängige Arten von Softrobotern sind kollaborative Roboter (auch Cobots genannt), Soft-Greifer, Exoskelette und aufgeblasene Roboter. Die biologischen Organismen mit dem Potenzial, die Softrobotik-Forschung zu inspirieren, sind vielfältig, wie die folgende Abbildung zeigt.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 187,854 Business Silhouette Illustrations & Clip Art - iStock | Free vector graphics of Animal | List of Mammals: Useful Mammal Names with Pictures 2 | List of Mammals: Useful Mammal Names with Pictures 6 | | | | List of Mammals: Useful Mammal Names with Pictures 3 |
| List of Mammals: Useful Mammal Names with Pictures 10 | Cartoon Squirrel Images | Free Vectors, Stock Photos & PSD | | | | Free vector graphics of Deer |
| Menschen | Fische | Säugetiere | | | | | |
| Free vector graphics of Caterpillar | Free vector graphics of Frog | Free vector graphics of Animal | | | Free vector graphics of Crocodile | | Free vector graphics of Head |
| Free vector graphics of Animals | | | Free vector graphics of Dinosaur | | Free vector graphics of Turtle |
| Raupen | Amphibien | Reptilien | | | | | |
| Free vector graphics of Octopus | Free vector graphics of Tree | Free vector graphics of Bird | | Free vector graphics of Bird | | Free vector graphics of Bird | |
| Free vector graphics of Bird | | Free vector graphics of Bird | | Free vector graphics of Bird | |
| Oktopusse | Pflanzenwurzeln | Vögel | | | | | |

Abbildung: Einige repräsentative biologisch inspirierte Beispiele.

Quelle: Jamshed Iqbal (2023).

Die entscheidende Eigenschaft hinter dem enormen Potenzial von Softrobotern ist die **Nachgiebigkeitsabstimmung**, die eine gleichmäßige Verteilung der inneren Lasten gewährleistet und die Konzentrationen der einwirkenden Kräfte minimiert (Majidi, 2014). Die mechanische Starrheit oder Steifigkeit eines festen Körpers wird durch den Elastizitätsmodul (E) gemessen. Um eine Vorstellung von den Zahlen zu bekommen: Stahl hat einen Modul von , während Muskelgewebe einen Modul von hat. Der bedeutende Unterschied zwischen dem Modul von Stahl und Gewebe deutet darauf hin, dass sie nicht zueinander passen. Es ist somit intuitiv, dass herkömmliche starre Roboter nicht anpassungsfähig sind und bei Mensch-Roboter-Interaktionen eine Gefahr darstellen können. Im Gegensatz dazu bieten Softroboter aufgrund ihrer Nachgiebigkeitsabstimmung wesentlich sicherere Interaktionen. Softroboter verwenden Materialien in einem ähnlichen Steifigkeitsbereich wie Muskelgewebe oder biologische Haut. Die folgende Tabelle stellt einen intuitiven Vergleich zwischen Softrobotern und ihrem konventionellen Gegenstück dar.

**Nachgiebigkeitsabstimmung**

Hierbei handelt es sich um ein Verfahren, mit dem sichergestellt wird, dass Werkstoffe, die miteinander in Berührung kommen, die gleiche mechanische Steifigkeit aufweisen.

Tabelle: Parametrischer Vergleich von konventionellen Robotern aus starren Materialien und Softrobotern. Quelle: Jamshed Iqbal (2023).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Konventionelle Roboter | Softroboter |
| Außergewöhnliche Flexibilität |  | Free vector graphics of Check mark |
| Hohe Vielseitigkeit |  | Free vector graphics of Check mark |
| Sicherere Mensch-Roboter-Interaktion |  | Free vector graphics of Check mark |
| Geringe Kosten |  | Free vector graphics of Check mark |
| Einfacher Aufbau |  | Free vector graphics of Check mark |
| Anpassungsfähigkeit an tragbare Geräte |  | Free vector graphics of Check mark |
| Erfordert einen einfachen Schutz-/Stabilitätskontrollalgorithmus |  | Free vector graphics of Check mark |
| Entwickelt für den Einsatz in unstrukturierten Umgebungen |  | Free vector graphics of Check mark |
| Nachgiebigkeitsabstimmung |  | Free vector graphics of Check mark |
| Hohe Festigkeit: Fähigkeit, schweren Lasten standzuhalten | Free vector graphics of Check mark |  |
| Leichtigkeit und Einfachheit bei der genauen Modellierung | Free vector graphics of Check mark |  |
| Präzise Steuerung | Free vector graphics of Check mark |  |

Die Softrobotik ist ein sehr interdisziplinär geprägtes Gebiet, das verschiedene Bereiche der Technik und der Wissenschaft umfasst, wie die folgende Abbildung zeigt. Diese neue Generation von Robotern birgt ein enormes Potenzial für Anwendungen in unübersichtlichen, unsicheren und dynamischen Umgebungen, für das Greifen und Manipulieren von Objekten mit komplexen Strukturen, für die Navigation auf unebenen Oberflächen und für die Interaktion mit Menschen in Situationen mit ernsthaften Sicherheitsbedenken.

Ein Bild, das Diagramm, Text enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung: Die Softrobotik umfasst eine Vielzahl von Bereichen aus Wissenschaft und Technik.

Quelle: Jamshed Iqbal (2023).

## Fragen zur Selbstkontrolle

1. Bitte nennen Sie drei mögliche Vorteile von Softrobotern.

* *Sicherheit*
* *Flexibilität und Anpassungsfähigkeit*
* *Einfacher Aufbau*
* *Geringe Kosten*

## 1.2 Herausforderungen

Softroboter erledigen Aufgaben, die eine sichere Interaktion, anspruchsvolle Navigation und komplexe Manipulation erfordern, mit einem im Vergleich zu starren Robotern geringeren Aufwand an Rechenleistung, Sensorik und Aktorik. Da das Gebiet der Softrobotik noch in den Kinderschuhen steckt, untersucht die Robotik-Gemeinschaft verschiedene Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit der Modellierung, dem Entwurf, der Steuerung und der Herstellung von Softrobotik-Systemen. Diese Ansätze eröffnen völlig neue Gestaltungsspielräume und ermöglichen neue Ideen rund um Robotersysteme, um die mit Softrobotern verbundenen Herausforderungen zu meistern. Die wichtigsten Herausforderungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

Ein Bild, das Diagramm enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung: Die wichtigsten Herausforderungen im Zusammenhang mit der Softrobotik

Quelle: Jamshed Iqbal (2023).

### Materialien

Die Vorteile, die Softroboter aufgrund ihres flexiblen Materials bieten, bringen auch einige Herausforderungen mit sich. Diese Roboter interagieren mit ihrer Umgebung und reagieren auf ihre Lasten auf der Grundlage der inhärenten Materialeigenschaften, anstatt vollständig auf sensorische Eingaben zu reagieren. So können unerwünschte Verformungen oder unvorhergesehene Reaktionen (z. B. Durchhängen) beobachtet werden. Ein Umdenken in Richtung menschenfreundlicher Materialien und innovativer Fertigungstechnologien kann neue Wege in der Softrobotik-Forschung eröffnen und die Körperverträglichkeit und Funktionalität des Systems sicherstellen. Die größte Herausforderung ist die Nachgiebigkeitsabstimmung mit biologischen Strukturen. Zu diesem Zweck werden neue Materialien und Kombinationen verschiedener bestehender Materialien untersucht. Die Richtlinien für die Nachgiebigkeitsabstimmung mit menschlichen Muskelfasern, wie sie in Mirfakhrai et al. (2007) dargelegt wird, enthalten die folgenden Parameterwerte:

* Dehnung > 40 %
* Maximale Dehnungsrate von 500 %/s
* Körper hält einer Belastung von bis zu 0,35 MPa stand
* Elastizitätsmodul von 10-60 MPa
* Energiedichte von 8 kJ/m3

Einige dieser Eigenschaften werden zwar von bestehenden Materialien erfüllt, aber es gibt derzeit kein Material, das alle diese Anforderungen erfüllen kann. Die Herausforderungen beim Einsatz von Werkstoffen in der Biomedizin liegen in der Identifizierung und Integration neuer intelligenter und weicher Werkstoffe, die Biomimikry, Biokompatibilität und einstellbare Steifigkeit bieten.

### Modellierung

Konventionelle Roboter, die aus starren Materialien bestehen, werden aus Gründen der Einfachheit, Leichtigkeit und Genauigkeit bei der Modellierung in der Regel als diskrete Gelenke modelliert. Aufgrund der Verwendung flexibler Materialien, die eine kontinuierliche Verformung ermöglichen, stellen Softroboter jedoch eine Herausforderung für die genaue Modellierung ihres mechanischen Verhaltens dar. Das Design von Softrobotern erfordert die Ableitung und Entwicklung genauer und robuster numerischer Modelle. Diese Modelle müssen in der Lage sein, die Mechanik des Roboters adäquat darzustellen und Verhaltenssimulationen, rigorose Analysen und Designoptimierungen zu ermöglichen.

### Antrieb

Die Verwendung flexibler und intelligenter Materialien bei der Konstruktion von Softrobotern bringt inhärente Einschränkungen mit sich, wie z. B. relativ geringe Ausgangskräfte/-drehmomente und niedrige Antriebsgeschwindigkeiten. Die Natur bietet verschiedene Beispiele für flexible Organismen, die mechanische Instabilitäten ausnutzen, um Energie zu speichern und dann schlagartig freizusetzen. Inspiriert von der Natur hat die Forschungsgemeinschaft kürzlich Techniken zur Überwindung der Einschränkungen von Softrobotern vorgeschlagen, die auf mechanischen Instabilitäten beruhen (Pal et al., 2021). Bei diesen Instabilitäten handelt es sich um schnelle Übergänge von strukturell stabilen Zuständen zur Verstärkung der Ausgangsleistung bei hohen Antriebsgeschwindigkeiten (Pal et al., 2021).

Im biomedizinischen Bereich stellen Rehabilitations- und Bewegungshilfen die gleichen Herausforderungen dar (d. h. die Bereitstellung der erforderlichen Kraft, um die Masse der Gliedmaßen zu bewegen). Daher wird von robotikbasierten Systemen in der Regel die Unterstützung der Muskeln erwartet. Für Patient:innen, die sich z. B. von einer motorischen Beeinträchtigung oder einer schmerzhaften Operation erholen, ist das ein Segen. Für die Regeneration von Muskeln und Weichgewebe ist die Technologie derzeit noch nicht geeignet. Die meisten existierenden Softrobotermusklen sind für diese Bedingungen nicht geeignet, da sie sperrige Aktoren mit externen Pumpen benötigen. Darüber hinaus können die Anwendungen, die einen langfristigen Einsatz von Softrobotern im menschlichen Körper umfassen, Immunreaktionen auslösen. Diese Herausforderung unterstreicht die Notwendigkeit, dass das Antriebsmaterial die mechanischen Eigenschaften von lebendem Gewebe angemessen berücksichtigt.

### Elektronik und Steuerung

Die heutige submikrometrische Elektronik wird aus starren Materialien hergestellt, die sich gut für konventionelle starre Roboter eignen. Sie ist jedoch nicht anpassungsfähig und schränkt daher die Bewegung und Autonomie von Softrobotern ein. In Zukunft könnte die Mikroelektronik aus weichen und flexiblen Materialien bestehen. Bis dahin werden weiche Aktoren jedoch weiterhin von starren Mikrocontrollern oder Mikroprozessoren gesteuert. Angesichts dieser Herausforderung können Softroboter autonom werden, indem sie ihre eigene (starre) Ausrüstung tragen. Diese Hybridroboter sind in hohem Maße in der Lage, ihr Potenzial in Anwendungskontexten zu demonstrieren, was weder mit „weichen“ Komponenten noch mit „Hardware“ allein möglich ist.

Bei den meisten Anwendungen, einschließlich der Prothetik, besteht die größte Herausforderung in der präzisen Verteilung der notwendigen Nachgiebigkeit. Außerdem gestaltet sich die Steuerung von Softrobotern aufgrund ihrer unendlich vielen Freiheitsgrade komplex und schwierig. Diese Herausforderungen erfordern die Erforschung innovativer mechatronischer Technologien und eine Neubetrachtung des Designs von Softrobotern in Bezug auf Steuerung, Sensorik und Datenverarbeitung.

### Fragen zur Selbstkontrolle

1. Aus welchem der folgenden Elemente kann ein Softroboter bestehen? Bitte markieren Sie die richtige(n) Aussage(n).

* *Gel*
* 3D-gedruckter weicher Kunststoff
* Flüssigkeiten
* Elastomere
* Metall

## 1.3 Trends

Interessanterweise begannen die Fortschritte im Bereich der Softroboter lange bevor der Begriff „Softrobotik“ selbst in der wissenschaftlichen Gemeinschaft aufkam. Es ist zwar nützlich, die Geschichte der Softrobotik zu kennen, aber das Zukunftspotenzial dieses Bereichs wird durch die in diesem Abschnitt beschriebenen finanziellen und technologischen Trends deutlich.

### Geschichte

Die Geschichte der Softrobotik reicht bis in die 1950er Jahre zurück, als druckbasierte Extensionsgeräte (insbesondere die künstlichen Muskeln von McKibben) entwickelt wurden. Die folgende Tabelle fasst die Geschichte der Disziplin zusammen und nennt bemerkenswerte Arbeiten.

Tabelle: Kurze Geschichte der Softrobotik.

Quelle: Jamshed Iqbal (2023).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Jahr | Entwicklung | Anmerkungen |
| 1950er | Die Forschung im Bereich der Softrobotik nahm ihren Anfang. | Pneumatische künstliche Muskeln wurden für künstliche Gliedmaßen entwickelt. |
| 1970er | Das Konzept der Roboter aus weichen Materialien wurde eingeführt. | Es wurden Robotergreifer auf der Basis von körnigen Materialien vorgeschlagen. |
| 1980er | Die Idee der pneumatischen künstlichen Muskeln wurde kommerzialisiert. | Das japanische Unternehmen „Bridgestone Rubber“ nutze dazu die Marke *Rubbertuators*. |
| 1980-90er | Diverse weiche Materialien wurden in der Robotik verwendet. | Dazu gehören Flüssigkeiten, Elastomere und Gele. |
| 2008 | Der Begriff „Softrobotik“ wurde eingeführt. | Der Begriff entstand im Zusammenhang mit der Forschung über nachgiebige Gelenke. |
| 2010er | Mehrere biologisch inspirierte Softroboter wurden vorgeschlagen. | Ziel war es, die Vorteile von Weichheit und Flexibilität zu erforschen und von der Natur zu lernen, um Anpassungsfähigkeit zu erreichen. |
| 2011 | Der erste Softroboter wurde in Harvard entwickelt. | Das erste Beispiel für ein nützliches weiches Gerät war ein fünfeckiger Greifer (Whitesides, 2018). |
| 2015 | Die Softrobotik wurde in Harvard für die Entwicklung eines Geräts zur direkten Herzkompression eingesetzt, wie in (Roche et al., 2015) berichtet. | Die weichen Aktoren basierten auf einer elastomeren Flüssigkeit. Das Gerät war für die Behandlung von Herzinsuffizienz durch direkte mechanische Unterstützung gedacht. |
| 2016 | Der erste autonome, vollständig weiche Softroboter wurde in Harvard entwickelt. | Der 3D-gedruckte Roboter „Octobot“ wurde vom Oktopus inspiriert und wurde durch Mikrofluide gesteuert. Er wurde durch eine chemische Reaktion angetrieben und besaß keine Elektronik. |
| 2016 | Über das erste weiche Exoskelett für die unteren Extremitäten wurde berichtet in (Panizzolo et al., 2016). | Der leichte Roboter-„Exosuit“ verwendete „weiche Kleidung“ ohne starre Elemente und bot dem Träger uneingeschränkte Bewegungsfreiheit. |
| 2016 | Ein Hybridroboter, der sowohl weiche als auch starre Komponenten verwendet, wurde in (Sfakiotakis et al., 2016) vorgestellt. | Der Roboter „Squidbot“ ermöglicht die Erkundung der Tiefsee, indem er sich wie ein lebendes Unterwasserwesen mit Wasserdüsen fortbewegt. |

### Finanzielle Trends

Es wird erwartet, dass die Softrobotik in den 2020er Jahren für Gesellschaft und Industrie von großem Nutzen sein wird, da sie gegenüber der konventionellen Robotik erhebliche Vorteile bietet. Im Jahr 2021 belief sich der weltweite Markt in diesem Bereich auf 554 Mio. $, und es wird erwartet, dass dieser Wert bis 2030 auf 4.805 Mio. $ ansteigen wird (Straits Research Report, 2022). Für den Zeitraum 2020-30 wird eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (CAGR) von ca. 31 % erwartet, wobei Europa der am schnellsten wachsende Markt sein wird (Straits Research Report, 2022). Das Marktwachstum in diesem Bereich wird voraussichtlich weiterhin von medizinischen und chirurgischen Anwendungen getrieben. Dieser Trend wurde durch die jüngste Coronapandemie noch verstärkt, die die dringende Notwendigkeit aufzeigte, medizinische Verfahren und Praktiken im Gesundheitswesen mit minimalem menschlichem Eingreifen durchzuführen, um das Risiko der Übertragung von Infektionskrankheiten auf das medizinische Personal zu verringern.

Die wichtigsten Akteure auf dem Weltmarkt, die eine Schlüsselrolle bei der zukünftigen Entwicklung der Softrobotik spielen werden, sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Bitte beachten Sie, dass diese Liste nicht vollständig ist.

Tabelle: Eine Liste der wichtigsten Akteure auf dem Markt für Softrobotik in alphabetischer Reihenfolge

Quelle: Jamshed Iqbal (2023).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Unternehmen | Land |  |
| AUBO Robotics Inc. | China |  |
| Bioservo Technologies AB | Schweden |  |
| Ekso Bionics Holdings, Inc. | USA |  |
| Kuka AG | Deutschland |  |
| Rethink Robotics GmbH | Deutschland |  |
| ReWalk Robotics Ltd. | Israel |  |
| RightHand Robotics, Inc. | USA |  |
| Roam Robotics | USA |  |
| Soft Robotics Inc. | USA |  |
| Universal Robots A/S | Dänemark |  |
| Yaskawa Electric Corporation | Japan |  |

### Technologietrends

Die Robotik-Gemeinschaft macht Science-Fiction zur Realität. Die Softrobotik ist nach wie vor ein aufstrebendes Gebiet, in dem Konzepte kontinuierlich von der Theorie in die Praxis überführt werden. Obwohl bereits enorme Fortschritte erzielt wurden, müssen noch einige Herausforderungen bewältigt werden, um das volle Potenzial der Softrobotik auszuschöpfen. Einige der wichtigsten Trends, die sich aus der Marktdynamik ergeben, sind im Folgenden aufgeführt.

**Treibende Faktoren**

Die drei wichtigsten treibenden Faktoren für die Softrobotik sind der zunehmende Trend zur Einführung sicherer Roboter in der Medizin und im Gesundheitswesen, die steigende Nachfrage nach Automatisierung in der Lebensmittelverarbeitung und Durchbrüche in der Robotikindustrie.

Im letzten Jahrzehnt wurden verschiedene künstliche Softroboterhände entwickelt. Allerdings wurden nur wenige dieser Hände effektiv zur Rehabilitation oder zur Bewegungsunterstützung eingesetzt. Darüber hinaus ist die Entwicklung von Softrobotern zum Greifen und Manipulieren von Objekten auch für nichtmedizinische Bereiche von Bedeutung, zum Beispiel für die Lebensmittelindustrie. Es ist nicht übertrieben futuristisch (oder optimistisch), sich eine Softroboterhand vorzustellen, die in der Lage ist, ein Objekt zu erkennen und dann dessen Form anzunehmen, indem sie Textur und Geometrie entsprechend anpasst. Darüber hinaus werden tragbare Softrobotik-Geräte und Assistenzsysteme benötigt, die einen sanften, sicheren und effektiven Kontakt bei der Interaktion mit menschlichen Körperteilen gewährleisten.

**Design-Trends**

Softroboter werden in der Regel durch pneumatische Aktoren angetrieben, die mit lauten Kompressoren und harten Ventilen arbeiten. Im Gegensatz dazu imitieren künstliche Muskeln durch ihre Ähnlichkeit mit natürlichen Muskeln die natürliche Beweglichkeit und Geschicklichkeit. Im medizinischen Bereich werden neuartige künstliche Muskeln für Patient:innen entwickelt, die an Ptose, Gesichtslähmung und neurologischen Greifstörungen leiden. Ein weiteres aktives Forschungsgebiet im medizinischen Bereich ist die Elektroadhäsion und elektroaktive Polymere. Form- und Texturänderungen durch elektroaktive Polymere sind ein weiterer wichtiger Trend, der erforscht werden kann, um Häute zu schaffen, die Druck und Berührung wahrnehmen können. Diese Eigenschaft hat Potenzial für tragbare Systeme, da sie aufgrund des geringen Hautwiderstands Komfort und funktionelle Einfachheit bietet.

Die Entdeckung mikroskopisch kleiner Aktoren wird voraussichtlich den Einsatz von Softrobotern in der Industrie vorantreiben. Diese sind dem menschlichen Körper nachempfunden, in dem die Muskelfasern mit mehreren Freiheitsgraden aktiviert werden. Die bereits existierenden Softrobotersysteme sind volumetrisch und schwer und haben für jeden Freiheitsgrad einen Aktor.

Darüber hinaus werden derzeit neuartige Materialien und hochmoderne Betätigungs- und Sensormechanismen erforscht, um Tragbarkeit, Biomimikry, Biokompatibilität und Funktionalität zu erreichen. Der Grundgedanke hinter Simulatoren von Körperteilen und künstlichen Organen ist die Nachahmung von menschlichem Gewebe in Bezug auf Bewegung, Eigenschaften und Funktion. Mit künstlichen Organen arbeiten die Forscher:innen daran, das Problem der Wärmeentwicklung und der Abgasemissionen zu bewältigen. Ein künftiger Fortschritt könnte darin bestehen, eine Kombination von Materialien für chirurgische Instrumente und Implantate zu verwenden und gleichzeitig die Entwicklungen im Bereich des Tissue Engineering (Gewebezüchtung) zu nutzen. Darüber hinaus erfordert der weltweite Trend zu patientenindividuellen medizinischen Lösungen eine tiefgreifende Revolution im Design medizinischer Instrumente.

Die derzeitigen Technologien stellen die Systementwickler:innen vor die Herausforderung, einen Kompromiss zwischen Flexibilität (durch weiche Komponenten) und Festigkeit (durch starre Materialien) zu finden. Angesichts der Vor- und Nachteile starrer und flexibler Werkstoffe besteht ein neuer Trend in der Erforschung neuartiger Hybridkonstruktionen, um die Vorteile beider Werkstoffarten zu nutzen. Hybrid-Designs können starre Komponenten, wie Glieder, und steife Komponenten, wie Federn, enthalten. Die nachstehende Abbildung zeigt ein Beispiel, bei dem zwei Federn verwendet wurden, um die Nachgiebigkeit der Verbindung zu gewährleisten.

Die Integration von Komponenten mit variabler Steifigkeit in das Design von Roboterlösungen könnte sich als eine vorteilhafte Strategie erweisen. Eine weitere mögliche Lösung ist die Verschmelzung von Softrobotik-Komponenten mit konventioneller Robotik, um eine optimale Zusammenarbeit zu erzielen. Es wird erwartet, dass die Fortschritte auf dem Gebiet der Symbiose von Robotern in naher Zukunft zu bahnbrechenden Anwendungen von Softrobotern führen werden, insbesondere bei der Behandlung von Verletzungen und in Notsituationen wie Überschwemmungen, Erdbeben und Bränden.

|  |
| --- |
|  |
| (a) |
|  |
| (b) |
| Abbildung: Ein Robotermanipulator mit flexiblen Gelenken (a) CAD-Modell (b) Gefertigter Prototyp |

Quelle: Alam et al. (2018). Mit Genehmigung verwendet.

**Herstellung**

Softroboter arbeiten in einer Vielzahl von Umgebungen und unter verschiedenen Arbeitsbedingungen und werden daher mit unterschiedlichen Techniken hergestellt. Dank der additiven Fertigungstechnologie können Softroboter heute problemlos aus verschiedenen Materialien entworfen, geformt und hergestellt werden.

Der Trend geht zu leichteren und kleineren Softrobotern, da die Energiequelle im Vordergrund steht. Typischerweise werden Softroboter mit Batterien betrieben. Ein zukünftiges Bio-Hybrid-Material oder eine mikroskopische Energiequelle könnte jedoch die biologische Nachgiebigkeit verbessern und dazu beitragen, einen leichteren Softroboter zu schaffen.

### Kooperationen

Die Softrobotik steckt noch in den Kinderschuhen. Einige bemerkenswerte Projekte wurden in Japan, den Vereinigten Staaten, der Schweiz und Italien initiiert. Auch in Deutschland haben Forschende einige Soft-Technologien erfolgreich in ersten Anwendungen eingesetzt. Da es sich um ein äußerst multidisziplinäres Fachgebiet handelt, werden Fortschritte in verwandten Bereichen wie weiche Materie, Computerintelligenz, Biomechanik und Biomimetik (unter anderen) gemeinsam erforscht. Darüber hinaus haben industrielle Akteure in jüngster Zeit ein bemerkenswertes Interesse an der Erforschung, Entwicklung und Kommerzialisierung von Softrobotern in einem angewandten Kontext gezeigt.

Die Entwicklungen und Fortschritte auf diesem Gebiet erfordern eine enge Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren, Werkstoffspezialisten, Biologen, Chemikern, Medizinern, Physikern und Mathematikern, um neue Ideen in reale Anwendungen umzusetzen. Ein gemeinsames internationales Forum und die Standardisierung in der Softrobotik werden sicherlich zur Förderung dieser Fortschritte beitragen, indem die damit verbundenen Herausforderungen angegangen und die potenziellen Vorteile dieses Gebiets genutzt werden. Diese Zusammenarbeit und Standardisierung wird auch dazu beitragen, die Verzögerungen bei der Kommerzialisierung der Softrobotik weitgehend abzumildern.

### Fragen zur Selbstkontrolle

1. Bitte nennen Sie drei technologische Trends in der Entwicklung der Softrobotik.

* *Erforschung neuer hybrider Designs*
* *Entwicklung leichterer und kleinerer Softroboter*
* *Nutzung modernster Betätigungs- und Sensormechanismen*
* *Nachahmung menschlicher Muskeln*
* *Additive Fertigung zur Herstellung von Softrobotern*

## 1.4 Anwendungen

Soft-Technologien und integrierte Lösungen bieten lukrative Wachstumschancen für verschiedene Märkte. Die weiche und flexible Beschaffenheit von Softrobotern wird voraussichtlich deren Einsatz in einer Vielzahl von Manipulations-, Bewegungs- und Erkundungsaktivitäten sowie in der Mensch-Maschine-Interaktion fördern. Aufgrund ihrer Nachgiebigkeit, Biokompatibilität, Anpassungsfähigkeit und ihres Komforts eignen sie sich hervorragend für zukünftige wissenschaftliche, soziale und industrielle Anwendungen, wo sie das Potenzial haben, die bestehende Robotertechnologie zu revolutionieren. Zu diesen Anwendungen gehören das Gesundheitswesen, die moderne Fertigung, die Logistik, sowie die Automobil- und die Lebensmittelindustrie.



Abbildung: Bedeutende Anwendungen der Softrobotik

Quelle: Jamshed Iqbal (2023).

### Gesundheitswesen

Die Forschung und Entwicklung im Bereich der Softrobotik wurde in erster Linie vom Gesundheitssektor vorangetrieben und dieser Trend wird sich voraussichtlich auch im nächsten Jahrzehnt fortsetzen. Softroboter vereinen eine kompakte Bauweise mit niedrigen Kosten. Noch wichtiger ist jedoch, dass diese Roboter in der Lage sind, effiziente Verfahren durchzuführen und gleichzeitig eine sichere Umgebung für Patient:innen und Pflegepersonal zu gewährleisten. Ein weiterer Grund für die breite Adaption der Softrobotik im Gesundheitswesen ist der immense Bedarf an rigorosem, aufgabenspezifischem Training anstelle von konventionellen Ansätzen. Die obige Abbildung veranschaulicht die vielfältigen Anwendungen von Softrobotern im Gesundheitswesen.

Roboter werden heute bei chirurgischen Verfahren und der postoperativen Heilung eingesetzt. Die Grenzen der offenen Chirurgie und der Laparoskopie sowie die sich abzeichnenden Vorteile der robotergestützten Chirurgie sind die entscheidenden Faktoren. Die sichere Interaktion von Softrobotern mit Geweben und anderen Körperorganen ist der Hauptgrund dafür, dass diese Roboter nach und nach herkömmliche chirurgische Verfahren ersetzen. Darüber hinaus bieten weiche Materialien wie superelastische, biokompatible und weiche, 3D-gedruckte Kunststoffe ein hohes Maß an Sicherheit bei chirurgischen Eingriffen. Diese Materialien erlauben es, die mechanischen Eigenschaften und die Form des Roboters bei Berührung zu verändern, was wiederum die Sicherheit erhöht.

Dank kompakter und flexibler Roboter mit intuitiver grafischer Benutzeroberfläche können Chirurgen heute komplizierte Operationen mit großer Leichtigkeit durchführen. Aufgrund der inhärenten Nachgiebigkeit von Softrobotern mit menschlichem Gewebe werden Softroboter heute in der minimal-invasiven Chirurgie (MIC) eingesetzt, z. B. bei der Single-Port-Laparoskopie. Diese Roboter können die Einschränkungen herkömmlicher MIC-Verfahren (u. a. begrenzte Freiheitsgrade) überwinden und dem Chirurgen Zugang zu Bereichen des Körpers verschaffen, die mit herkömmlichen Techniken bisher nicht zugänglich waren. Die unterschiedliche Flexibilität dieser Roboter kann auf die variable Steifigkeitsmechanismen zurückgeführt und so angepasst werden, dass sie dem Patienten das gewünschte Maß an Komfort bietet. Ferner wird erwartet, dass die Forschung im Bereich der Gesundheitsfürsorge zur Entwicklung kostengünstiger, patientenspezifischer Einweg-MIC-Geräte führen wird, was der Softrobotik neue Wachstumschancen eröffnen wird. Man geht davon aus, dass die robotergestützte Chirurgie von der Zunahme chronischer Krankheiten wie orthopädischer, gynäkologischer und urologischer Erkrankungen profitieren wird.

### Advanced Manufacturing

Es wird erwartet, dass die Softrobotik das zweithöchste Wachstum im Bereich Advanced Manufacturing erzielen wird, wo Softroboter ideal geeignet sind, um dynamische Aufgaben in rauen oder unsicheren Umgebungen auszuführen, insbesondere solche, die menschliche Interaktion erfordern. Softroboter bieten flexible, hochmoderne und kostengünstige Lösungen für die Fertigung in der Luftfahrt-, Pharma- und Medizinindustrie. Robotergestützte Automatisierung und neuartige additive Fertigungstechniken ersetzen auch traditionelle Produktionsverfahren in der Konsumgüter-, Prototypen- und Automobilindustrie.

Konventionelle Roboter, die im Advanced Manufacturing eingesetzt werden, sind starre Manipulatoren. Einige Aufgaben erfordern jedoch menschliche Hände. Hier bieten Softroboter aufgrund ihrer Fähigkeit, menschliche Handbewegungen nachzuahmen, eine geeignete Alternative. Außerdem sind menschliche Arbeiter bei der Produktmontage verletzungsanfällig. Dieses Risiko kann durch den Einsatz von Softrobotern minimiert werden, während die verbesserte Leistung die Produktivität steigert. Weiche Exoskelett-Systeme sind eine aufkommende Lösung zum Schutz von Industriearbeitern vor Schmerzen und Verletzungen beim Umgang mit sperrigen Lasten oder beim wiederholten Heben von Gegenständen. Kürzlich entwickelte tragbare Roboter, die auf einem weichen Exoskelett basieren, können das Gehen unterstützen, indem sie die Stoffwechselbelastung verringern. Darüber hinaus können einige Softroboter ihre Form verändern, um durch Hürden und Passagen zu navigieren, die für starre Roboter oder Menschen unzugänglich wären.

### Logistik und Automobilbau

In den letzten Jahren boomen das Internet der Dinge (IoT) und von künstlicher Intelligenz (KI) inspirierte Technologien. Der Einsatz dieser Technologien in der Logistik wird voraussichtlich zu einem starken Wachstum des Weltmarktes für Softrobotik führen. Am Körper tragbare Softroboter für die Hand und Soft-Exoskelettsysteme für die oberen und unteren Extremitäten können Lagerarbeitern helfen, ihre Aufgaben effizient und effektiv zu erledigen und gleichzeitig das Verletzungsrisiko und die körperliche Belastung zu verringern. Im Gegensatz zu herkömmlichen Exoskeletten mit starren Gliedern sind Soft-Exoskelette leicht und werden durch McKibben-Muskeln (pneumatische künstliche Muskeln) angetrieben. Aufgrund ihrer Nachgiebigkeit sind Soft-Exoskelette in der Lage, sich den komplexen und fließenden Bewegungen des menschlichen Körpers anzupassen und bieten so eine komfortable und sichere Lösung für die Arbeiter. Bei Anwendungen, die eine Roboterhand zur Handhabung von Objekten in einer industriellen Umgebung erfordern (z. B. in der Logistik), wird die Nachgiebigkeit in die unteraktuierte Roboterhand integriert, wodurch deren Funktionalität erhöht wird. Außerdem können schlangenähnliche Softroboter für die Logistik auf unebenen Wegen und komplexen und eingeschränkten Passagen eingesetzt werden.

Im Automobilsektor hat die Softrobotik in letzter Zeit einige Anwendungen gefunden. Softroboter werden eingesetzt, um den Komfort der Passagiere während der Fahrt zu erhöhen. Ein Softrobotikmodul kann in den Fahrer- oder Beifahrersitz integriert werden, um die Druckverteilung auf dem Sitz zu regulieren und die Sitzhaltung bei längerem Sitzen zu verändern.

Das Ergebnis der Anwendung von Softrobotik auf Fahrzeuge wird voraussichtlich ein entscheidender Wendepunkt sein. Ein prominentes Beispiel ist der Mercedes-Benz AVTR, der versucht, das Fahrzeug wie einen lebenden Organismus aussehen zu lassen. Die am Heck des Fahrzeugs angebrachten beweglichen bionischen Klappen ähneln einem Fabelwesen und bewegen sich synchron mit dem Fahrzeug. Außerdem ermöglichen die weichen und sanften, tierpfotenähnlichen Räder ein seitliches Krabbeln um 30 Grad.

### Lebensmittel und Getränke

Die weltweite Bevölkerung hat bereits 8 Milliarden erreicht. Diese rasant wachsende Bevölkerung stellt die Nahrungsmittelversorgung vor ständige Herausforderungen. Der Nahrungsmittelbedarf wird bis 2050 voraussichtlich von 59 % auf 98 % ansteigen (ThinkML Team, 2022). Darüber hinaus führte der Arbeitskräftemangel in der Landwirtschaft zwischen 2002 und 2014 zu jährlichen Einkommensverlusten in Höhe von 3 Millionen $. (ThinkML Team, 2022). Diese alarmierenden Zahlen liefern eine konkrete Begründung für den Einsatz von Softrobotern zur Förderung der Automatisierung bei der Handhabung, Verarbeitung und Verpackung von Lebensmitteln.

Das Verarbeiten und Verpacken von Lebensmitteln ist eine mühsame und langwierige Arbeit. Konventionelle starre Roboter sind anfällig für die unsachgemäße Handhabung und Beschädigung empfindlicher Lebensmittel. Soft- und flexible Roboter bieten automatisierte Lösungen zum Greifen und Halten solcher empfindlichen Artikel und imitieren dabei die menschliche Hand. Wenn sich die Aufgabe ändert, können Softroboter im Vergleich zu starren Robotern außerdem relativ einfach neu integriert und programmiert werden, was Kosten und Zeit spart. Dieser potenzielle Nutzen ist auch für andere Branchen wie die verarbeitende Industrie und die Konsumgüterindustrie von Bedeutung.

Die Rolle der Robotik im Allgemeinen und der Softrobotik im Besonderen in der Lebensmittelautomation wurde durch die Coronapandemie verstärkt, die die weltweite Lebensmittelproduktion und die Lieferketten erheblich gestört hat. Die roboterbasierte Automatisierung hat das Potenzial, dem Arbeitskräftemangel entgegenzuwirken und hohe Lebensmittelsicherheitsstandards in Verarbeitungs- und Verpackungsumgebungen zu erfüllen. Zur Aufrechterhaltung der Lebensmittelversorgungskette hat sich eine deutliche Verlagerung von traditionellen Prozessen hin zu einer Strategie der „Automatisierung im Prozess“ vollzogen. Außerdem sind pneumatisch betätigte weiche Greifer, die empfindliche Lebensmittel sicher und hygienisch handhaben können, eine ideale Wahl, um die Krankheitsübertragung zu vermeiden. Mitte 2021 warb ein wichtiger Akteur, Soft Robotics Inc., 10 Millionen $ für die Erforschung von Softgrasping, KI und 3D-Wahrnehmungsalgorithmen ein (Modor Intelligence, 2022).

### Sonstiges

Fortschritte in verschiedenen Bereichen haben die Anwendungsmöglichkeiten der Softrobotik über die Medizin und andere oben genannte industrielle Anwendungen hinaus erweitert. Softroboter sind heute auch in rauen Umgebungen einsetzbar, z. B. im Schnee oder in Korallenriffen. Sie haben Potenzial in den Bereichen Unterwasser- und Schiffsantriebe, Raumfahrt, Luftfahrt, Erkundung, elektronischer Handel und in vielen anderen Bereichen.

Kletterroboter werden z. B. bei Such- und Rettungseinsätzen und bei der Inspektion und Wartung von Gebäuden eingesetzt. Die zumeist Raupen nachempfundenen Roboter sind in der Lage, durch schwieriges und unbekanntes Gelände zu kriechen und große Entfernungen zurückzulegen. Außerdem können Softroboter dank ihrer Fähigkeit, sich zusammenzudrücken, ganz bequem durch Rohre und andere Strukturen navigieren. Nach dem Vorbild von Schlangen basiert die Bewegung des Roboters auf dem Zusammenziehen und Ausdehnen seines zylindrischen Körpers. Im Bereich der E-Textilien haben pneumatisch betriebene Softroboter, die auf Formveränderungen basieren, das Potenzial, eine Person beim Tragen „intelligenter“ Kleidung zu unterstützen.

### Fragen zur Selbstkontrolle

1. Für welche der folgenden Aufgaben kann ein Softroboter nicht eingesetzt werden? Bitte markieren Sie die richtige(n) Aussage(n).

* *Einen schweren Metallblock anheben*
* Präzises Greifen
* Medikamente in den Körper einbringen
* Dem Träger uneingeschränkte Bewegungsfreiheit bieten

Zusammenfassung

Konventionelle Roboter bestehen aus starren Materialien und Strukturen. Ihre Texturen sind hart und steif und somit für eine sichere Mensch-Roboter-Interaktion ungeeignet. In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich die Robotik von der Biologie inspirieren lassen, woraus ein neues, als „Softrobotik“ bekanntes, Teilgebiet entstanden ist. Es haben sich verschiedene „weiche“ Terminologien und Konzepte etabliert, darunter weiche Materialien, weiche Strukturen, weiche Aktoren und weiche Sensoren.

Die Softrobotik konzentriert sich auf Technologien und Techniken, die lebende Organismen (Menschen, Pflanzen und Tiere) nachahmen. Es ist ein schnell wachsendes und sehr interdisziplinäres Gebiet, das biegsame, flexible und intelligente Roboter für verschiedene Anwendungen umfasst. Das Hauptziel bei der Entwicklung von Softrobotern besteht nicht in der Schaffung außerordentlich präziser Systeme. Stattdessen sind sie meist für die Bewältigung von Problemen in der realen Welt gedacht. Softroboter sind also nicht dazu gedacht, konventionelle starre Roboter zu ersetzen, sondern sie erweitern die Designmöglichkeiten konventioneller Roboter in einem angewandten Kontext.

Die Softrobotik befindet sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium und ist noch weit von der Kommerzialisierung entfernt. Fortschritte in diesem Bereich erfordern umfangreiche Forschung, Prototypen, Experimente und Entwicklungen, um die damit verbundenen Herausforderungen durch die Verbesserung der Funktionalität und Leistung von Softrobotern zu bewältigen. Außerdem müssen hybride Strukturen, die eine Kombination aus Softrobotern und starren Robotern beinhalten, für viele wichtige Anwendungen erforscht werden.